

УДК 004.8

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ МУЛЬТИФАЗНЫХ КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Ю.В.СТАРИЧКОВА, А.В.ПИТИНОВ, Н. Ш. ГАЗАНОВА

РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

Аннотация. Данное исследование посвящено разработке и тестированию новых подходов для автоматического переноса вручную размеченных данных на смежные фазы компьютерной томографии (КТ) печени. Такой перенос позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на разметку медицинских изображений, а также преодолеть проблему нехватки размеченных данных для обучения алгоритмов автоматического анализа. В рамках работы были исследованы различные методы регистрации изображений КТ печени, направленные на точное совмещение изображений разных фаз. В разработанном алгоритме используется библиотека Insight Segmentation and Registration Toolkit (ИТК), в частности, модуль ИТК Elastix, предназначенный для высокоточной регистрации медицинских изображений. Однако стандартные методы библиотеки оказались недостаточно эффективными в сложных случаях совмещения из-за анатомических и физиологических изменений между фазами. Для преодоления этих ограничений был предложен усовершенствованный метод регистрации, позволяющий повысить точность совмещения и обеспечить более надежный перенос разметки. Проведенные экспериментальные исследования демонстрируют потенциальную эффективность предложенного подхода для автоматизации процесса разметки и улучшения качества анализа медицинских изображений КТ печени.

Ключевые слова: компьютерная томография печени, автоматическая разметка, регистрация изображений, ИТК Elastix, аффинное преобразование, медицинская визуализация.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR REGISTRATION OF MULTIPHASE CT IMAGES USING AFFINE TRANSFORMATIONS

YU.V.STARICHKOVA, A.V.PITINOV

RTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. This study is devoted to the development and testing of new approaches for automatic transfer of manually labelled data to adjacent phases of liver computed tomography (CT). Such transfer allows to significantly reduce the time spent on markup of medical images, as well as to overcome the problem of lack of marked-up data for training automatic analysis algorithms. As part of this work, different methods of liver CT image registration have been investigated to accurately align images of different phases. The developed algorithm utilises the Insight Segmentation and Registration Toolkit (ITK) library, in particular the ITK Elastix module designed for high precision registration of medical images. However, the standard methods of the library have proven to be underperforming in complex matching cases due to anatomical and physiological changes between phases. To overcome these limitations, an improved registration method was proposed to improve the matching accuracy and provide more reliable markup transfer. The conducted experimental studies demonstrate the potential effectiveness of the proposed approach to automate the markup process and improve the quality of medical CT liver image analysis.

Keywords: liver computed tomography, automatic markup, image registration, ITK Elastix, affine transformation, medical imaging.

Введение

Современная медицина активно использует методы компьютерной томографии (КТ) для диагностики и исследования заболеваний печени. КТ предоставляет возможность получать высококачественные трехмерные изображения, которые являются ключевыми для детального изучения анатомии и патологических изменений органа. Однако для эффективного использования этих данных в клинической практике и научных исследованиях требуется точная разметка

изображений, что зачастую является трудоемким и времязатратным процессом, выполняемым вручную специалистами-радиологами. Нехватка размеченных данных представляет серьезную проблему при разработке и обучении алгоритмов автоматического анализа изображений, включая методы машинного и глубокого обучения. Эти алгоритмы требуют большого объема высококачественных размеченных данных для достижения высокой точности и надежности. Увеличение объема размеченных данных посредством ручной разметки сопряжено со значительными затратами времени и ресурсов. Одним из перспективных решений данной проблемы является перенос уже существующих вручную размеченных данных на смежные фазы КТ исследований. Это позволяет не только сэкономить время на разметку, но и увеличить объем доступных данных для обучения алгоритмов. Однако для успешного переноса разметки необходимо обеспечить точное совмещение изображений разных фаз, что является сложной задачей из-за различий в положении органов, дыхательных движений пациента и других физиологических изменений. В рамках данного исследования рассматриваются подходы к регистрации изображений КТ печени с целью автоматизации переноса разметки на смежные фазы. Основой для разработки алгоритма послужила библиотека Insight Segmentation and Registration Toolkit (ИТК), широко используемая в медицинской визуализации благодаря своей гибкости и мощному функционалу. В частности, использован модуль ИТК Elastix, предназначенный для точной и надежной регистрации изображений. Однако стандартные методы, предлагаемые этой библиотекой, не всегда справляются с задачей точного совмещения в сложных случаях, что приводит к ошибкам при переносе разметки. Для преодоления данных ограничений был разработан усовершенствованный метод регистрации, включающий адаптацию параметров и алгоритмов ИТК Elastix под специфические особенности изображений КТ печени. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых показали повышение точности регистрации и успешный перенос разметки на смежные фазы. Это свидетельствует о потенциальной эффективности предложенного подхода и его возможности применения в клинической практике для автоматизации процесса разметки и улучшения качества анализа медицинских изображений.

Методика проведения эксперимента

Для автоматического переноса разметки с одной фазы компьютерной томографии (КТ) печени на другую была разработана методика, включающая несколько этапов предобработки и регистрации изображений. Основными шагами данного подхода являются нормализация изображений, использование эвристики для определения ключевых срезов, поиск максимально похожих срезов, обрезка изображений по ограничивающему прямоугольнику (bounding box) и регистрация с использованием библиотеки Elastix в составе ИТК. На первом этапе проводится нормализация исходных изображений КТ, приводя их к стандартным значениям уровней серого, соответствующим фильтру abdomen в программе 3D Slicer. Это обеспечивает одинаковую контрастность и яркость изображений, что составляет важное условие для успешной последующей регистрации. Для этого используются параметры окна (window) и уровня (level): `window=350.0`, `level=40.0`. для выбора среза. Была реализована эвристика, для выбора среза, заключающаяся в выборе последнего среза, на котором присутствует маска печени. Это обусловлено тем, что вокруг последнего среза с разметкой находится свободная от органов контрастирующая область, что облегчает алгоритму поиск соответствий при регистрации. Этот подход позволяет алгоритму "зацепиться" за топографические особенности изображения [1]. Для улучшения точности совмещения производится поиск максимально похожего среза на фазе, куда переносится разметка, в пределах ± 40 срезов по оси z (соответствующей направлению от головы к ногам) и ± 15 срезов по осям x и y. Сначала поиск проводится по осям x и y, затем по оси z. Такой выбор диапазонов связан с тем, что наибольшее смещение органов наблюдается именно по оси z из-за особенностей положения пациента в сканере и физиологических факторов [2]. В качестве метрики сходства используется среднеквадратичная ошибка (RMSE). Данная метрика позволяет количественно оценить разницу между срезами и выбрать наиболее похожий, что способствует более точному совмещению границ печени. Далее для подготовки полученного совмещенного исследования для использования в обучении моделей искусственного интеллекта производится обрезка изображений по ограничивающему прямоугольнику, определенному по маске печени, с

добавлением отступа в 20 вокселей со всех сторон. Это уменьшает объём данных для обработки и фокусирует регистрацию на области интереса, что повышает её эффективность и точность [3]. Для регистрации изображений используется библиотека Elastix из состава ИТК, которая предоставляет широкий набор инструментов для медицинской регистрации. В качестве типа преобразования выбрано аффинное преобразование из-за его быстродействия и достаточной точности для данной задачи. Аффинное преобразование учитывает перенос, масштабирование, поворот и сдвиг, что достаточно для компенсации изменений между фазами КТ [4]. Использование маски печени в качестве области интереса для регистрации позволяет сосредоточить процесс на значимых областях и игнорировать посторонние структуры. Процесс начинается с инициализации метода регистрации. Затем, на фиксированное изображение накладывается маска, которая выделяет область интереса — в данном случае, это участок с изображением печени. Для оценки подобия изображений используется метрика общей информации Матте, основанная на гистограммах. Регистрация включает в себя использование оптимизатора, который управляет поиском оптимальных параметров преобразования. Ему задаются параметры, такие как скорость обучения и количество итераций, чтобы настроить процесс на достижение устойчивой сходимости. Перемещения по изображению измеряются в физических единицах, позволяя учесть реальное пространственное разрешение данных. На следующем этапе происходит инициализация аффинного преобразования, которое используется для трансформации изображения. Данный тип преобразования позволяет учесть основные изменения между изображениями, такие как смещения и масштабирование. Оно не изменяет глубинные характеристики структуры, но корректирует ее положение и ориентацию относительно других изображений. Наконец, для выполнения интерполяции выбирается сплайн, который обеспечивает гладкость переходов между пикселями. В результате выполнения процесса выводится конечное преобразование, которое можно применить для корректировки движущегося изображения, чтобы оно совпадало с фиксированной маской.

Результаты и их обсуждение

В результате применения предложенного метода удалось улучшить качество переноса разметки по сравнению со стандартным использованием библиотеки ИТК Elastix. При использовании только стандартных методов регистрация в сложных случаях была неточной, что приводило к значительным расхождениям в разметке печени на разных фазах. Оценка качества переноса разметки проводилась с использованием коэффициента подобия Dice и метрики пересечения по площади (Intersection over Union, IoU). В эксперименте использовались автоматические сегментационные маски, полученные с помощью модели, обеспечивающей коэффициент Dice более 80% относительно истинной разметки.

Таблица 1. Полученные метрики

Метод	Коэффициент Dice, %	IoU, %
Стандартный ИТК Elastix	73,2 %	61%
Предложенный метод	81,5%	72,2%

Использование предложенной методики позволило увеличить коэффициент Dice с 73,2% до 81,5%, а метрику IoU с 61,0% до 72,2% при этом следует брать во внимание накопление ошибки[5] от использования в качестве ground truth масок сегментаций. Это свидетельствует о значительном улучшении точности переноса разметки. На рисунке 1 представлены визуальные результаты регистрации: (а) результат регистрации с использованием стандартного ИТК Elastix, (б) результат с использованием предложенного метода. Красным контуром отмечена маска печени, синим контуром маска патологии, обе маски являются размеченными вручную, также на обоих изображениях изображены срезы с одним индексом, чтобы наглядно продемонстрировать разницу в смещении. Видно, что в случае применения предложенной методики границы печени и патологии более чётко совпадают.



Рис. 1. Сравнение результатов регистрации: (а) стандартный ИТК Elastix; (б) предложенный метод.

Улучшение результатов связано с использованием эвристики для выбора ключевых срезов и фокусированием регистрации на области ground truth маски патологии. Аффинное преобразование оказалось достаточным для компенсации смещений и деформаций между фазами, сохраняя при этом высокую скорость вычислений.

Заключение

В рамках данного исследования разработан и протестирован метод автоматического переноса ручной разметки печени на смежные фазы КТ исследований. Предложенная методика включает предварительную нормализацию изображений, использование эвристики для выбора ключевых срезов, обрезку по ограничивающему прямоугольнику и регистрацию с использованием аффинного преобразования в библиотеке Elastix. Результаты экспериментов показали, что данный подход обеспечивает значительное улучшение точности переноса разметки по сравнению со стандартными методами. Это подтверждается повышением коэффициента Dice до 81,5% и метрики IoU до 72,2%. Предложенный метод может быть использован для автоматизации процесса разметки медицинских изображений, что существенно экономит время специалистов и улучшает качество анализа данных.

Список литературы

1. Maintz, J.B.A., Viergever, M.A. A survey of medical image registration. *Medical Image Analysis*, 1998;2(1):1-36.
2. Hill, D.L.G., Batchelor, P.G., Holden, M. et al. Medical image registration. *Physics in Medicine & Biology*, 2001;46(3):R1-R45.
3. Zitová, B., Flusser, J. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 2003;21(11):977-1000.
4. Johnson, H. J., McCormick, M. M., Ibáñez, L., & the Insight Software Consortium. (2024). The ITK software guide: Book 1: Introduction and development guidelines (4th ed., Updated for ITK version 5.4.0). Retrieved from <https://itk.org>. P. 6-7.
5. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, Lecture Notes in Computer Science*, vol 9351.