

Сравнение автоматических методов обнаружения неоднородностей в тактильных образах

Я. И. Рахматулин, Д. В. Рухович
(МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва)

Актуальными для медицины являются задачи автоматического анализа тактильных образов, регистрируемых инструментально при проведении эндоскопических операций. Важным элементом этого анализа является автоматическое обнаружение неоднородностей. В 2016 году Р. Ф. Солодовой с соавторами были предложены три метода автоматического обнаружения неоднородностей по инструментально зарегистрированным результатам одного нажатия тактильным механорецептором на исследуемый участок. Цель настоящего исследования — теоретическое сравнение согласованности срабатывания этих методов. Более конкретно, изучается вопрос, следует ли из того, что один из методов определил участок как неоднородный, утверждение, что тогда и другие методы определяют этот участок как неоднородный.

Ключевые слова: тактильные образы, автоматический анализ, обнаружение неоднородностей, медицинский тактильный эндохирургический комплекс, тактильный механорецептор.

Патологические изменения тканей влекут, в частности, изменение жесткостных свойств этих тканей [1, 2]. Это позволяет хирургу при проведении открытых операций тактильно обнаруживать и локализовать визуально неразличимые патологические очаги, включая злокачественные опухоли. Активное развитие эндоскопической хирургии привело к невозможности традиционной пальпации. Для решения возникшей проблемы был создан Медицинский тактильный эндохирургический комплекс (МТЭК) [3], позволяющий, в частности, инструментально регистрировать интраоперационные тактильные образы. МТЭК является коммерчески доступным зарегистрированным медицинским изделием и доказал свою эффективность в лапароскопической и торакокопической

хирургии [4], в том числе при проведении робот-ассистированных операций [5].

Ключевой составляющей МТЭКа является тактильный механорецептор: именно он регистрирует тактильные образы. Тактильный механорецептор (в зависимости от модели) имеет 7 или 19 датчиков давления, размещенных на его рабочей поверхности. Эти датчики осуществляют измерения с частотой порядка 100 измерений в секунду и в режиме реального времени передают результаты на компьютер. Специализированное программное обеспечение компьютера предобрабатывает, воспроизводит и анализирует полученную информацию.

В рамках начальной предобработки показания всех датчиков приводятся в единую шкалу и дискретизируются. Дискретизация использует 256 уровней. Нулевой уровень соответствует отсутствию контакта рабочей поверхности механорецептора с исследуемым объектом, максимальный 255-й уровень соответствует фиксированному давлению P_{\max} или более высоким значениям давления. В диапазоне от 0 до P_{\max} зависимость уровня от давления линейная. Анализ тактильных образов использует уже шкалированные и дискретизованные значения.

Одной из ключевых задач автоматического анализа тактильных образов является выявление неоднородностей: именно неоднородные участки содержат границы очагов патологических изменений, и их обнаружение и экспертный анализ позволяют хирургу идентифицировать и локализовывать визуально неразличимые очаги. При инструментальном пальпировании автоматическое выявление неоднородностей помогает хирургу ускорить эту процедуру, а также концентрироваться именно на наиболее важных участках, не тратя силы и внимание на анализ зон, которые автоматическая классификация определила как однородные или близкие к однородным.

В работе [6] было предложено три метода автоматического выявления неоднородности по результатам одного нажатия тактильным механорецептором на исследуемый участок.

Первый метод является статическим в том смысле, что он сопоставляет только результаты одновременно осуществленных измерений давления (или, иными словами, сопоставляет только значения внутри одного тактильного кадра). Если через $p_j(t)$ обозначить значение (уровень) давления на j -м датчике в момент времени t (в дискретной шкале $0 \dots 255$), то статический метод может быть описан следующим образом. Участок определяется как неоднородный, если хотя бы для одного момента време-

ни максимальная разность $\max_{j,k} (p_j(t) - p_k(t))$ превосходила предустановленный порог, равный по умолчанию 80.

Два других метода, предложенных в работе [6], являются динамическими в том смысле, что они сопоставляют значения из разных тактильных кадров. Первый динамический метод использует величины

$$\kappa_j(t) = [p_j(t) - p_j(t - \Delta t)]_0 \sqrt{p_j(t) + \alpha},$$

где

$$[x]_0 = \begin{cases} x, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Если положить $\kappa_{\min}(t) = \min_j \kappa_j(t)$, $\kappa_{\max}(t) = \max_j \kappa_j(t)$, а

$$K(t) = \frac{\kappa_{\max}(t) + \rho}{\kappa_{\min}(t) + \rho}$$

(где ρ — заранее установленный параметр регуляризации), то участок определяется как неоднородный, если хотя бы в один момент времени $K(t)$ превосходит предустановленный порог, по умолчанию равный 5. Значения по умолчанию для других параметров: $\rho = 200$, $\Delta t = 0.5$ сек, $\alpha = 100$.

Наконец, второй динамический метод базируется на стандартных разностных отношениях

$$\kappa_j(t; \Delta t) = \frac{[p_j(t) - p_j(t - \Delta t)]_0}{\Delta t}.$$

Если положить

$$\kappa_{\min}(t; \Delta t) = \min_j \kappa_j(t; \Delta t), \quad \kappa_{\max}(t; \Delta t) = \max_j \kappa_j(t; \Delta t),$$

$$K(t) = \max_{\Delta t \in [t_0; T]} \frac{\kappa_{\max}(t; \Delta t) + \rho}{\kappa_{\min}(t; \Delta t) + \rho},$$

то участок определяется как неоднородный, если хотя бы в один момент времени $K(t)$ превосходит предустановленный порог, по умолчанию равный 5. Значения по умолчанию параметров для этого метода: $\rho = 140$, $t_0 = 0.15$ сек, $T = 0.5$ сек.

Задача настоящего исследования — теоретическое сравнение согласованности срабатывания описанных выше методов. Более конкретно, изучается вопрос, следует ли из того, что один из методов определил участок

как неоднородный, утверждение, что тогда и другие методы определяют этот участок как неоднородный. Изучение проводится в случае, когда для всех параметров берутся их значения по умолчанию, приведенные выше.

В случае, когда не делается никаких жестких предположений о структуре регистрируемых уровней давления, удалось показать, что все три метода находятся в общем положении.

Теорема 1. *Для любой пары описанных выше методов существует тактильный образ (последовательность тактильных кадров), на основании которого первый из методов определяет участок как неоднородный, а второй не обнаруживает неоднородности.*

Например, по нажатию, продолжительность которого составляет 1 сек., и в котором на части датчиков показания с увеличением времени растут линейно с коэффициентом 200, а на оставшейся части — также линейно, но с коэффициентом 100, статический метод классифицирует участок как неоднородный, так как в конце нажатия разница между уровнями давления на датчиках первой группы и второй группы равна $200 - 100 \geq 80$. Однако во втором динамическом методе для такого нажатия $\kappa_j(t; \Delta t)$ тождественно равна 200 для первой группы и тождественно равна 100 для второй группы датчиков. Соответственно,

$$K(t) \equiv \frac{200 + 140}{100 + 140} < 5,$$

и метод не классифицирует участок как неоднородный. Аналогично можно проверить, что для этого же нажатия первый динамический метод также не будет классифицировать участок как неоднородный.

Отметим, что если ограничиться рассмотрением сравнительно узкого, но физически осмысленного класса, в котором зависимость уровня давления от времени для каждого датчика линейна, а анализируемая последовательность кадров заканчивается при выходе первого из датчиков на максимальный уровень 255, то несложно получить и положительный результат.

Теорема 2. *Для последовательностей кадров, удовлетворяющих описанным выше ограничениям, определение участка как неоднородного любым из динамических методов гарантирует, что тогда и статический метод определяет этот участок как неоднородный.*

При этом приведенный выше пример показывает, что обраное утверждение неверно и в рамках этого сравнительно узкого класса последовательностей тактильных кадров.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 16–11–00058 «Разработка методов и алгоритмов автоматизированного анализа медицинской тактильной информации и классификации тактильных образов».

Авторы выражают благодарность А. В. Галатенко, В. В. Галатенко, В. М. Староверову и Р. Ф. Солодовой за замечания, ценные комментарии и помощь в подготовке текста.

Список литературы

- [1] Yallapu M. M., Katti K. S., Katti D. R., et al. The roles of cellular nanomechanics in cancer // *Med Res Rev.* — 2015. — **35** (1). — P. 198–223.
- [2] Fenner J., Stacer A. C., Winterroth F., et al. Macroscopic stiffness of breast tumors predicts metastasis // *Sci Rep.* — 2014. — **4**. — P. 5512.
- [3] Sadovnichy V., Gabidullina R., Sokolov M., et al. Haptic device in endoscopy // *Stud Health Technol Inform.* — 2014. — **196**. — P. 365–368.
- [4] Barmin V., Sadovnichy V., Sokolov M., et al. An original device for intraoperative detection of small indeterminate nodules // *Eur J Cardiothorac Surg.* — 2014. — **46** (6). — P. 1027–1031.
- [5] Solodova R. F., Galatenko V. V., Nakashidze E. R., et al. Instrumental tactile diagnostics in robot-assisted surgery // *Med Devices (Auckl).* — 2016 (в печати).
- [6] Solodova R., Staroverov V., Galatenko V., et al. Automated detection of heterogeneity in medical tactile images // *Stud Health Technol Inform.* — 2016. — **220**. — P. 383–389.