

Обнаружение капилляров на изображениях, формируемых капилляроскопом

П. А. Чочиа

Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва, Россия
Поступила в редколлегию 00.05.2013

Аннотация—Рассматриваются вопросы обнаружения капилляров на изображениях, полученных в результате обработки видеопоследовательностей, формируемых компьютерным капилляроскопом. Исследуются задачи формирования и фильтрации карты контурных линий капилляров, синтаксического анализа контуров, выбора мажоритарного капилляра, составления морфологических характеристик контурных линий для их описания и анализа.

1. ВВЕДЕНИЕ

Капилляроскопия представляет собой способ неинвазивного (т.е. без проникновения внутрь организма и повреждения кожных покровов) исследования и диагностики микроциркуляторного кровяного русла [1]; она является одним из диагностических методов исследования функционирования периферического отдела сердечно-сосудистой системы человека в кожных и слизистых покровах. Форма капилляров, скорость кровотока и другие параметры позволяют делать выводы о состоянии здоровья, а также о предрасположенности пациента к различным заболеваниям [2].

Компьютерные капилляроскопы [2–4] — приборы, позволяющие осуществлять микровидеосъемку в отраженном свете с увеличением в 100–200 и более раз. Объектом наблюдений обычно является ногтевое ложе пальцев рук или ног (как альтернатива — десна), поскольку именно в этих областях капиллярные петли выстраиваются параллельно поверхности кожи и в последнем слое их можно достаточно четко рассмотреть по всей длине [4].

Алгоритм предварительной обработки видеопоследовательностей, формируемых компьютерным капилляроскопом, состоящий в покадровой фильтрации, пространственной синхронизации кадров и формировании усредненного изображения, был нами рассмотрен ранее [5]. Пример отдельного кадра первоначальной видеопоследовательности, формируемой капилляроскопом, а также изображение, являющееся результатом синхронизации и усреднения по множеству кадров, представлены на Рис. 1. Настоящая работа является дальнейшим продолжением. Здесь исследуются вопросы анализа полученного усредненного изображения, формирования и фильтрации картины контурных линий капилляров, выбора мажоритарного капилляра, составления морфологических характеристик контурных линий для их описания и анализа.

Полученное усредненное изображение (Рис. 1,б) служит промежуточным препаратом, т.е. представляет собой исходный материал для обсуждаемого ниже автоматического анализа. Конечной целью анализа является выбор мажоритарного капилляра на изображении, нахождение двух линий его границ (внутренней и внешней), представление их в виде последовательностей точек и описание характеристик линий.

На усредненном изображении капилляры выглядят как темные области, имеющие характерный вид вытянутых петель. Следует отметить, что это не изображения самих капилляров,

которые прозрачны, а суммированные следы движения эритроцитов по капиллярам. По причине эластичности капилляров, а также из-за погрешностей совмещения отдельных кадров видеопоследовательности, области капилляров на усредненном изображении имеют весьма нечеткие контуры и характеризуются заметными колебаниями яркости на своем протяжении. Такие области не удается с достаточной точностью выделять пороговыми методами или обнаруживать их границы стандартными контурными операторами [6]. Применение методов прослеживания границ, например, алгоритма Кэнни [7], являющегося оптимальным по критериям выделения, локализации и минимизации нескольких откликов одного контура, также не приводит в данной задаче к приемлемому результату, как это можно увидеть в [8]; контурные линии оказываются сильно разорванными, наряду с этим обнаруживается излишне много ложных линий.

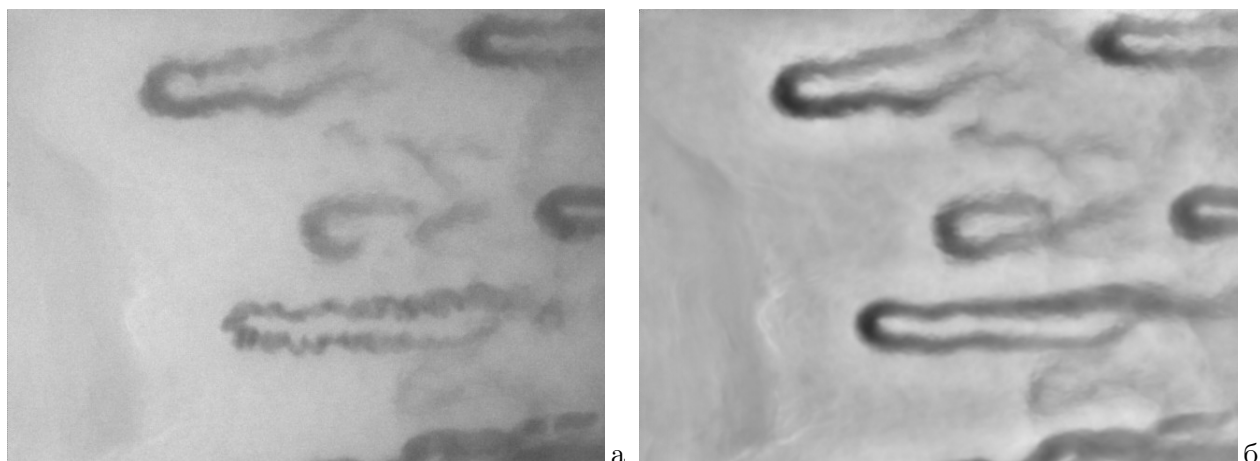


Рис. 1. Отдельный кадр исходной видеопоследовательности (а); изображение, полученное в результате синхронизации и усреднения по множеству кадров (б).

По этим причинам в настоящей работе процедура нахождения границ капилляров на усредненном изображении строится как комбинация различных алгоритмов и состоит из следующих этапов:

- формирование опорного набора областей приближенной формы;
- выделение точек изображения с необходимыми контурными свойствами;
- составление первичной карты контурных линий;
- синтаксическая фильтрация и корректировка дефектов карты контурных линий;
- выбор мажоритарного капилляра и удаление лишних областей и контуров;
- преобразование представления контурных линий из растрового в векторное;
- формирование морфологических характеристик контурных линий;
- морфологический анализ и окончательная корректировка контурных линий.

В дальнейшем будут использоваться различные операции фильтрации и анализа, в которых потребуются масштабные привязки к размерам объектов на изображении. В качестве такого масштабного параметра выберем *средний видимый диаметр* капилляра в единицах пикселей изображения. Будем обозначать этот параметр символом D .

2. ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОГО МНОЖЕСТВА ОБЛАСТЕЙ

Самым простым способом обнаружения областей капилляров на усредненном изображении (Рис. 1,б) могло бы являться пороговое разделение по яркости. Но как показывают эксперименты, получаемый таким путем результат далек от желаемого. Тем не менее он может

являться промежуточным шагом, на котором формируется опорное множество областей наиболее вероятного положения капилляров, которое будет весьма полезно в дальнейшем.

Опорное множество областей формируется операциями фильтрации высоких частот исходного усредненного изображения, обеспечивающей выравнивание фона, адаптивным пороговым выделением областей капилляров и их последующей морфологической коррекцией.

Фильтрация высоких частот изображения выполняется упрощенным преобразованием нерезкого маскирования [9, 10], выполняемым по формуле

$$y(m, n) = x(m, n) - A(m, n) + C, \tag{1}$$

где

$$A(m, n) = \frac{1}{(2W + 1)^2} \sum_{u=-W}^W \sum_{v=-W}^W x(m + u, n + v)$$

есть среднее значение яркости по фрагменту размерами $(2W + 1) \times (2W + 1)$ с центром в точке (m, n) изображения, C — константа (обычно $1/2$ диапазона яркостей). В данном случае выбиралось значение $W \approx 1.5D$.

С учетом того, что яркость капилляров ниже яркости фона, выделение областей капилляров состоит в пороговом разделении элементов фильтрованного изображения по яркости следующим адаптивным алгоритмом:

$$y(m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если } x(m, n) < C - (\sigma + \delta), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Здесь σ — значение СКО (корня из дисперсии) яркости по фрагменту размерами $(2W + 1) \times (2W + 1)$ с центром в точке (m, n) , а δ — постоянная небольшая константа. Полученные единичные элементы составляют области капилляров, а нулевые — область фона.

Морфологическая коррекция предназначена для заполнения возможных мелких разрывов между соседними областями или их участками, сглаживания неровностей краев, а также для удаления мелких областей размерами не более 2 пикселей. Она осуществляется двумя последовательными операциями замыкания и размыкания, каждая из которых состоит из пары операций дилатации и эрозии [6]. Замыкание строится как дилатация, результат которой подвергается эрозии, а размыкание наоборот — эрозия, результат которой подвергается дилатации. Дилатация и эрозия основаны на анализе окрестности $V_8(m, n)$ каждого элемента $x(m, n)$ изображения, состоящей из 8 окружающих его ближайших элементов; т.е. $V_8(m, n) = \{x(m \pm 1, n \pm 1)\} = \{x_i | i = 1, \dots, 8\}$.

Операция дилатации состоит в проверке существования хотя бы одного $x_i \in V_8(m, n)$, $(i = 1, \dots, 8)$ с нижеследующими условиями и соответствующем преобразовании элемента $x(m, n)$:

$$y(m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если существует } x_i \neq 0, \\ x(m, n), & \text{иначе.} \end{cases} \tag{2}$$

Операция эрозии является обратной к операции дилатации:

$$y(m, n) = \begin{cases} 0, & \text{если существует } x_i = 0, \\ x(m, n), & \text{иначе.} \end{cases} \tag{3}$$

В результате таких преобразований из изображения на Рис. 1,б получаем первичное множество областей, представленное на Рис. 2,а.

Как видно, полученное изображение содержит большое количество областей малых размеров, а также областей на границах, которые являются ложными. Был выбран априори задаваемый параметр N_R , ограничивающий максимально допустимое число опорных областей на

изображении (в нашем случае было выбрано значение $N_R = 16$). Следующим шагом осуществляется анализ размеров и расположения областей. Области упорядочиваются (ранжируются) в порядке убывания их площади. Удаляются вытянутые области вблизи границ изображения, а также мелкие, ранг которых превышает значение порога N_R .

После удаления мелких образований первичная карта областей приобретает вид, показанный на Рис. 2,б. Она будет использована ниже при анализе контурных линий и выборе мажоритарного капилляра.

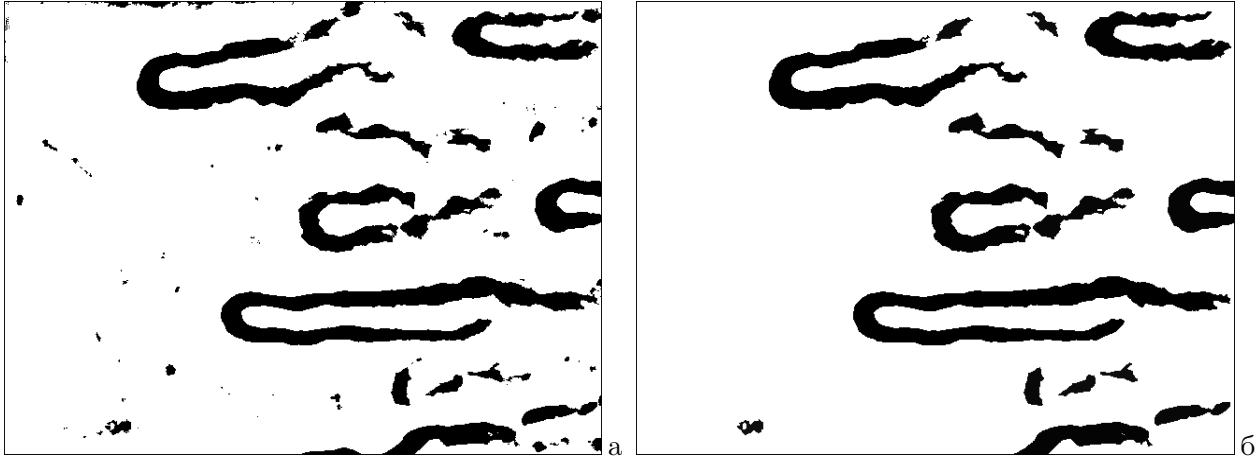


Рис. 2. Первичное множество областей (а); вид множества после удаления мелких областей (б).

3. ФОРМИРОВАНИЕ КАРТЫ КОНТУРОВ КАПИЛЛЯРОВ

Целью данного этапа является нахождение контурных границ капилляров.

3.1. Формирование первичной карты контурных линий

Ввиду нечеткости и значительной протяженности яркостных перепадов в направлении нормали к линии границ объектов, ставилась задача проведения контурных линий через точки, которые находятся в середине яркостного перепада. Способ обнаружения таких точек весьма близок первой части алгоритма [7].

Для снижения шума и повышения устойчивости нахождения максимума градиента яркости в центре контурного перепада первоначально осуществляется *Гауссово сглаживание* усредненного изображения: $y(m, n) = \frac{1}{2\pi\sigma} \sum_{u,v} x(m-u, n-v) \exp\{-((m-u)^2 + (n-v)^2)/2\sigma^2\}$. Было выбрано значение $\sigma = 1.5$.

Направление $\alpha(m, n)$ и *модуль градиента яркости* $\text{Grad}_\alpha(m, n)$ определяются в каждой точке (m, n) по сглаженному изображению. Анализируются 4 возможные линии направлений градиента (от 0° до 135° с шагом 45°) и выбирается направление, на котором достигается максимум модуля градиента яркости.

Первичный набор контурных точек формируется на основе вычисленных значений направления и модуля градиента отысканием локального максимума вдоль линии градиента. Для этого в каждой точке (m, n) анализируются значения модуля в данной точке $\text{Grad}_\alpha(m, n)$, а также в двух ближайших соседних точках вдоль направления $\alpha(m, n)$ — в обе стороны от точки (m, n) . Точка (m, n) считается контурной, если значение $\text{Grad}_\alpha(m, n)$ больше, чем значения модулей градиента ее обоих соседей по выбранному направлению. Результат данного этапа показан на Рис. 3,а.

Удаление далеко расположенных линий. Поскольку интерес представляют лишь контурные линии, проходящие на небольшом расстоянии от обнаруженных объектов, то первым шагом фильтрации удаляются все те линии, которые отстоят от какой-либо из опорных областей, сформированных ранее в п.2, далее чем заданный размер капилляра D .

Утолщение линий. Данная операция преследует две цели. Первая — устранение (уменьшение количества) разрывов будущих контурных линий, вторая — подготовка препарата, который бы при последующем утончении обеспечивал получение контурных линий с необходимым соседством составляющих ее точек. Для этого выполняется операция дилатации (2), в результате чего происходит слияние близкорасположенных контурных точек.

Утончение линий. Все сгруппированные контурные точки рассматриваются как отдельные области. Осуществляется операция стирания краевых точек каждой из областей до тех пор, пока не остается остов области с 4-смежным соседством пикселей [6]; таким образом допускается только вертикальное и горизонтальное соседство пикселей, составляющих линию.

Алгоритм утончения является двухпроходным и состоит в следующем. На первом проходе для каждого контурного пикселя $x(m, n)$ анализируется восьмерка его соседей $V_8(m, n)$, которая интерпретируется как кольцо. Формируются всевозможные тройки, состоящие из соседних элементов кольца (всего таких 8). Составляются пары из не соседствующих троек, расположенных на противоположных сторонах кольца. Если имеется хотя бы одна пара, в которой одна тройка состоит из всех контурных элементов, а вторая — из всех фоновых элементов, то тогда центральный пиксель $x(m, n)$ помечается как *промежуточный* (т.е. ни фоновый, ни контурный). На втором проходе последовательно просматриваются все пиксели изображения и те, которые отмечены как промежуточные, стираются и становятся фоновыми. Алгоритм утончения итеративный. Окончание производится в случае, если на первом проходе ни один из пикселей не переведен в ранг промежуточного. Тем самым формируется *первичная карта контурных линий*.

Результат операций удаления далеко расположенных линий, дилатации и утончения первичного набора контурных точек (Рис. 3,а) показан на Рис. 3,б.

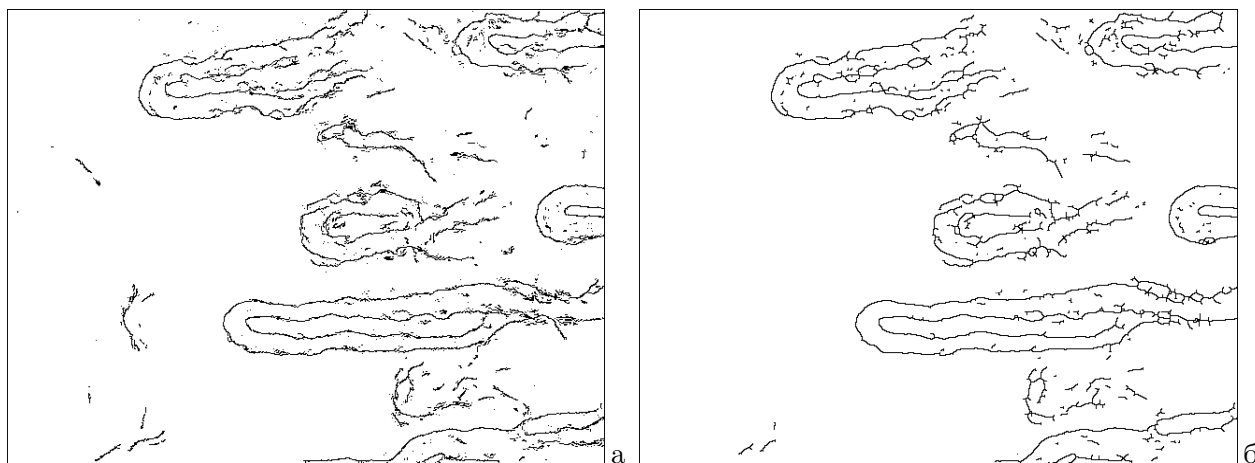


Рис. 3. Первичный набор контурных точек (а); первичная карта контурных линий (б).

3.2. Синтаксическая фильтрация и корректировка дефектов первичного набора линий

Набор первоначальных контурных линий имеет целый ряд различных недостатков: количество контуров все еще слишком велико, причем среди них очень много линий малой длины; на контурах много ветвлений, образующих короткие ветви и петли различной сложности. Необходима корректировка и упрощение этого набора линий.

Удаление линий малой длины. Как и выше, при выборе допустимого числа опорных областей на изображении N_R , вводится ограничение на допустимое число контурных линий $N_L = 2N_R$. Для выполнения операции удаления, контурные линии интерпретируются как области. Той же операцией, что и выше в случае областей, осуществляется анализ размеров областей и производится упорядочение (ранжирование) в порядке убывания размеров. Линии, имеющие ранг более чем N_L или размер менее, чем $1.5D$, удаляются.

Удаление коротких ветвей. Просмотром изображения составляется список точек ветвления линий и длина ветвей. Те ветви, длина которых меньше задаваемого предела D , стираются. Результат показан на Рис. 4.

Корректировка дефектов линий. Контурная картина, полученная на предыдущем шаге, содержит целый ряд некорректных участков (петли, ветвления и др.). На данном этапе анализируется топология линий карты контуров и осуществляется ее упрощение; примеры некоторых некорректных участков показаны на Рис. 5,а,в,д,ж. Дефекты линий можно классифицировать по следующим видам: концевая петля (Рис. 5,а), внутриконтурная петля вида **О** (Рис. 5,в), ветвление вида **У** с короткой ветвью, межконтурное соединение вида **Н**, внутриконтурное соединение вида **Θ** (Рис. 5,д), дефект сложного вида (Рис. 5,ж). Целью является приведение контурных линий в незамкнутый вид без ветвлений, допускающий представление каждой из них в виде последовательного списка точек (простой цепочки).

Алгоритм корректировки итерационный. Первоначально находятся координаты всех особых точек — точек ветвления и терминальных точек концов линий T , после чего осуществляется циклическая проверка принадлежности точек ветвления каждому из видов поочередно. Переход к дефекту следующего вида происходит в том случае, если отсутствуют особые точки предыдущего вида. Полный цикл итераций завершается тогда, когда не оказалось ни одной особой точки последнего вида.

Корректировка каждой точки ветвления начинается с проверки ее соответствия текущему обрабатываемому виду. В случае совместимости условий производится стирание лишней ветви, а координаты граничных точек такой ветви удаляются из списка особых точек. Рассмотрим очередную особую точку, состоящую из 3-х ветвей. Определяется длина каждой ветви, исходящей из этой точки до ее окончания (терминальной точки T) или до следующей точки ветвления. Будем обозначать ветви через $B_i (i = 0, 1, 2)$, их длины через L_i , координаты обрабатываемой особой точки через C , ближайшей особой точки на ветви i — через C_i . Если длина ветви $L_i > 8D$, то такая ветвь считается длинной без особой точки. Проверяются и обрабатываются следующие случаи.

1. *Концевая петля* (Рис. 5,а). Если $C_i = C$ при $L_i < 5D (i, j = 0, 1, 2)$, то ветвь считается концевой петлей и удаляется (Рис. 5,б).
2. *Внутриконтурная петля вида О* (Рис. 5,в). Если $C_i = C_j (i, j = 0, 1, 2; i \neq j)$ и $C_i \neq C$, то ветви B_i и B_j образуют внутриконтурную петлю вида **О**. Удаляется наиболее длинная из ветвей B_i и B_j (Рис. 5,г).
3. *Ветвление вида У*. Если одна или несколько ветвей из B_i заканчиваются терминальной точкой T , то удаляется наиболее короткая из них (на которой минимизируется значение L_i).

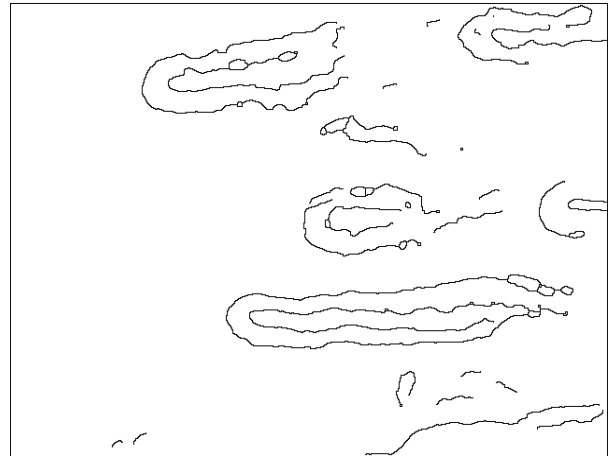


Рис. 4. Карта контурных линий после удаления коротких ветвей.

4. *Межконтурное соединение вида Н*. Рассматривается ситуация, когда только одна из ветвей (i) имеет точку ветвления, а любая из 2-х других либо не имеет особой точки, либо имеют терминальную точку вида T . В таком случае проверяются ветви ближайшей точки ветвления C_i . Если для них также выполняется условие, что только одна из ветвей имеет точку ветвления (ясно, что это может быть только предыдущая точка C), а любая из 2-х оставшихся либо не имеет особой точки, либо имеют терминальную точку вида T , то такая конструкция из точек $[C, C_i]$ считается соединением вида **Н** и отрезок между C и C_i удаляется.

5. *Внутриконтурное соединение вида Θ* (Рис. 5,д). Отбираются те точки ветвления, у которых каждая из ветвей также оканчивается точкой ветвления. Проверяется, что среди этих 3-х точек ветвления имеется такая C_i , что 2 оставшиеся ее ветви также заканчиваются точками ветвления, причем они попарно совпадают с оставшимися двумя точками ветвления исходной точки C . Такая конструкция считается соединением вида Θ и отрезок между C и C_i удаляется. Тем самым соединение вида Θ переводится во внутриконтурную петлю вида **О**, устраняемую на следующем итерационном шаге (Рис. 5,е).

6. *Стирание оставшихся особых точек типа Y*. Иногда образуются сложные топологические структуры, как, например, на Рис. 5,ж. В ряде случаев их удается итеративно упростить и удалить при помощи рассмотренных выше вариантов корректировки, но иногда этого не происходит. В таких случаях осуществляется стирание всех точек ветвлений типа Y, т.е. разрыв контурных линий в этих точках, и последующее удаление всех коротких линий (Рис. 5,з). Тем самым каждая из линий приводится в незамкнутый вид без ветвлений.

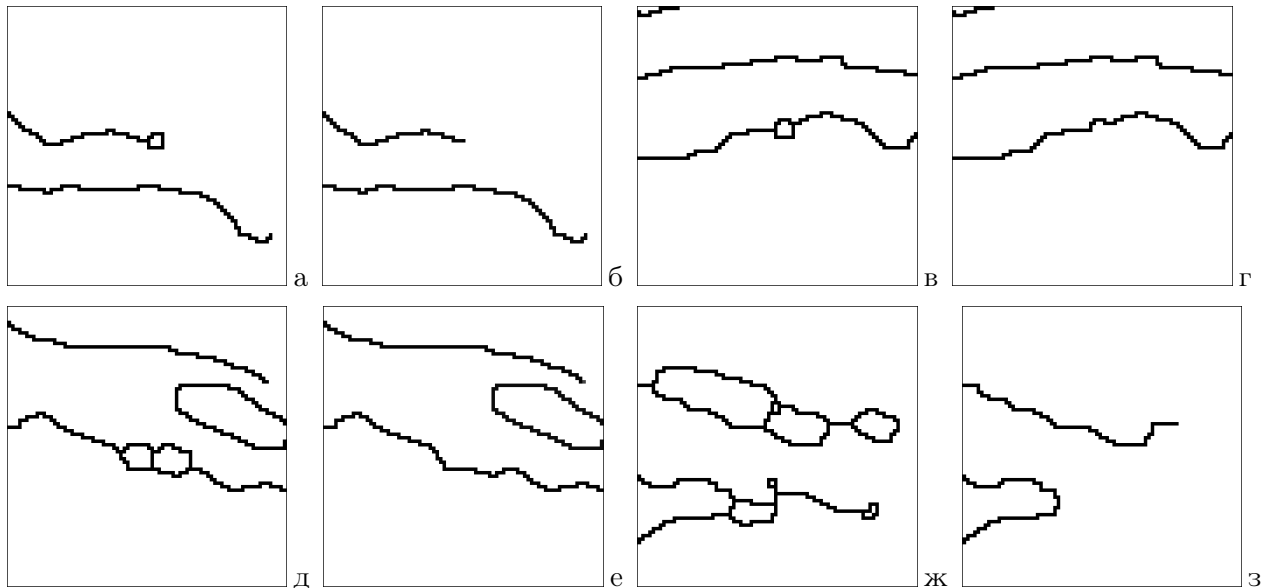


Рис. 5. Примеры некоторых дефектов линий: концевая петля (а), внутриконтурная петля (в), соединение вида Θ (д), дефект сложного вида (ж); результаты корректировки (б),(г),(е),(з).

На Рис. 6,а представлен результат корректировки карты линий и перевода линий в незамкнутый вид без ветвлений. Здесь следует отметить, что формируемые линии границ не всегда могут оказаться корректными. Так, при дальнейшем анализе изображения, взятого нами в качестве примера, мажоритарным будет выбран капилляр, окруженный не двумя, как того требует сформулированная выше постановка задачи (т.е. согласно которой необходимо отыскание двух линий границ капилляра — внутренней и внешней), а лишь одной завитой линией. Данный этап не позволяет обнаружить и откорректировать подобный дефект. Для этого требуется морфологический анализ линий, рассматриваемый в последнем разделе настоящей работы.

4. ВЫБОР МАЖОРИТАРНОГО КАПИЛЛЯРА

Под мажоритарным понимается капилляр, являющийся наиболее выраженным на изображении и подходящим для последующего анализа параметров кровотока.

4.1. Упрощение карты линий и карты областей

Данный этап является вспомогательным. Его цель — сокращение числа линий и областей путем стирания оставшихся мелких линий, а также тех линий и небольших областей, которые расположены далеко от областей наибольшей площади. Для этого на основе сопоставления текущей карты линий и карты областей, полученной в разделе 2, подсчитываются попарные расстояния между областями и контурными линиями, на основе чего строится матрица дальностей, каждый элемент которой равен минимальному расстоянию между элементами соответствующих области и линии.

Сформированная матрица дальностей анализируется. Контурные линии, отстоящие от ближайшей области, а также области, отстоящие от ближайшей контурной линии на расстояние большее, чем заданный диаметр капилляра D , удаляются. Также удаляются области, площадь которых не превышает D^2 и размеры контуров которых не превышают значения $4D$.

4.2. Выбор мажоритарного капилляра и удаление лишних областей и контуров

При выборе мажоритарного капилляра, отображаемого совокупностью соответствующих ему областей и контурных линий, принимались во внимание следующие критерии:

- область должна быть наибольшей (или одной из наибольших) по размеру;
- область должна иметь вытянутую форму;
- должно быть 2 контурных линии, соседних (касающихся) выбираемой области; случаи обнаружения 1 или 3 линий в принципе допустимы, но менее предпочтительны;
- сумма длин этих контурных линий должна быть близка величине периметра области;
- приоритет расположения капилляра — ближе к центру изображения.

Определение показателя области. Для каждой из областей $r, r = 1, \dots, R$ вычисляется функционал следующего вида:

$$F(r) = S(r)E(r)N(r)D(r)L(r). \quad (4)$$

Здесь r — номер области, $F(r)$ — результирующее значение функционала, а параметры $S(r)$, $E(r)$, $N(r)$, $D(r)$, $L(r)$ для каждой из областей определяются следующим образом.

$S(r)$ — площадь области (число содержащихся в ней пикселей).

$E(r)$ — параметр вытянутости области: $E(r) = \lg(P(r)/\sqrt{S(r)} + 1)$, где $P(r)$ — периметр области r .

$N(r)$ — параметр числа соседних контурных линий n : $N(r) = 1/(\lg(i + 2) + 1)$, где $i = n$, если $n \geq 2$, иначе $i = 1 - n$; оптимум достигается при $n = 2$.

$D(r)$ — параметр соотношения периметра области $P(r)$ и суммы длин соседних контуров C_{len} : если $P(r) < C_{len}$, то $D(r) = P(r)/C_{len}$; иначе $D(r) = C_{len}/P(r)$.

$L(r)$ — показатель расположения области вдали от краев изображения: равен 1, если центр области r расположен от края изображения далее, чем $1/3$ размера изображения, и спадает до 0 к краю изображения.

Удаление лишних областей и контуров. Область r , на которой достигается максимум функционала $F(r)$, считается мажоритарной. Удаляются все остальные области, а также контурные линии, не являющиеся соседями мажоритарной области. На Рис. 6,б показаны область (серым

цветом) и контурная линия (черным), соответствующие мажоритарному капилляру согласно выбранному критерию.

Как видно, в качестве мажоритарного выбран капилляр, окруженный всего одной контурной линией. Данный дефект требует устранения. Морфологический анализ и корректировка подобных дефектов контурных линий рассматриваются в следующем разделе.

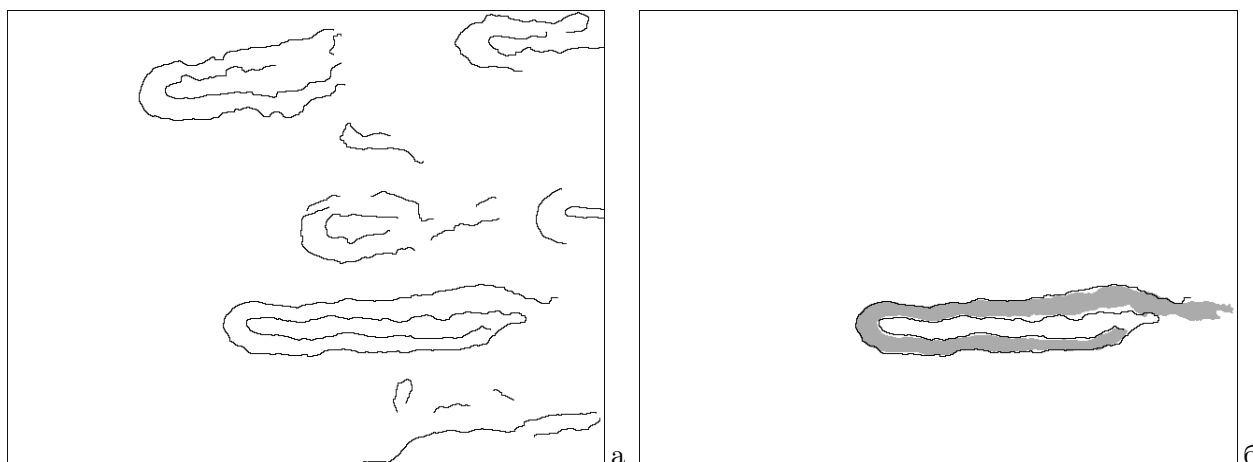


Рис. 6. Результаты корректировки карты линий (а); Область и контурная линия мажоритарного капилляра (б).

5. МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И КОРРЕКТИРОВКА КОНТУРНЫХ ЛИНИЙ

5.1. Векторное представление контурных линий

На данном этапе мы переходим к анализу формы полученных контурных линий. Подходящим способом может являться описание линии в виде последовательности векторов. Для этого требуется трансформация растрового представления линий в векторное. Такое преобразование выполняется в два шага. На первом шаге осуществляется составление последовательности точек линии начиная с одного из ее концов, а на втором линия приближается последовательностью векторов.

Последовательность точек линии L представляет собой упорядоченный набор ее элементов $p(z) \in L, (z = 1, \dots, Z)$, где Z — общее число элементов (длина) линии L . Одновременно каждый элемент $p(z)$ однозначно отображается в некоторую точку (пиксель) $x(m(z), n(z))$ изображения с соответствующими координатами $m(z)$ и $n(z)$; поэтому допустимо ставить тождество между любым из элементов линии и соответствующим ему пикселем изображения. Согласно способу формирования контурных линий (раздел 3.1), любые соседние элементы линии $p(z)$ и $p(z + 1)$ будут находиться в 4-смежном соседстве пикселей [6].

Выберем подмножество \hat{L} последовательности точек контурной линии L , состоящее из элементов $q(\hat{z}) \in \hat{L}$, взятых с шагом d : $q(\hat{z}) = p(z \times d), (\hat{z} = 1, \dots, \hat{Z})$, где $\hat{Z} = Z/d$. Проведем векторы $\mathbf{V}(i), (i = 1, \dots, \hat{Z} - 1)$ между парами соседних точек $q(i)$ и $q(i + 1)$: $\mathbf{V}_i = \overrightarrow{q(i)q(i + 1)}$. Обозначим через $\gamma(i), (i = 1, \dots, \hat{Z} - 2)$ угол между векторами $\mathbf{V}(i)$ и $\mathbf{V}(i + 1)$, а через $\beta(i)$ — величину накопленного угла: $\beta(i) = \sum_{j=1}^i \gamma(j)$. Будем называть *морфологической характеристикой контурной линии* последовательность значений $\alpha(i), (i = 1, \dots, \hat{Z} - 2)$ таких, что

$$\alpha(i) = \beta(i) - \sum_{z=1}^{\hat{Z}-2} \beta(z)/(\hat{Z} - 2), \tag{5}$$

Анализ морфологических характеристик контурных линий позволяет делать выводы о форме капилляра.

5.2. Анализ морфологической характеристики контурной линии

Определенная таким способом морфологическая характеристика $\alpha(i)$ может являться источником для анализа характера изменения контурной линии. Рассмотрим этот вопрос на примере морфологической характеристики ранее полученной контурной линии мажоритарного капилляра (см. Рис. 6,б). График данной функции показан на Рис. 7; по горизонтали отложен номер i точки подмножества \hat{L} , а по вертикали — значение $\alpha(i)$ в градусах.

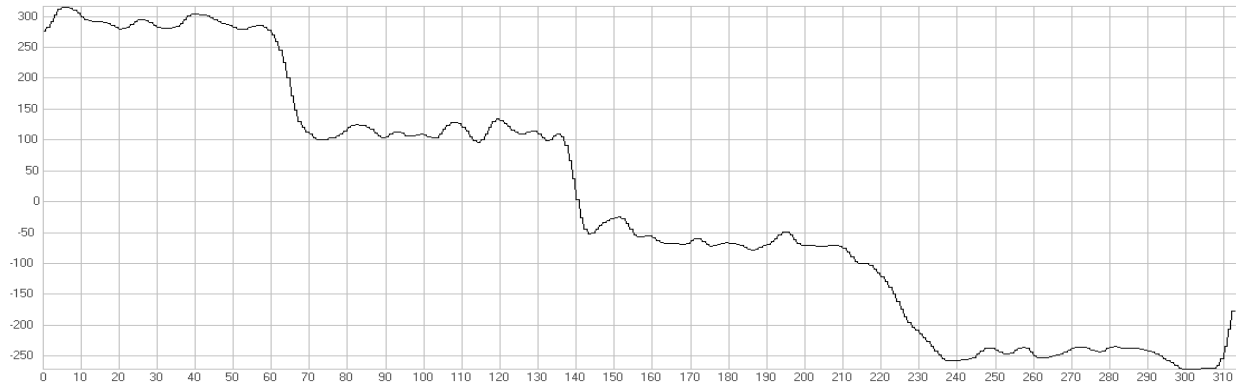


Рис. 7. Морфологическая характеристика контурной линии на Рис. 6,б.

Как легко видеть, график содержит четыре приблизительно горизонтальных участка (0 – 60, 70 – 135, 145 – 210 и 240 – 310), разделенных ступенчатыми переходными областями различной крутизны. Примечательно, что значения на каждом из горизонтальных участков отличаются от значений на соседнем участке приблизительно на 180° . Интерпретировать данные особенности несложно. Горизонтальные участки графика соответствуют длинным прямым участкам контурной линии, которые между собой почти параллельны (ограничивающие артериальный и венозный отделы капилляра), а переходные области между ними — участкам поворота линии (переходный отдел капилляра). Из того факта, что знак производной на всех ступенчатых переходах один и тот же, можно сделать вывод, что кривая имеет вид завитой.

Очевидно, что морфологическая характеристика идеальной контурной линии должна содержать два горизонтальных и один переходный участок. На основе этого можно сделать заключение, что кривая на Рис. 7 есть последовательное объединение характеристик двух контурных линий, соединенных участком поворота при значениях $i \approx 140$. Если удалить из контурной линии участок, соответствующем данной области морфологической характеристики, получим две самостоятельных контурных линии, корректно описывающие внутреннюю и внешнюю контурные линии капилляра. Результат представлен на Рис. 8. Можно сформулировать следующий алгоритм корректировки контурной линии.

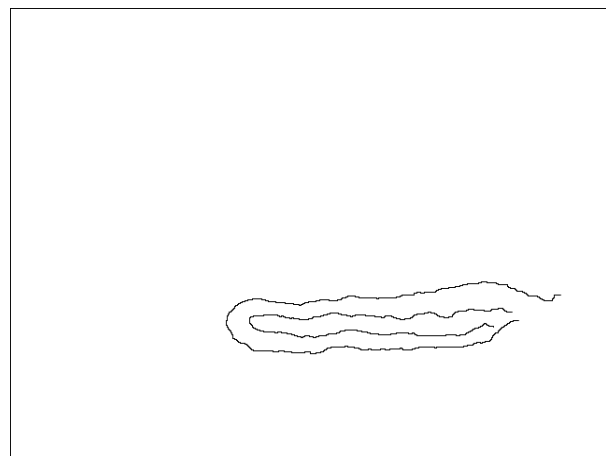


Рис. 8. Вид контурных линий после удаления среднего переходного участка.

Алгоритм анализа и корректировки морфологической характеристики контурной линии состоит в следующем.

1. В последовательности значений $\alpha(i)$ отыскиваются переходные области TR как участки высокой крутизны, на которых значений $\alpha(i)$ меняется почти на 180° : $TR(k)$, ($k = 1, \dots, K$). Здесь K — общее число обнаруженных переходных областей. Определяются также координаты начала и конца переходной области.
2. Проверяется найденное значение K . Если $K = 1$, то значит рассматриваемая контурная линия соответствует модели внешнего или внутреннего контура капилляра и может осуществляться переход к следующей линии или окончанию процедуры анализа.
3. Случай $K = 2$ означает, что контурная линия имеет дополнительный поворот контура. Как правило, причина его возникновения состоит в том, что при первичном формировании контуров происходит захват края видимой области капилляра. Такой поворот обычно располагается на одном из концов контурной линии. В этом случае выбирается переходная область $TR(k)$, расположенная ближе к одному из концов контурной линии, и соответствующий участок контура удаляется или исключается из рассмотрения.
4. Случай $K = 3$ означает ситуацию объединения контурных линий, один из возможных вариантов которой проиллюстрирован на Рис. 6,б. Причина ее появления — один из краев видимой области капилляра оказывается сравнительно четким и при первичном формировании контуров происходит замыкание внутренней и внешней контурных линий капилляра. Удаление участка контура, соответствующего средней переходной области $TR(2)$, приводит картину контуров в корректное состояние (Рис. 8). Поскольку в такой ситуации происходит изменение общего набора контурных линий, то требуется пересчет морфологических характеристик образованных линий (необходим возврат к п. 5.1).
5. Если $K = 0$, то значит анализируемая контурная линия не соответствует принятой модели, т.е. контуры капилляра не были правильно обнаружены в анализируемой видеопоследовательности. В такой ситуации требуются какие-то кардинальные действия, например, повторное сканирование объекта и формирование новой видеопоследовательности.

5.3. Корректировка расположения контурных линий

Как уже говорилось выше, корректная контурная линия состоит из двух почти параллельных участков и участка поворота между ними — переходной области. Тем самым можно сделать заключение, что с точностью до поворота контурная линия повторяет форму буквы U (т.е. имеет U-форму). Также напомним, что карта контурных линий включает две контурные линии мажоритарного капилляра — внутреннюю и внешнюю. Будем считать каноническим расположение, при котором первой является внутренняя, а второй — внешняя линия, причем последовательность точек каждой из контурных линий в свою очередь упорядочена так, что начало последовательности находится в левой верхней точке U-формы.

Могут быть предложены различные способы корректировки расположения контурных линий. Однако можно воспользоваться данными, полученными на предыдущих этапах. Рассмотрим вопрос приведения линий в каноническое расположение на основе использования уже вычисленных морфологических характеристик. После обработки согласно алгоритму в п. 5.2, к данному моменту каждая из двух оставшихся контурных линий имеет лишь одну переходную область; известны также координаты начала TR_{beg} и конца TR_{end} переходной области каждой из линий. Введем параметр крутизны перехода:

$$G = (\alpha(TR_{end}) - \alpha(TR_{beg})) / (TR_{end} - TR_{beg}). \quad (6)$$

Обратим внимание, что абсолютная величина G обратно пропорциональна радиусу закругления переходной области.

Если значение $G > 0$, то контурная линия ориентирована правильно и может быть оставлена без изменения. Если $G < 0$, то линия является обратно ориентированной и последовательность точек должна быть зеркально перевернута. Также соответствующим образом должны быть пересчитаны значения $\alpha(i)$, TR_{beg} и TR_{end} .

Очевидно, что внешняя контурная линия капилляра является огибающей по отношению к внутренней линии, соответственно радиус закругления переходной области внешней линии будет больше, чем радиус закругления переходной области внутренней линии. На основании этого достаточно сравнить абсолютные значения G_1 и G_2 для двух контурных линий. Если $|G_1| > |G_2|$, то первая линия — внутренняя и расположение является каноническим. Если же $|G_1| < |G_2|$, то необходимо переставить местами линии вместе со своими морфологическими характеристиками. Полученные в результате таких преобразований графики морфологических характеристик внутренней и внешней контурных линий представлены на Рис. 9.

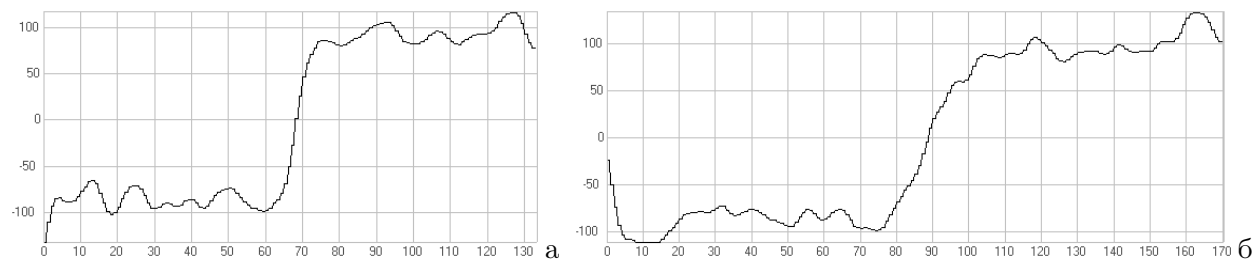


Рис. 9. Морфологические характеристики внутренней (а) и внешней (б) контурных линий.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены алгоритмы анализа усредненных изображений, получаемых обработкой формируемых капилляроскопом видеопоследовательностей. Рассмотрены алгоритмы нахождения на изображении мажоритарного капилляра и его контурных линий, преобразования их в векторную форму, способ морфологического анализа контурных линий.

Получаемые результаты могут быть использованы для определения ряда параметров капилляра, например, размеров областей капилляра или изменения его диаметра на протяжении видимого участка, позволяют делать выводы о форме капилляра. Формирование векторного представления контурных линий дает возможность осуществлять пластическое изменение формы области, расположенной между контурами. Обратное отображение такой области на видеопоследовательность позволит проводить анализ динамики кровотока, в частности, скорость и объем протекающей крови. Это является целью дальнейшего продолжения исследований. Возможны и другие направления анализа и извлечения необходимых данных, требуемых врачу-диагносту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Компьютерная капилляроскопия*. <http://www.ckb-rzd.ru/php/content.php?id=1621>.
2. Гурфинкель Ю.И., Каце Н.В., Макеева О.В., Михайлов В.М. Возможности использования неинвазивной компьютерной капилляроскопии в космической медицине и в клинической практике. В кн.: *Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии*. Вып. 2. М.: Университет, 2010, с. 111–121.
3. *Капилляроскоп общеклинического применения „Капилляроскан-1“*. <http://www.aetechnologies.ru/production/2-details.htm>.
4. *Разработка серии капилляроскопов*. <http://www.aetechnologies.ru/dev/6-details.htm>.
5. Чочиа П.А. Предварительная обработка видеопоследовательностей, формируемых капилляроскопом. *Информационные процессы*. 2011, Т. 11, № 1, с. 76–85.

6. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений (3-е изд.)*. М.: Техносфера, 2012.
7. Sanny J. A Computational Approach for Edge Detection. *IEEE Trans. PAMI*. 1986, vol. 8, no. 6, pp. 679–698.
8. Лучко Д.В., Иванушкина Н.Г. Количественный анализ в коронарной ангиографии: алгоритм автоматизированного определения диаметра сосудов. *Электроника и связь*. 2009, № 2–3, Киев, с. 161–165.
9. Чочиа П.А. Методы преобразования изображений, использующие двухмасштабную модель. В кн.: *Кодирование и обработка изображений*. М.: Наука, 1988, с. 98–112.
10. Chochia P.A. Image Enhancement Using Sliding Histograms. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1988, vol. 44, no. 2, pp. 211–229.
11. Zhang T. Y., Suen C. Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. *Comm. ACM*, 1984, vol. 27, no. 3, pp. 236–239.

Статью представил к публикации член редколлегии В. И. Венед

Detection of capillary vessels in images, captured by capillaroscope

Chochia P. A.

Detection of capillary vessels in images, obtained from capillaroscope video series, is considered. The questions of capillary contour map forming and filtering are studied. Syntactic contour analysis, selection of major capillary vessel, and creation of contour morphology characteristics for posterior description and analysis are researched.

KEYWORDS: image processing, contour detection, contour morphology, capillaroscopy.