

Анализ результатов оконтуривания левого желудочка сердца на эхографических изображениях у здоровых пациентов с помощью автоматического алгоритма*

В. В. Зюзин¹, С. В. Поршнева¹, А. О. Бобкова¹, А. А. Мухтаров¹, В. В. Бобков²
zvuzuzin@gmail.com

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

²Медицинские информационные технологии, Верхняя Пышма

Приведены результаты, подтверждающие работоспособность автоматического оконтуривания левого желудочка (ЛЖ) на эхографическом изображении апикальной четырехкамерной проекции сердца человека. Описан алгоритм автоматического оконтуривания ЛЖ. Продемонстрирована работоспособность алгоритма для пациентов без патологий сердечной мышцы. Исследованы качества оконтуривания. Предложен критерий по определению контуров неправильной формы. Определены направления дальнейших исследований для улучшения качества оконтуривания.

Ключевые слова: оконтуривание; левый желудочек; детектирование объектов; эхокардиография; УЗИ-изображения

The analysis of results of the left ventricle contouring using automatic algorithm on ultrasound images*

V. V. Zyuzin¹, S. V. Porshnev¹, A. O. Bobkova¹, A. A. Mukhtarov¹, and V. V. Bobkov²

¹Ural Federal University named after First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Medical Information Technologies, Verhnjaja Pyshma, Russia

The features of automatic contouring of the left ventricle (LV) on echographic sequences are discussed. The automatic algorithm contouring of the LV of the heart on frames, which contain the image of the apical four-chamber projection of the human heart, is proposed. The algorithm is based on the LV area selection using morphological operations; finding the points of attachment of the mitral valve to the heart muscle (the point of the LV base); building of signature LV of the heart in a polar coordinate system centered at the midpoint of the segment connecting points of the LV base; using of the piecewise polynomial approximation of the signature built in a polar coordinate system; calculation of the coordinates of the contour points in the coordinate system of the source frame ultrasound image of a contour by converting the signature from the polar to the Cartesian coordinate system. The quality assessment of automatic contouring is obtained with comparison of expert contours and automatically generated contours. It is shown that using parameters such as precision and recall traditionally used in assessing, the quality of information search, when comparing expert and automatically generated contours, cannot obtain adequate from the physical point of view assessments of the quality of the automated algorithm. The study results in the kinematics of the mass center of the LV region of the heart, which allowed to propose a criterion for the automatic evaluation of

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках госконтракта № 11475p/20975.

the proper construction of an LV contour on separate frames of the video sequence. Identified areas for further research are aimed at improving the quality of contouring.

Keywords: *contouring; left ventricle; detecting objects; echocardiography; ultrasound images*

1 Введение

Полуавтоматический алгоритм оконтуривания ЛЖ на эхографических изображениях, пример которого представлен на рис. 1, описан в [1]. Затем данный алгоритм был дополнен методом автоматического определения точек основания контура ЛЖ [2], а также методом построения сплаженных границ ЛЖ, основанном на аппроксимации сигнатуры контура тремя полиномами 3-го порядка [3]. Анализ результатов полуавтоматического оконтуривания ЛЖ показал, что необходимым условием, обеспечивающим построение адекватного контура ЛЖ на эхографическом изображении, является правильность нахождения точек основания контура — ключевых точек. При выполнении данного условия на ультразвуковых (УЗ) изображениях пациентов, не имеющих серьезных патологий, удается построить границы, а также обеспечить их гладкость. Полученные результаты позволили сделать обоснованный вывод о работоспособности полуавтоматического алгоритма оконтуривания ЛЖ и возможности его модернизации с целью создания полностью автоматического алгоритма оконтуривания.

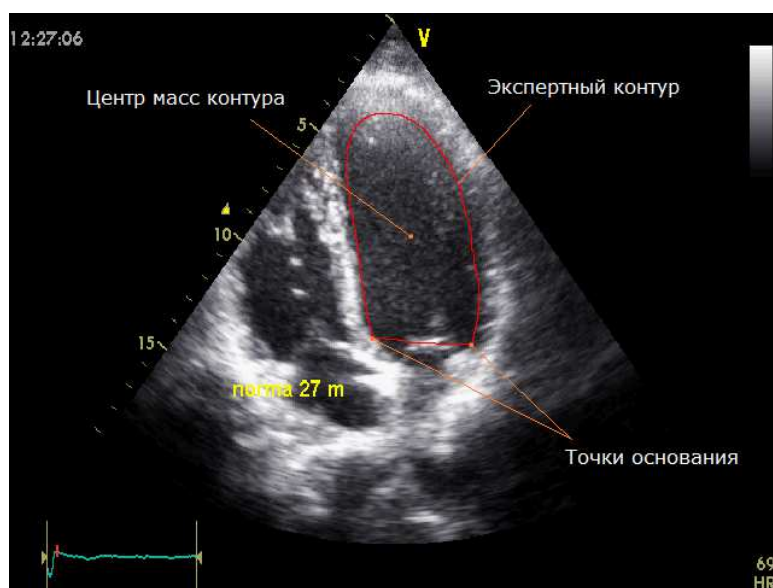


Рис. 1 Исходный УЗ-кадр апикальной четырехкамерной проекции

В статье обсуждаются результаты разработки автоматического алгоритма оконтуривания ЛЖ на УЗ-изображениях.

2 Алгоритмы оконтуривания левого желудочка на ультразвуковых изображениях

Полуавтоматический алгоритм оконтуривания ЛЖ на эхографических изображениях описан в [1]. Данный алгоритм предусматривает предварительную обработку изображения, которая состоит в удалении спекл-шумов и выделении артефактов внутри области ЛЖ методом, описанным в [4], и их удалении.

В данном алгоритме на первом этапе эксперт наносит прямоугольную область, в которой находится область ЛЖ. Соответственно, при обработке видеопоследовательности приходится на каждом кадре указывать данную область. В этой ситуации понятно, что процесс обработки большого количества данных является трудоемким процессом, а потому разработка автоматического алгоритма обработки УЗ-видеопоследовательностей является актуальной.

Далее обсуждаемый алгоритм был модифицирован до автоматического определения контура ЛЖ. Модифицированный алгоритм реализуется следующей последовательностью действий:

1. Преобразование исходного кадра в полутоновое изображение путем вычисления взвешенной суммы каждой компоненты пространства RGB :

$$I = 0,2989R + 0,5870G + 0,1140B,$$

где R, G, B — яркостные компоненты интенсивности красного, зеленого и синего цветов соответственно.

2. Приведение исходного кадра к размеру 480×640 пикселей с использованием кубической интерполяции.
3. Двухпороговая сегментация изображения по параметру интенсивности изображения I , в которой значения порогов сегментации были подобраны эмпирически. Нижний порог оказался равным 18, верхний порог — 90. Пример преобразования изображения при использовании двухпороговой сегментации представлен на рис. 2.
4. Морфологическая обработка изображения, позволяющая разделить соприкасающиеся области и сгладить контуры объектов, в которой в качестве структурирующего элемента используется диск с радиусом 6 пикселей (операция морфологического открытия). Пример изображения, полученного в результате применения операции морфологического открытия, приведен на рис. 3.
5. Преобразование изображения в бинарное представление.
6. Определение центров масс (ЦМ) отдельных областей на изображении (рис. 4).
7. Определение области ЛЖ на бинарном изображении. Условием для выбора искомой области ЛЖ является выбор ЦМ области с наименьшим расстоянием до точки



Рис. 2 Результат сегментации изображения по двум порогам

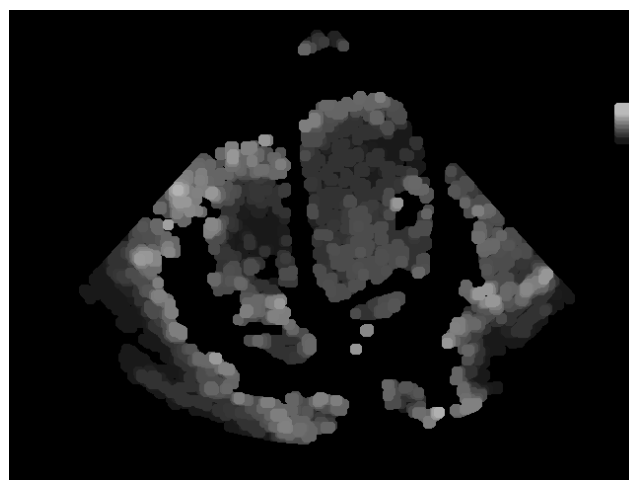


Рис. 3 Результат применения операции морфологического открытия изображения

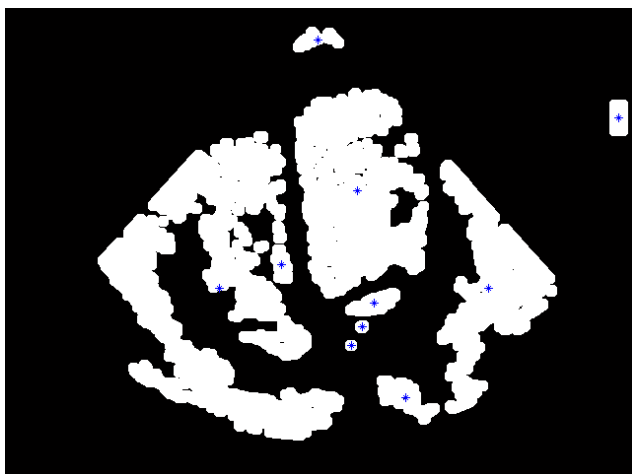


Рис. 4 Результат сегментации изображения по двум порогам



Рис. 5 Результат применения операции морфологического открытия изображения

(340, 176) среднего значения координат ЦМ экспертных контуров, вычисленных по видеопоследовательностям УЗ-изображений сердечной мышцы 18 пациентов, не имеющих патологий. Общее число экспертных контуров равнялось 360.

8. Морфологическая операция закрытия со структурирующим элементом «диск» с радиусом 10 пикселей (рис. 5).

Результатом выполнения вышеизложенного алгоритма является бинарное изображение с областью ЛЖ (см. рис. 5). Из рис. 5 видно, что границы контура, в отличие от экспертных контуров, оказываются негладкими. В этой связи необходимо использование дополнительной процедуры сглаживания границы контура, описанной в [3]. Здесь координаты пикселей бинарного изображения, соответствующие границам полости ЛЖ, преобразуются из декартовых в полярную систему координат, начало которой находится в центре основания ЛЖ. Алгоритм поиска точек основания ЛЖ на эхографическом кадре подробно описан в [2]. Данный алгоритм основан на выделении и классификации ярких областей кадра, соответствующих сердечным тканям, их классификации, целью которой является нахождение областей, соответствующих левой стенке сердца, перегородке, правой стенке, клапану ЛЖ (между перегородкой и правой стенкой), и использовании того медицинского факта, что основанием ЛЖ можно считать отрезок, вершины которого являются точками крепления клапана к стенкам сердца. Зависимость $\rho_i = \rho(\Theta_i)$, где i — номер пикселя, полости ЛЖ называют сигнатурой изображения. Пример сигнатур контура, построенного экспертом, контура, построенного по бинарному изображению ЛЖ, и результаты его аппроксимации тремя различными полиномами 3-го порядка представлены на рис. 6. Из рис. 6 видно, что сигнатура контура ЛЖ, построенного автоматическим алгоритмом, оказывается близкой к сигнатуре экспертного контура.

Далее было проведено сравнение результатов автоматического оконтуривания ЛЖ с соответствующими контурами, построенными экспертами, результаты которого изложены в следующем разделе.

3 Исследование качества оконтуривания левого желудочка автоматизированным алгоритмом

В проведенных исследованиях использовались УЗ-изображения 18 пациентов, которые были отнесены специалистами к категории здоровых людей. Для каждого пациента из

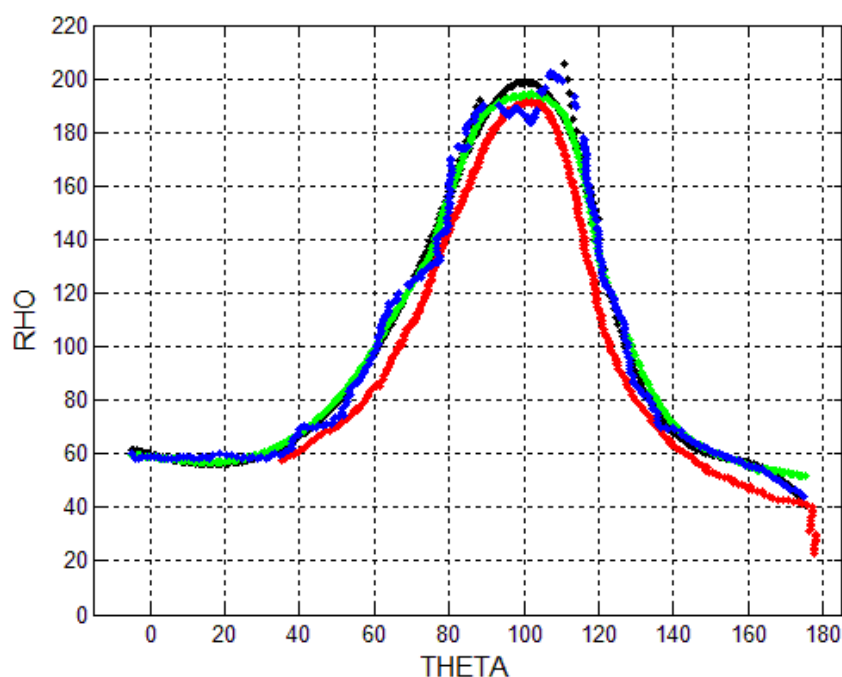


Рис. 6 Результат построения сигнатуры контура: красные точки — сигнатура экспертного контура; синие точки — границы ЛЖ, полученные из бинарного изображения; черные точки — аппроксимирующие кривые границ ЛЖ; зеленые точки — скользящее сглаживание аппроксимирующих кривых

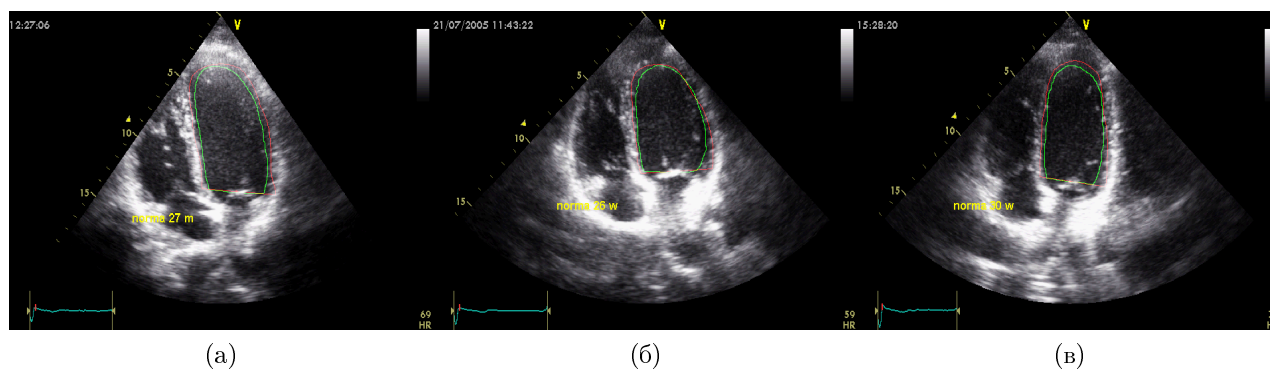


Рис. 7 Ультразвуковые изображения сердца с удовлетворительно построенными контурами: зеленый — экспертный контур; красный — контур, построенный с помощью алгоритма

всей видеозаписи использовались 20 кадров, которые соответствовали полному сердечному циклу. На каждом кадре в автоматическом режиме строился контур ЛЖ. Общее число кадров составило 360. (Примеры правильных и неправильных контуров, построенных с помощью автоматического алгоритма, представлены на рис. 7 и 8.)

Каждый контур ЛЖ, построенный с помощью автоматического алгоритма, сравнивался с экспертным контуром. Для этого использовались следующие количественные показатели:

- точность (Precision) — отношение области пересечения контуров и области, полученной автоматическим алгоритмом;

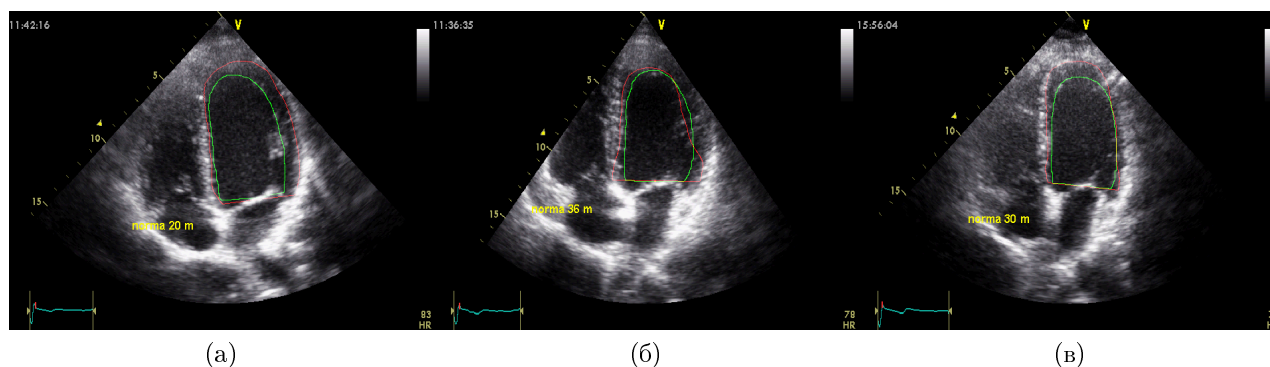


Рис. 8 Ультразвуковые изображения сердца с неудовлетворительно построенными контурами: зеленый — экспертный контур; красный — контур, построенный с помощью алгоритма

— полнота (Recall) — отношение области пересечения контуров и области экспертного контура.

Визуальный анализ контуров ЛЖ, проведенных экспертами, показал, что из 360 контуров только у 195 контуров форма оказалась правильной. В этом случае средние значения количественных показателей оказались следующими:

$$\text{Precision} = 0,946 \pm 0,037;$$

$$\text{Recall} = 0,816 \pm 0,031.$$

В случае неправильной формы показатели следующие:

$$\text{Precision} = 0,672 \pm 0,050;$$

$$\text{Recall} = 0,416 \pm 0,121.$$

Однако для использования данных характеристик на практике необходимо наличие экспертных контуров. В этой связи были проведены исследования свойств ЦМ экспертных контуров, обсуждаемых далее в статье.

Таким образом, оказывается, что полнота построения для удовлетворительно построенных контуров была выше 0,8, а точность построения — выше 0,9. Примеры УЗ-изображений апикальной четырехкамерной проекции сердца с экспертным и удовлетворительно построенным автоматическим контуром ЛЖ представлены на рис. 7. Из рис. 7 видно, что границы автоматически построенного контура оказываются достаточно близкими к экспертному контуру.

Примеры УЗ-изображений апикальной четырехкамерной проекции сердца с экспертным и неудовлетворительно построенным автоматическим контуром ЛЖ представлены на рис. 8.

На рис. 8, а форма экспертного контура соответствует автоматически построенному контуру, однако правая граница контура построена неверно, что обусловлено наличием неконтрастных тканей. На рис. 8, б форма правой границы построена неверно из-за наличия артефактов внутри области. На рис. 8, в вершина контура построена неверно.

Таким образом, полнота и точность не дают точной оценки правильности построения контура ЛЖ. В качестве дополнительного критерия правильности построения контура авторами было предложено использовать особенности движения ЦМ ЛЖ сердца.

4 Критерий оценки правильности построения контура

Сравнительный анализ экспертного контура ЛЖ, построенного экспертом, и контура, построенного в автоматическом режиме, позволяет сделать вывод, что координаты ЦМ данных контуров значительно отличаются друг от друга. Таким образом, можно предположить, что значения координаты ЦМ контура ЛЖ сердца являются информативным параметром, по которому можно идентифицировать контуры правильной и неправильной формы (рис. 9).

Для проверки данной гипотезы было проведено исследование особенностей движения ЦМ экспертных контуров. Координаты ЦМ экспертных контуров ЛЖ представлены на рис. 10. Из рис. 10 видно, что ЦМ находятся внутри некоторого эллипса.



Рис. 9 Экспертный контур и контур, построенный автоматическим алгоритмом, ЦМ контуров

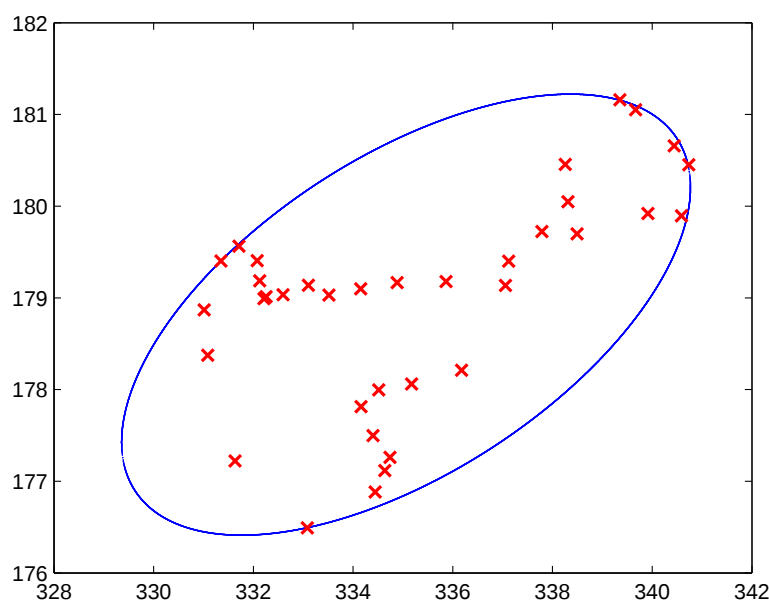


Рис. 10 Центры масс экспертных контуров для одного пациента и эллипс, построенный по точкам ЦМ

Таблица 1 Отношение площади эллипса, охватывающего ЦМ ЛЖ экспертных контуров, к площади экспертного контура ЛЖ в систоле

Пациент	Коэффициент (эксперт)	Коэффициент (автоматический алгоритм)	Пациент	Коэффициент (эксперт)	Коэффициент (автоматический алгоритм)
В	0,0086	0,0424	К	0,0137	0,5185
С	0,0113	0,1180	Л	0,0117	0,0237
Д	0,0168	0,0110	Н	0,0163	0,0349
Е	0,0138	0,0117	О	0,0161	0,0189
Ф	0,0095	0,0136	Р	0,0200	0,0235
Г	0,0143	0,0674	Т	0,0254	0,0205
Н	0,0173	0,0533	У	0,0167	0,0981
И	0,0168	0,0987	Х	0,0193	0,2188

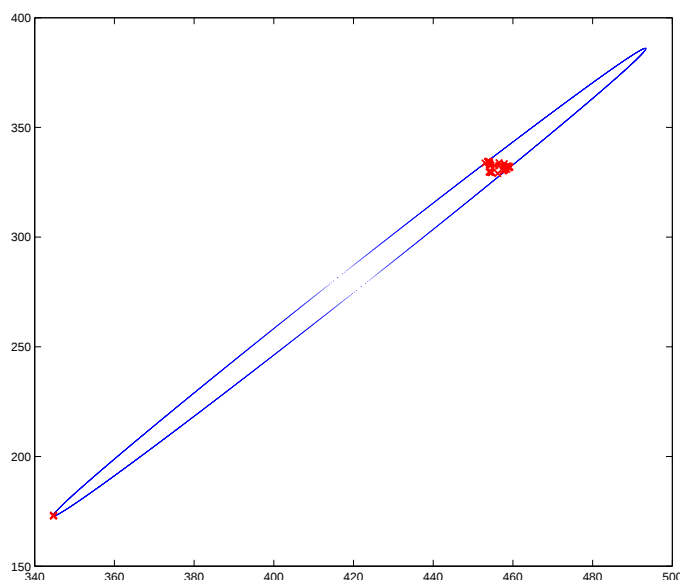


Рис. 11 Расположение ЦМ для пациента с неправильно построенным контуром в видеопоследовательности

Аналогичные результаты были получены для остальных пациентов. Далее для каждого пациента была вычислена площадь эллипсов, которая далее сравнивалась с площадью ЛЖ в систоле. Рассчитанные коэффициенты представлены в табл. 1. Результаты аналогичных вычислений для контуров, построенных автоматически, часть из которых имеет неправильную форму, представлены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что площадь эллипса, охватывающего ЦМ ЛЖ, не превосходит 3% площади ЛЖ в систоле. Из табл. 1 видно, что максимальное значение отношения площади эллипса, охватывающего ЦМ ЛЖ, к площади экспертного контура в систоле составляет 51%. Таким образом, по положению ЦМ можно идентифицировать правильность построенного контура автоматически.

Примеры расположения ЦМ для случая, когда форма одного из контуров неправильна, представлены на рис. 11. Из рис. 11 видно, что ЦМ для контуров с правильной формой

группируются в некоторой области, тогда как ЦМ контуров с неправильной формой располагаются на удаленном расстоянии от области группировки. Таким образом, задача идентификации контуров неправильной формы сводится к задаче выделения кластеров, состоящих из точек, распределенных по двумерной плоскости. Методы решения задачи кластеризации в данной постановке описаны, например, в [5].

5 Заключение

Описан алгоритм автоматического нахождения контура ЛЖ сердца на эхографических видеопоследовательностях и приведены результаты, подтверждающие его работоспособность. Обнаружено, что при наличии на кадре низкоконтрастных областей изображения форма контура может оказаться отличной от формы экспертного контура. Неудовлетворительное качество построения контура связано:

- со спецификой проведения правой границы, обусловленной тем, что реальная граница ЛЖ расположена левее контрастной ткани (это связано с наличием неконтрастной ткани — эндокарда, в этой ситуации для проведения левой границы сердца врачи-кардиологи просматривают эндокард в динамике);
- низким контрастом мышечных тканей относительно области ЛЖ;
- наличием более одного артефакта внутри области ЛЖ.

Представляется целесообразным для увеличения качества работы автоматизированного алгоритма дополнить его возможностью учета динамики движения сердечных тканей, что позволит, с точки зрения авторов, более точно строить правую границу контура ЛЖ.

Литература

- [1] Бобкова А. О., Поршнев С. В., Зюзин В. В., Бобков В. В. Способ полуавтоматического оконтуривания левого желудочка сердца человека на эхографических изображениях // Фундаментальные исследования, 2013. № 8. С. 44–48.
- [2] Бобкова А. О., Поршнев С. В., Зюзин В. В. Опыт поиска точек основания левого желудочка сердца на эхографических изображениях // Физика и технические приложения волновых процессов. Труды междунар. науч.-технич. конф. Екатеринбург, 2012. С. 361–363.
- [3] Бобкова А. О., Поршнев С. В., Зюзин В. В., Бобков В. В. The study of features of expert signature for left ventricle on ultrasound images // 9-я Открытая германо-российская конференция «Pattern Recognition and Image Understanding»: Тр. конф. 2014. С. 274–276.
- [4] Bobkova A. O., Porshnev S. V., Zyuzin V. V., Bobkov V. V. Analysis of methods for removing noise and artifacts on echocardiographic images // 11-я Междунар. конф. «Распознавание образов и анализ изображений – 2013» (РОАИ-11-2013). Самара, 2013. № 2. С. 525–528.
- [5] Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. — Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. 270 с.

References

- [1] Bobkova, A. O., S. V. Porshnev, V. V. Zyuzin, and V. V. Bobkov. 2013. Semiautomatic contouring algorithm of the left ventricle on the echocardiographic images. *Fundamental Research* 8:44–48. (In Russian.)
- [2] Bobkova, A. O., S. V. Porshnev, and V. V. Zyuzin. 2012. The way of finding of left ventricle base points on echocardiographic images. *Physics and Technical Applications of Wave Processes: Conference Proceedings*. Yekaterinburg. 361–363.

- [3] Bobkova, A. O., S. V. Porshnev, V. V. Zyuzin, and V. V. Bobkov. 2014. The study of features of expert signature for left ventricle on ultrasound images. *9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding Proceedings*. Koblenz. 274–276.
- [4] Bobkova, A. O., S. V. Porshnev, V. V. Zyuzin, and V. V. Bobkov. 2013. Analysis of methods for removing noise and artifacts on echocardiographic images. *11th Conference (International) on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies Proceedings*. Samara. 2:525–528.
- [5] Zagoruiko, N. G. 1999. *Applied methods of data and knowledge analysis*. Novosibirsk: Publishing House of Mathematics Institute. 270 p.