

Сегментация КТ снимков и построение расчетных сеток для корня аорты в задаче моделирования реконструкции аортального клапана

Данилов Александр Анатольевич

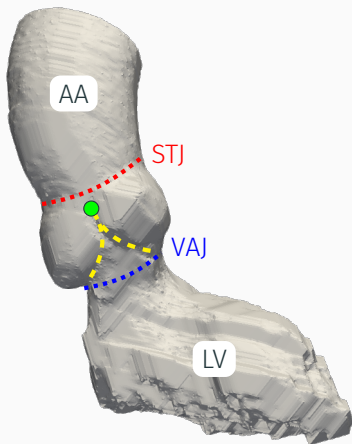
ИВМ РАН, Сеченовский университет, МФТИ

XIII конференция “Математические модели и численные методы в биологии и медицине”

Школа молодых ученых “Математические модели в биомедицине”

Реконструкция аортального клапана

Корень аорты

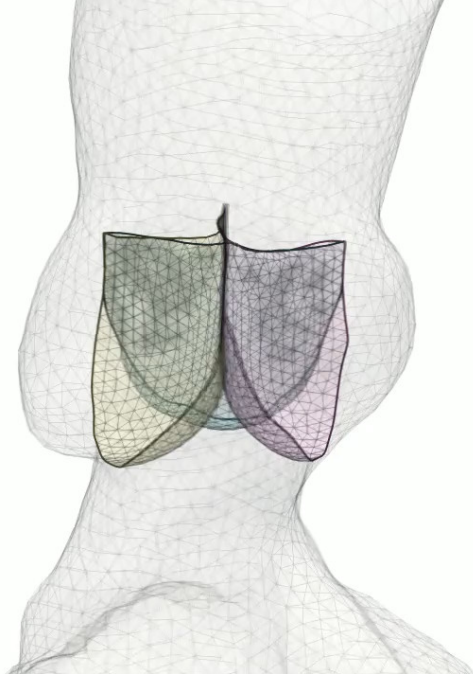


AA Дуга аорты

STJ синотубулярный переход

VAJ вентрикуло-аортальное соединение

LV Левый желудочек

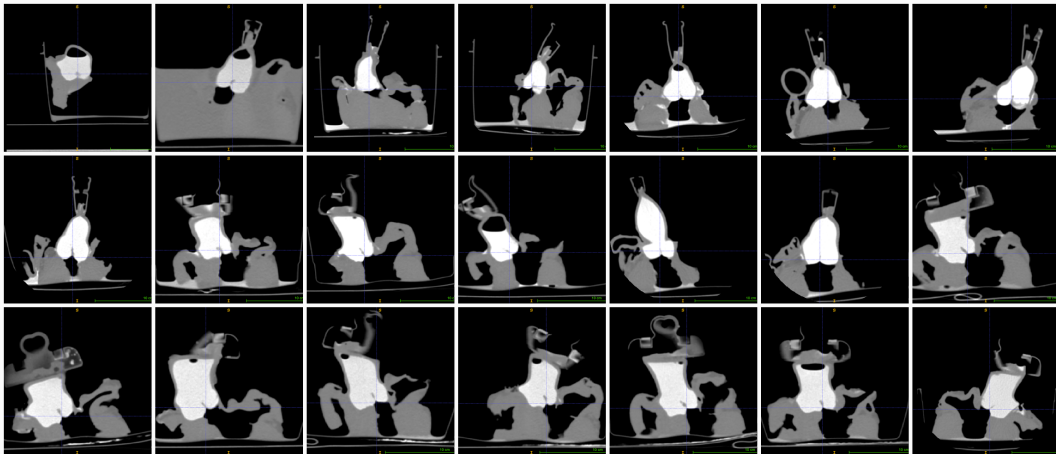


- Натурные эксперименты на образцах свиных сердец
- КТ снимки, измерение размеров створок, измерение зон коаптации
- Построение расчетных сеток для математической модели
- Сравнение результатов модели с экспериментом
- 21 набор снимков КТ

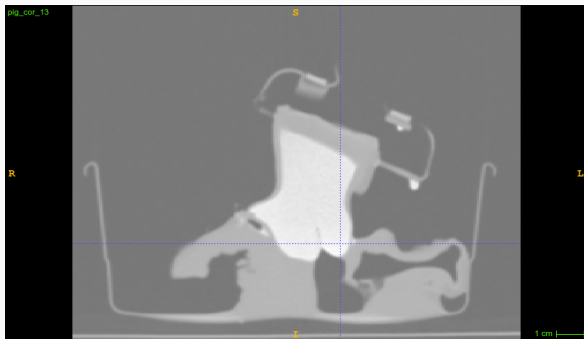
П.А. Каравайкин, А.А. Легкий, В.Ю. Саламатова, Ю.В. Василевский

- Натурные эксперименты на образцах свиных сердец
- КТ снимки, измерение размеров створок, измерение зон коаптации
- Построение расчетных сеток для математической модели
- Сравнение результатов модели с экспериментом
- 21 набор снимков КТ

П.А. Каравайкин, А.А. Легкий, В.Ю. Саламатова, Ю.В. Василевский

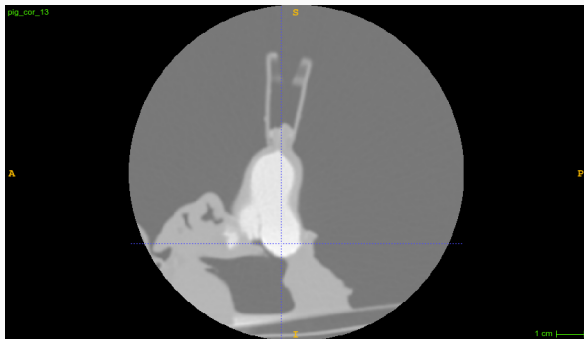


Предобработка КТ снимков



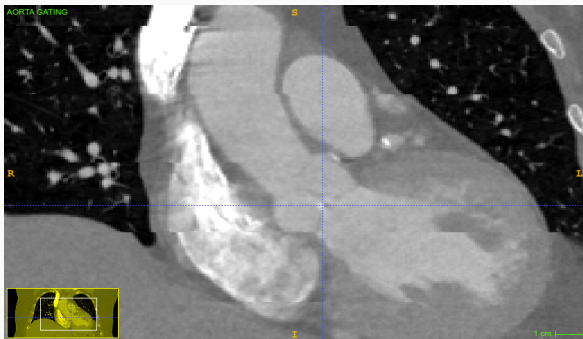
КТ свиного сердца #13

- Контраст только в аорте
- В желудочке – воздух
- Аорта пережата зажимом
- Правая коронарная створка прикрепляется к миокарду, а не к аорте
- Хорошее разрешение без шумов
- Требуется новый алгоритм сегментации



КТ свиного сердца #13

- Контраст только в аорте
- В желудочке – воздух
- Аорта пережата зажимом
- Правая коронарная створка прикрепляется к миокарду, а не к аорте
- Хорошее разрешение без шумов
- Требуется новый алгоритм сегментации

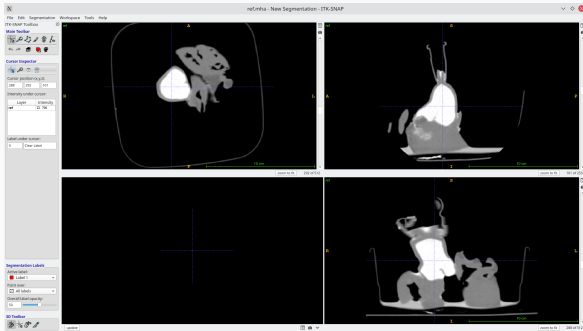


КТ пациента (для сравнения)

- Контраст только в аорте
- В желудочке – воздух
- Аорта пережата зажимом
- Правая коронарная створка прикрепляется к миокарду, а не к аорте
- Хорошее разрешение без шумов
- Требуется новый алгоритм сегментации

- Цель – просегментировать область корня аорты
- Нативные створки можно проигнорировать
- Основная идея: “залить” контрастом желудочек и свести задачу к предыдущей
- Сегментация аорты на свиных образцах работает не очень хорошо
- Модифицированный алгоритм сегментации стал проще и надежнее
- Для коррекции сегментации доступно два пользовательских параметра
- Все этапы выполнены с помощью Convert3D (<https://sf.net/p/c3d>)

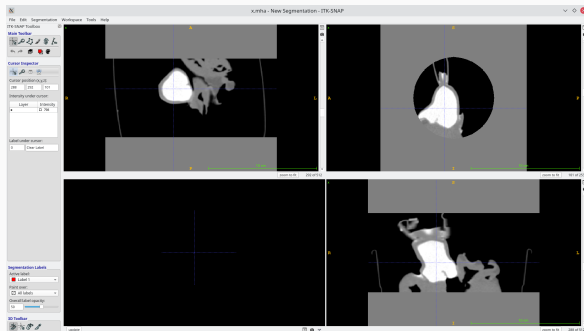
Предобработка КТ снимков – поиск стартовой точки



- Уменьшаем область КТ снимка по краям на 30 мм
- Выделяем зоны с интенсивностью более 200 HU
- Находим самую большую компоненту связности
- Находим ее центр масс

```
c3d ref.mha -as ref \
-thresh -2000 inf 1 0 -sdt -thresh -inf -30 1 0 -push ref -times \
-thresh 200 inf 1 0 -comp -thresh 1 1 1 0 \
-centroid-mark 1 -dilate 1 5x5x5vox \
-type uchar -compress -o start.mha
```

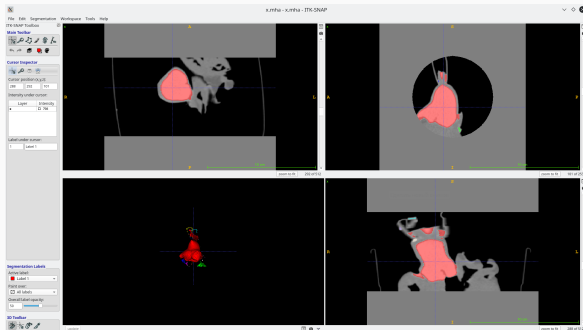
Предобработка КТ снимков – поиск стартовой точки



- Уменьшаем область КТ снимка по краям на 30 мм
- Выделяем зоны с интенсивностью более 200 HU
- Находим самую большую компоненту связности
- Находим ее центр масс

```
c3d ref.mha -as ref \  
-thresh -2000 inf 1 0 -sdt -thresh -inf -30 1 0 -push ref -times \  
-thresh 200 inf 1 0 -comp -thresh 1 1 1 0 \  
-centroid-mark 1 -dilate 1 5x5x5vox \  
-type uchar -compress -o start.mha
```

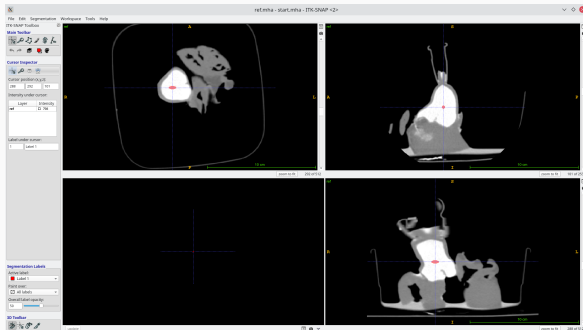
Предобработка КТ снимков – поиск стартовой точки



- Уменьшаем область КТ снимка по краям на 30 мм
- Выделяем зоны с интенсивностью более 200 HU
- Находим самую большую компоненту связности
- Находим ее центр масс

```
c3d ref.mha -as ref \  
-thresh -2000 inf 1 0 -sdt -thresh -inf -30 1 0 -push ref -times \  
-thresh 200 inf 1 0 -comp -thresh 1 1 1 0 \  
-centroid-mark 1 -dilate 1 5x5x5vox \  
-type uchar -compress -o start.mha
```

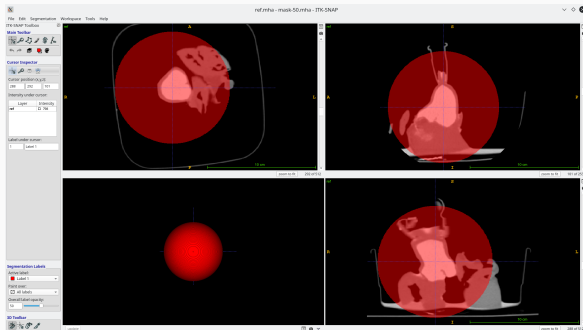
Предобработка КТ снимков – поиск стартовой точки



- Уменьшаем область КТ снимка по краям на 30 мм
- Выделяем зоны с интенсивностью более 200 HU
- Находим самую большую компоненту связности
- Находим ее центр масс

```
c3d ref.mha -as ref \  
-thresh -2000 inf 1 0 -sdt -thresh -inf -30 1 0 -push ref -times \  
-thresh 200 inf 1 0 -comp -thresh 1 1 1 0 \  
-centroid-mark 1 -dilate 1 5x5x5vox \  
-type uchar -compress -o start.mha
```

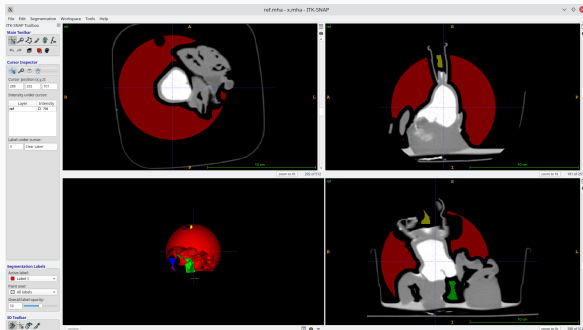

Предобработка КТ снимков – поиск маски для желудочка



- Выделяем зоны с интенсивностью менее -300 HU в шаре с радиусом 50 мм
- Уменьшаем на 3 мм и ищем вторую по размеру компоненту связности
- Применяем функцию erf со сдвигом на 7 мм

```
c3d start.mha -sdt -thresh -inf 50 1 0 -type uchar -compress -o mask.mha
c3d ref.mha -thresh -2000 -300 1 0 mask.mha -times \
-sdt -thresh -inf -3 1 0 -comp -thresh 2 2 1 0 \
-sdt -erf 7 1 \
-compress -o erf.mha
```

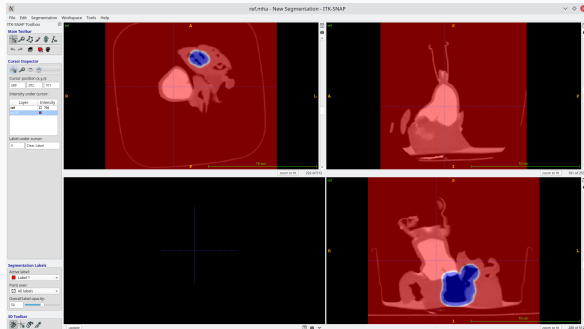
Предобработка КТ снимков – поиск маски для желудочка



- Выделяем зоны с интенсивностью менее -300 HU в шаре с радиусом 50 мм
- Уменьшаем на 3 мм и ищем вторую по размеру компоненту связности
- Применяем функцию erf со сдвигом на 7 мм

```
c3d start.mha -sdt -thresh -inf 50 1 0 -type uchar -compress -o mask.mha
c3d ref.mha -thresh -2000 -300 1 0 mask.mha -times \
-sdt -thresh -inf -3 1 0 -comp -thresh 2 2 1 0 \
-sdt -erf 7 1 \
-compress -o erf.mha
```

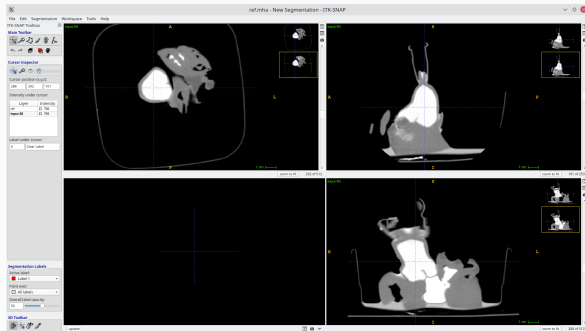
Предобработка КТ снимков – поиск маски для желудочка



- Выделяем зоны с интенсивностью менее -300 HU в шаре с радиусом 50мм
- Уменьшаем на 3 мм и ищем вторую по размеру компоненту связности
- Применяем функцию erf со сдвигом на 7 мм

```
c3d start.mha -sdt -thresh -inf 50 1 0 -type uchar -compress -o mask.mha
c3d ref.mha -thresh -2000 -300 1 0 mask.mha -times \
-sdt -thresh -inf -3 1 0 -comp -thresh 2 2 1 0 \
-sdt -erf 7 1 \
-compress -o erf.mha
```

Предобработка КТ снимков – заливка желудочка

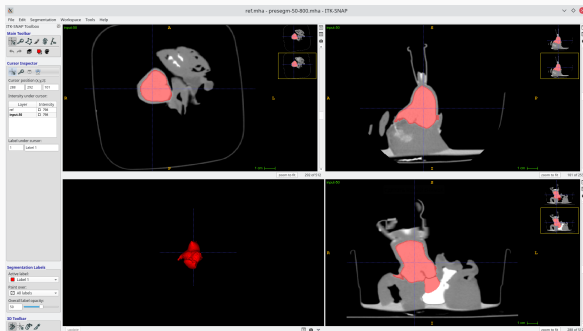


- В зоне желудочка $e = -1$
- В остальной области $e = 1$
- Вычисляем повоксельно $\max(e(\text{ref} - 50) + 50, \text{ref})$

```
c3d ref.mha -as ref erf.mha -as erf \  
-times -push erf -scale -50 -add -shift 50 -push ref -max \  
-type short -noround -compress -o input.mha
```

Сегментация КТ снимков

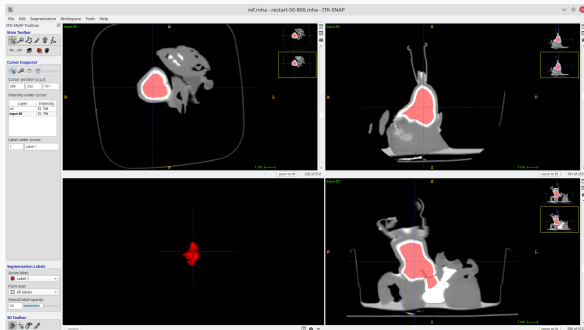
Сегментация КТ снимков – предварительная сегментация



- Используем levelset-метод
 $C_t = (\alpha g_I - \beta \kappa) \mathbf{n}$
- Низкий порог 200 HU,
 $\alpha = 1, \beta = 0.2$
- Количество итераций выбирает пользователь $N_{\text{pre}} = 1000$
- Цель – продвинуть фронт через створки

```
c3d input.mha -erf 200 10 \  
start.mha -replace 0 1 1 -1 \  
-levelset-curvature 0.2 -levelset-advection 1.0 -levelset 1000 \  
-thresh -inf 0 1 0 -type uchar -compress -o presegm.mha  
c3d presegm.mha -sdt -thresh -inf -3 1 0 -dilate 1 2x2x2mm \  
-type uchar -compress -o restart.mha
```

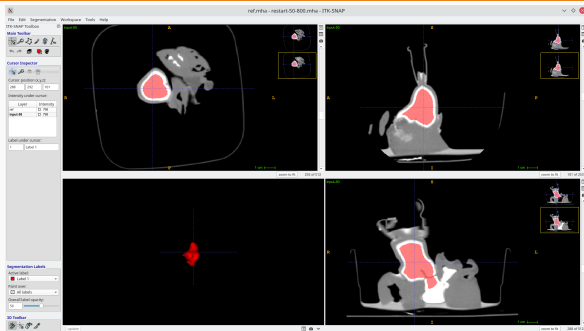
Сегментация КТ снимков – предварительная сегментация



- Используем levelset-метод
$$C_t = (\alpha g_I - \beta \kappa) \mathbf{n}$$
- Низкий порог 200 HU,
 $\alpha = 1, \beta = 0.2$
- Количество итераций выбирает пользователь $N_{\text{pre}} = 1000$
- Цель – продвинуть фронт через створки

```
c3d input.mha -erf 200 10 \  
start.mha -replace 0 1 1 -1 \  
-levelset-curvature 0.2 -levelset-advection 1.0 -levelset 1000 \  
-thresh -inf 0 1 0 -type uchar -compress -o presegm.mha  
c3d presegm.mha -sdt -thresh -inf -3 1 0 -dilate 1 2x2x2mm \  
-type uchar -compress -o restart.mha
```

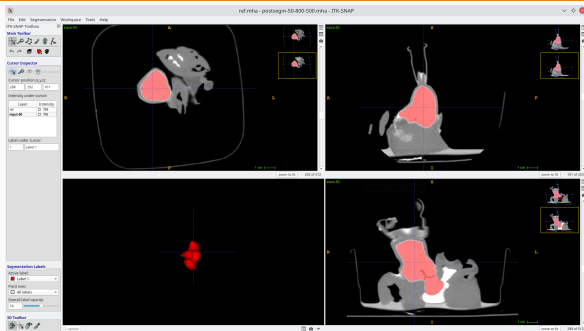
Сегментация КТ снимков – финальная сегментация



- Используем levelset-метод, высокий порог 600 HU, $\alpha = 1, \beta = 1$
- Количество итераций выбирает пользователь $N_{\text{fin}} = 500$
- В конце уточнение с $\beta = 0.8, 0.6$

```
c3d input.mha -erf 600 5 -as speed \  
restart.mha -replace 0 1 1 -1 \  
-levelset-curvature 1.0 -levelset-advection 1.0 -levelset 500 \  
-insert speed 1 -levelset-curvature 0.8 -levelset 10 \  
-insert speed 1 -levelset-curvature 0.6 -levelset 10 \  
-compress -o lv.mha
```


Сегментация КТ снимков – финальная сегментация



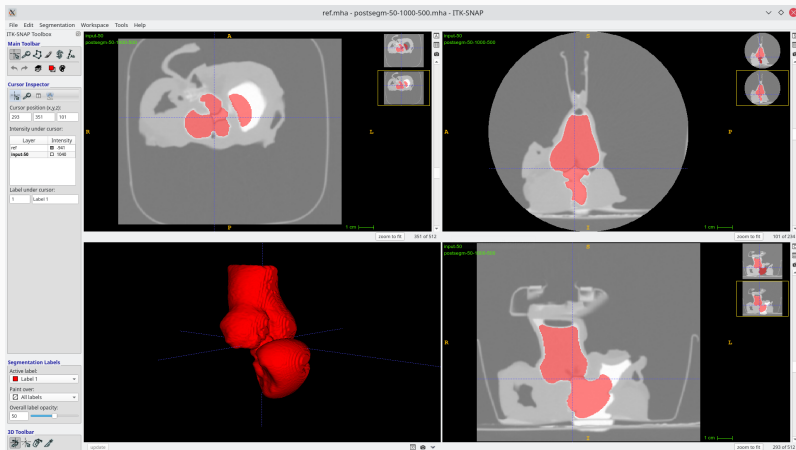
- Используем levelset-метод, высокий порог 600 HU, $\alpha = 1, \beta = 1$
- Количество итераций выбирает пользователь $N_{\text{fin}} = 500$
- В конце уточнение с $\beta = 0.8, 0.6$

```
c3d input.mha -erf 600 5 -as speed \  
restart.mha -replace 0 1 1 -1 \  
-levelset-curvature 1.0 -levelset-advection 1.0 -levelset 500 \  
-insert speed 1 -levelset-curvature 0.8 -levelset 10 \  
-insert speed 1 -levelset-curvature 0.6 -levelset 10 \  
-compress -o lv.mha
```

Пользовательские параметры

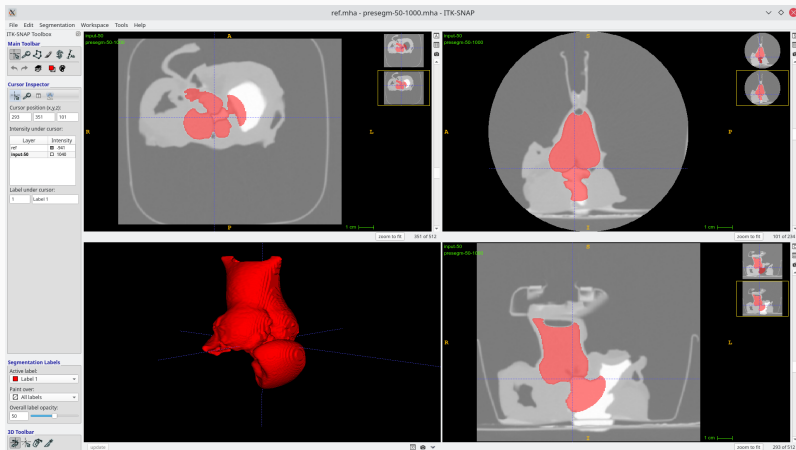
| | | | | | | | |
|------------------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|
| КТ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| N_{pre} | 1000 | 1000 | 600 | 600 | 600 | 700 | 700 |
| N_{fin} | 500 | 500 | 500 | 500 | 700 | 700 | 500 |
| КТ | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| N_{pre} | 600 | 800 | 700 | 600 | 800 | 1000 | 800 |
| N_{fin} | 600 | 500 | 600 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| КТ | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| N_{pre} | 800 | 1000 | 800 | 800 | 800 | 800 | 700 |
| N_{fin} | 1200 | 700 | 700 | 800 | 500 | 500 | 500 |

Влияние пользовательских параметров



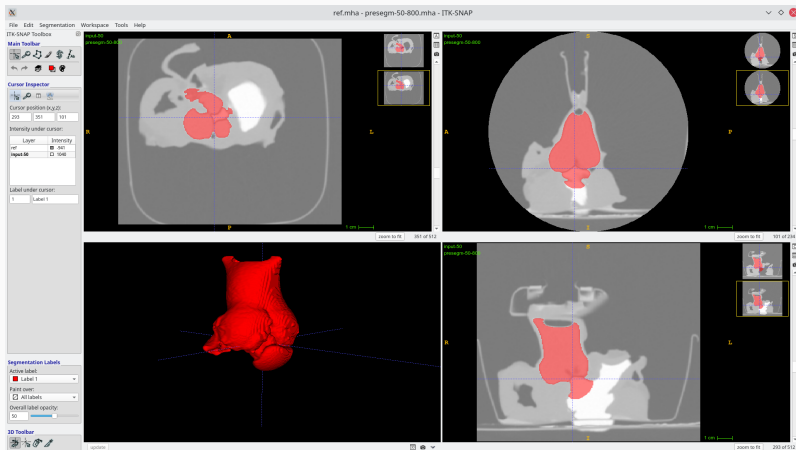
КТ #20, финальная сегментация, $N_{\text{pre}} = 1000$, $N_{\text{fin}} = 500$

Влияние пользовательских параметров



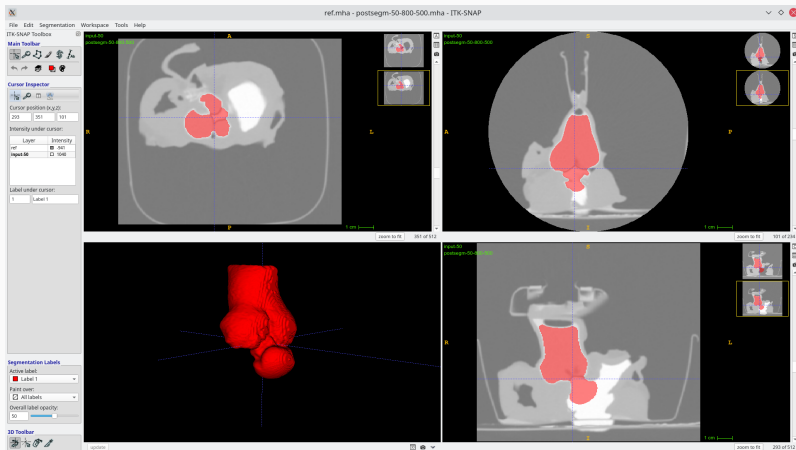
КТ #20, предварительная сегментация, $N_{\text{pre}} = 1000$

Влияние пользовательских параметров



КТ #20, предварительная сегментация, $N_{\text{pre}} = 800$

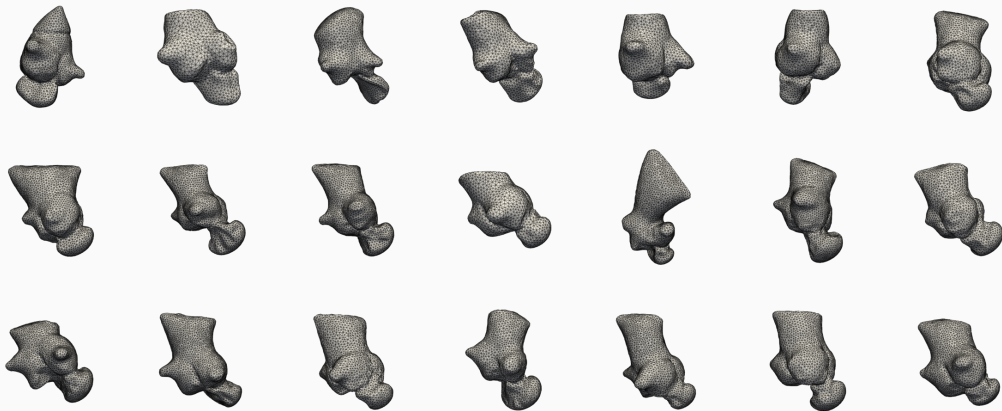
Влияние пользовательских параметров



КТ #20, финальная сегментация, $N_{\text{pre}} = 800$, $N_{\text{fin}} = 500$

Построение поверхностной сетки

- Результат сегментации с помощью levelset-метода – функция уровня $-1 \leq \phi \leq 1$
- Изоповерхность $\phi = 0$ является поверхностью корня аорты
- Для построения поверхностной сетки используется библиотека CGAL Mesh (<https://cgal.org/>)
- Полностью автоматический этап
- Пользователь выбирает только желаемый шаг сетки, например $h = 1\text{мм}$



Заключение

- Разработана методика сегментации КТ снимков образцов свиных сердец
- Для предобработки и сегментации используется свободный пакет Convert3D (<https://sf.net/p/c3d/>)
- Для построения поверхностной сетки используется библиотека CGAL Mesh (<https://cgal.org/>)
- Время сегментации около 10 минут, построение сетки меньше минуты
- В отдельных случаях требуется значительное ручное вмешательство:
#1 – в желудочке нет воздуха, #8 – створки очень толстые

Спасибо за внимание!