

Сегментация и построение расчётных сеток для желудочков сердца на основе динамических КТ снимков

Данилов Александр Анатольевич

3 ноября 2020

ИВМ РАН, МФТИ, Сеченовский университет

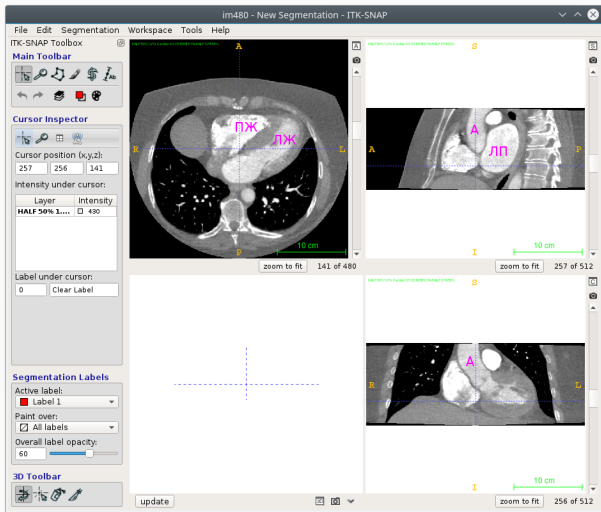
Динамическая модель левого желудочка

Постановка задачи

- Цель: моделирование течения крови в желудочках сердца
- Область: левый желудочек, клапаны – через граничные условия
- Динамика: положение стенок задано КТ снимками
- Данные: КТ с контрастом, 100 3D снимков, сердечный цикл – 1.27 секунды
- Разрешение: $512 \times 512 \times 480$, сырые данные – 24 Гб
- Пациент: 50 лет, женщина
- Задача: построить динамическую сетку по КТ снимкам

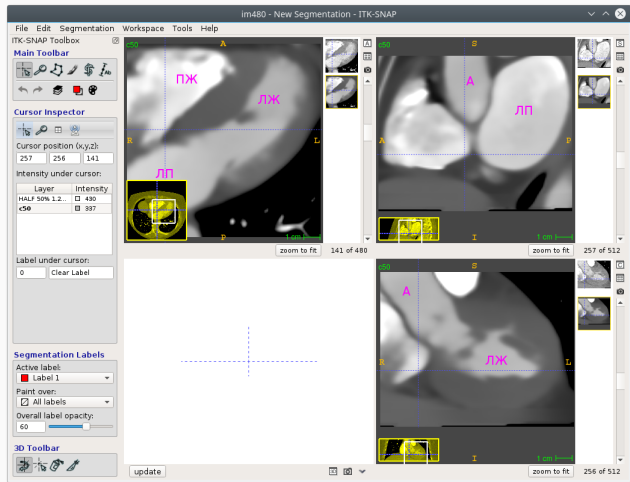
A. Danilov, et al. A finite element method for the Navier-Stokes equations in moving domain with application to hemodynamics of the left ventricle. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling 32 (2017), 225–236.

Исходные КТ снимки



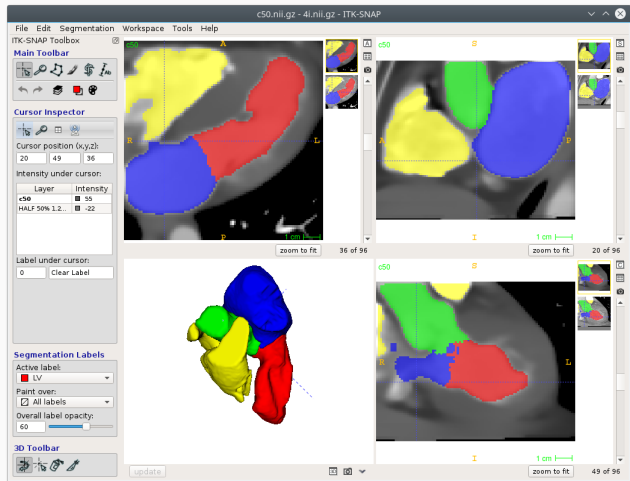
- КТ с контрастом
- вся грудная клетка
- присутствуют мелкие шумы
- $512 \times 512 \times 480$ вокселей
- $0.625 \times 0.625 \times 0.25$ мм
- один кадр – 240 Мб
- кадр #50

Сглаженные и обрезанные КТ снимки



- только левый желудочек
- сглаживание non-local means
- $96 \times 96 \times 96$ вокселей
- $1.25 \times 1.25 \times 1$ мм
- один кадр – 1.7 Мб
- кадр #50

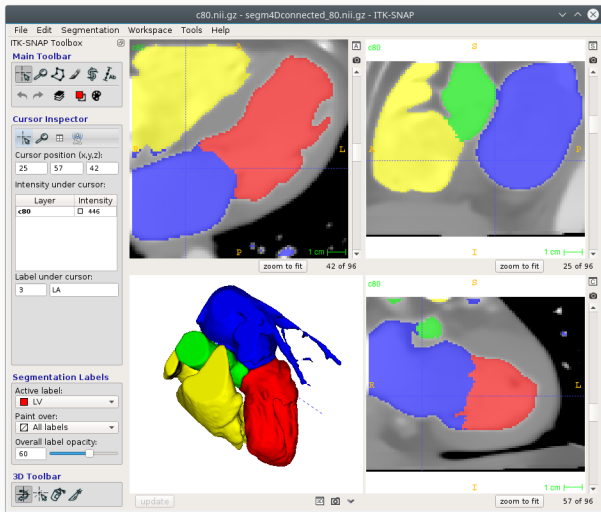
Ручная сегментация КТ снимков



- пакет ITK-SNAP
- метод активных контуров
- исправление неточностей
- сглаживание сегментации
- материалы: ЛЖ, ЛП, А, ПЖ+ПП
- кадр #50

itksnap.org

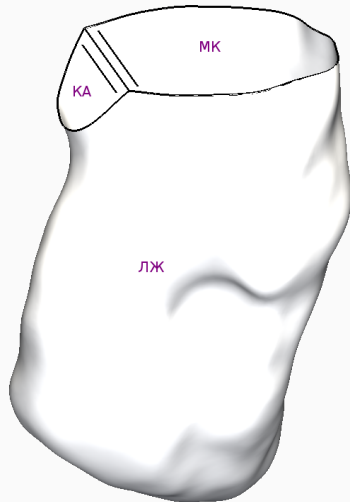
Автоматическая сегментация КТ снимков



- random forest классификация
- учёт соседей и координат
- связанные компоненты в 4D
- морфологические операции
- сглаживание сегментации
- материалы: ЛЖ, ЛП, А, ПЖ+ПП
- кадр #80

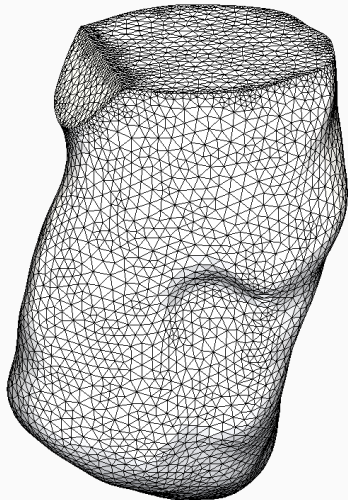
itksnap.org/c3d

Область для левого желудочка



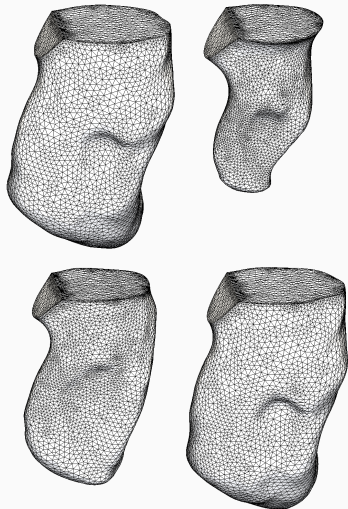
- фиксированная плоскость МК – среднее положение границы между ЛЖ и ЛП
- фиксированная плоскость КА – среднее положение границы между ЛЖ и А
- границы области – стенки ЛЖ+ЛП+А и плоскости МК и КА
- на общей границе МК и КА – искусственные границы
- кадр #0

Сетка для левого желудочка

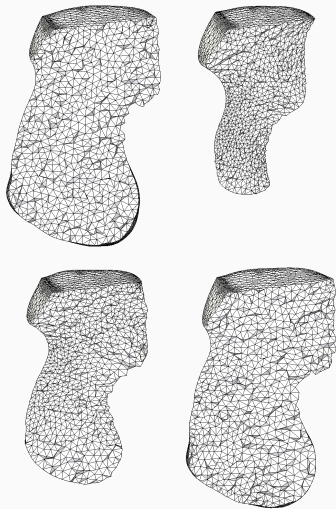


- неструктурированная тетраэдральная сетка
- генератор сетки – CGAL Mesh
- область задана неявно с помощью функции уровня и уравнений плоскостей МК и КА
- улучшение сетки – Ani3D
- запрет тетраэдров с 4 вершинами на границе
- 14033 вершины, 88150 рёбер, 69257 тетраэдров
- кадр #0

cgal.org
sf.net/p/ani3d

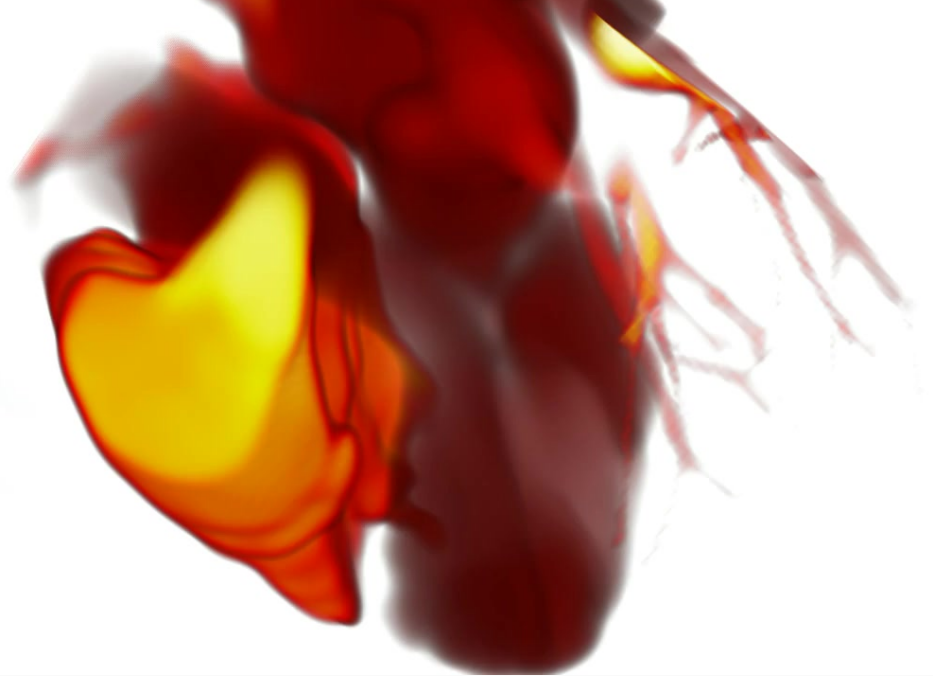


- вершины на поверхности сдвигаются в сторону новой границы
- v_n – вектор по нормали к новой границе (градиент функции уровня)
- v_s – вектор в центр масс соседних вершин
- сдвиг $v = 0.2v_n + 0.4v_s$
- в МК и КА вектор v проектируется на плоскость клапана
- максимум 2000 итераций, либо $\|v\| < \varepsilon$
- кадры #0, #30, #50, #80



- вершины на поверхности зафиксированы
- внутренние вершины – по алгоритму SUS, Simultaneous Untangling and Smoothing
- топология сетки остаётся неизменной
- кадры #0, #30, #50, #80

J. M. Escobar, et al. Simultaneous untangling and smoothing of tetrahedral meshes. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 192 (2003), 2775-2787.



Динамическая модель левого желудочка

- Входные данные хорошего качества (много кадров, мало артефактов)
- Основной объём сегментации сделан автоматически (random forest, levelset)
- Сегментация ЛЖ достаточно сильно сглажена
- Топологически инвариантная сетка отслеживает динамику стенок ЛЖ
- Сетка не отслеживает скручивание ЛЖ (нет скоростей в касательной плоскости)
- Плоскости клапанов неподвижны

A. Danilov, et al. A finite element method for the Navier-Stokes equations in moving domain with application to hemodynamics of the left ventricle. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling 32 (2017), 225–236.

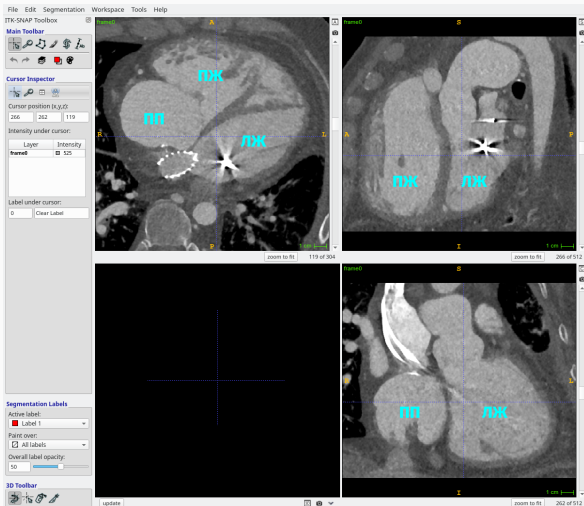
Динамическая модель правого желудочка

Постановка задачи

- Цель: моделирование течения крови в желудочках сердца
- Область: правый желудочек, клапаны – через граничные условия
- Динамика: положение стенок задано КТ снимками
- Данные: КТ с контрастом, 10 3D снимков, сердечный цикл – 0.87 секунды
- Разрешение: $512 \times 512 \times 304$, сырые данные – 1.5 Гб
- Пациент: анонимный пациент с транспозицией магистральных артерий
- Задача: построить динамическую сетку по КТ снимкам

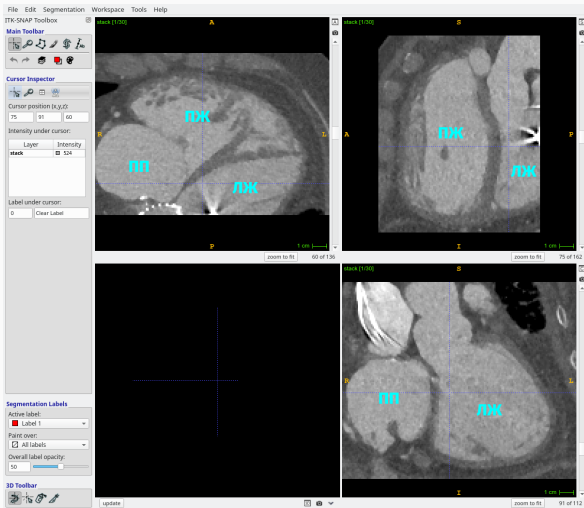
Yu. Vassilevski, et al. A stable method for 4D CT-based CFD simulation in the right ventricle of a TGA patient. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling 35 (2020), 315–324.

Исходные КТ снимки



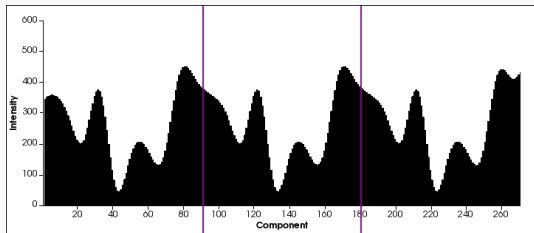
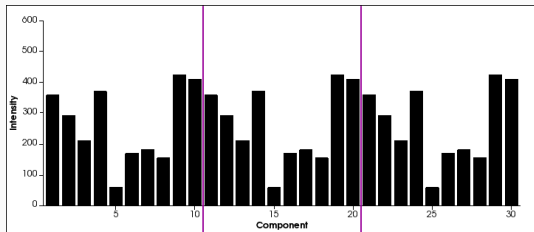
- КТ с контрастом
- присутствуют артефакты вокруг стентов и электродов
- $512 \times 512 \times 304$ вокселей
- $0.355 \times 0.355 \times 0.5$ мм
- один кадр – 152 Мб
- кадр #0

Обрезанные КТ снимки



- только правый желудочек
- $162 \times 112 \times 136$ вокселей
- $1 \times 1 \times 1$ мм
- один кадр – 4.7 Мб
- кадр #0

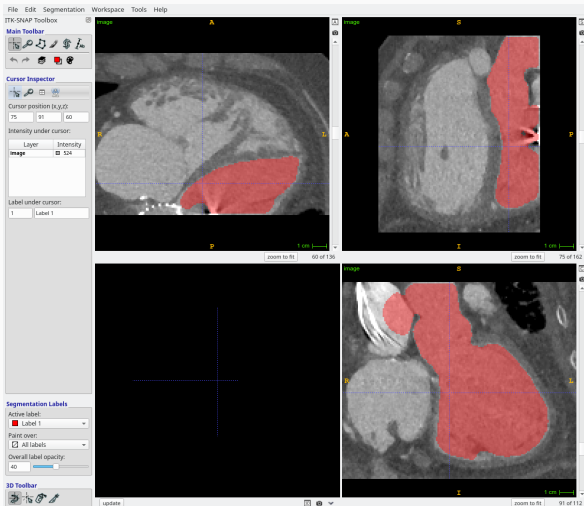
Интерполяция кадров по времени



- 3 сердечных цикла – 30 кадров
- кубическая интерполяция
30 → 270 кадров
- центральный сердечный цикл
- 90 кадров на сердечный цикл
- каждый девятый кадр в точности совпадает с исходными кадрами

itksnap.org/c3d

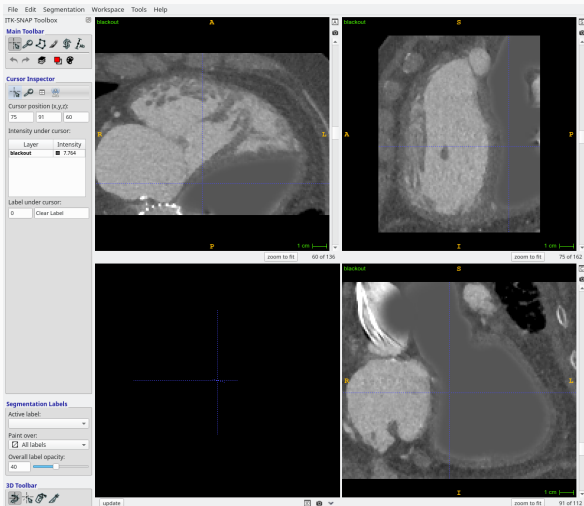
Сегментация левого желудочка



- грубая сегментация ЛЖ
- 4D levelset метод из c4d
- область ЛЖ затемняется на всех кадрах
- ЛЖ проще выделить, у него равномерная структура
- кадр #0

itksnap.org/c3d

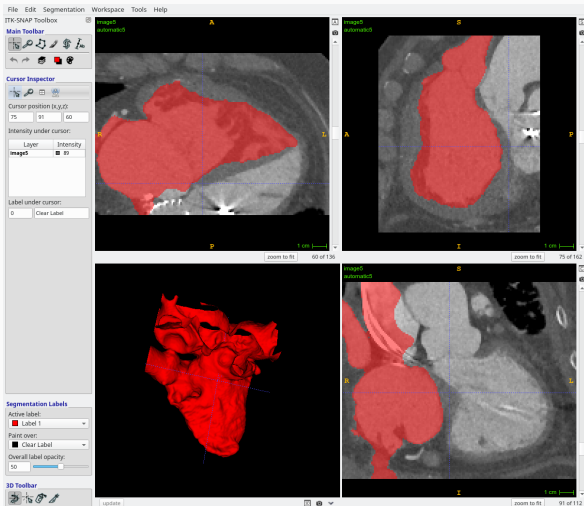
Сегментация левого желудочка



- грубая сегментация ЛЖ
- 4D levelset метод из c4d
- область ЛЖ затемняется на всех кадрах
- ЛЖ проще выделить, у него равномерная структура
- кадр #0

itksnap.org/c3d

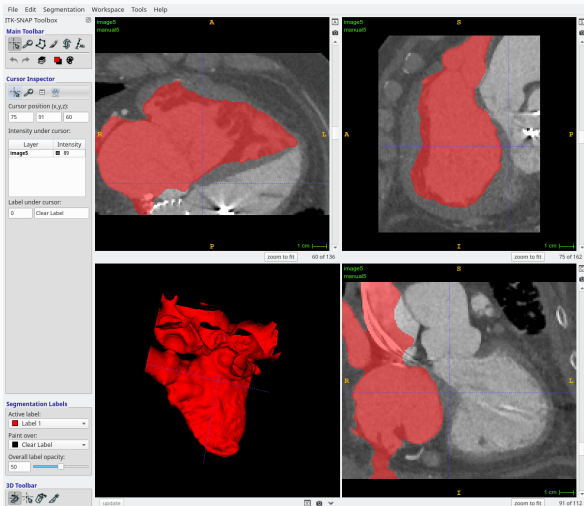
Сегментация правого желудочка



- автоматическая сегментация ПЖ (90 кадров без ЛЖ)
- 4D levelset метод из c4d
- ручная коррекция на 10 исходных кадрах
- обрезка шарами в районе клапанов
- кадр #5/10

itksnap.org/c3d

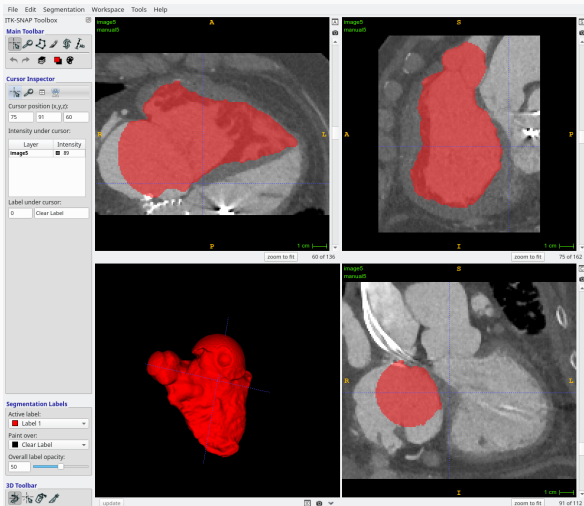
Сегментация правого желудочка



- автоматическая сегментация ПЖ (90 кадров без ЛЖ)
- 4D levelset метод из c4d
- ручная коррекция на 10 исходных кадрах
- обрезка шарами в районе клапанов
- кадр #5/10

itksnap.org/c3d

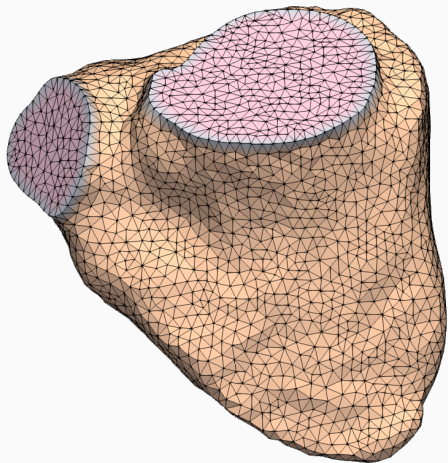
Сегментация правого желудочка



- автоматическая сегментация ПЖ (90 кадров без ЛЖ)
- 4D levelset метод из c4d
- ручная коррекция на 10 исходных кадрах
- обрезка шарами в районе клапанов
- кадр #5/10

itksnap.org/c3d

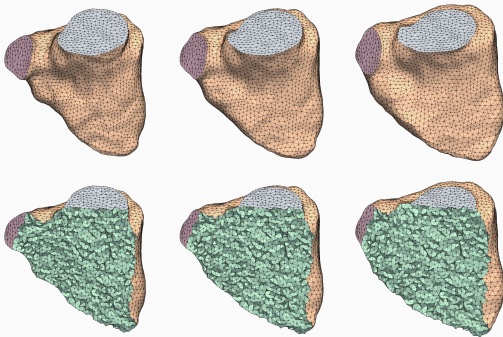
Расчётная сетка для правого желудочка



- кубическая интерполяция $10 \rightarrow 90$ кадров
- функция уровня вместо бинарной маски
- плоскости клапанов заданы вручную
- начальная сетка по осредненной функции уровня (CGAL+Ani3D)
- 13222 вершины, 86920 рёбер, 70533 тетраэдра

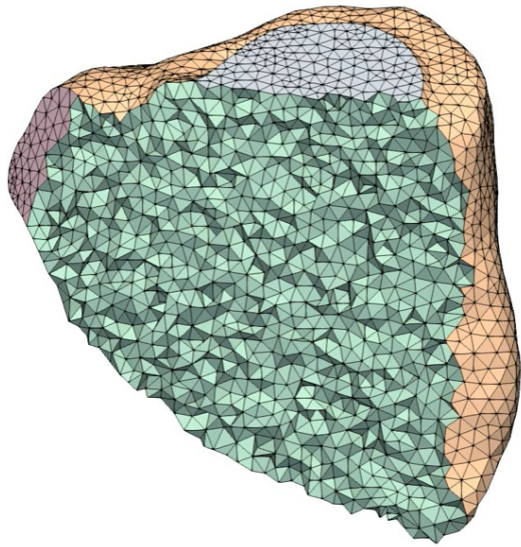
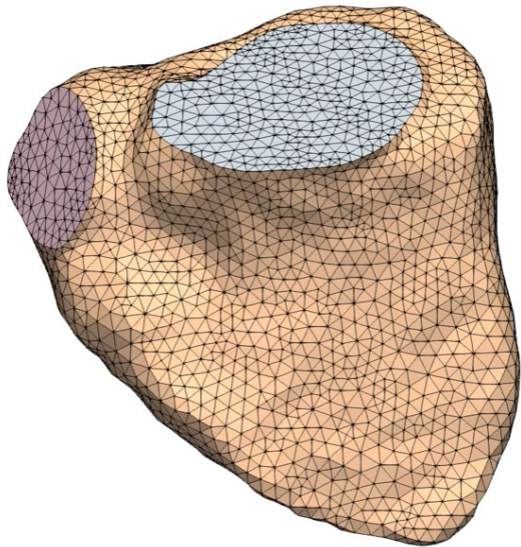
cgal.org
sf.net/p/ani3d

Динамическая сетка для правого желудочка



- сдвиг вершин на границе
- $v = 0.5v_n + 0.04v_s$
- сдвиг вершин внутри – SUS
- два полных цикла 90+90 кадров
- второй цикл – периодический

J. M. Escobar, et al. Simultaneous untangling and smoothing of tetrahedral meshes. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 192 (2003), 2775-2787.



Динамическая модель правого желудочка

- Входные данные среднего качества (мало кадров, много артефактов)
- Предварительная сегментация сделана автоматически (4D levelset)
- Сегментация для 10 исходных кадров подправлена вручную
- Используется кубическая периодическая интерполяция по времени
- Сегментация ПЖ достаточно сильно сглажена
- Топологически инвариантная сетка отслеживает динамику стенок ПЖ
- Плоскости клапанов неподвижны

Yu. Vassilevski, et al. A stable method for 4D CT-based CFD simulation in the right ventricle of a TGA patient. Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling 35 (2020), 315–324.

Спасибо за внимание!