

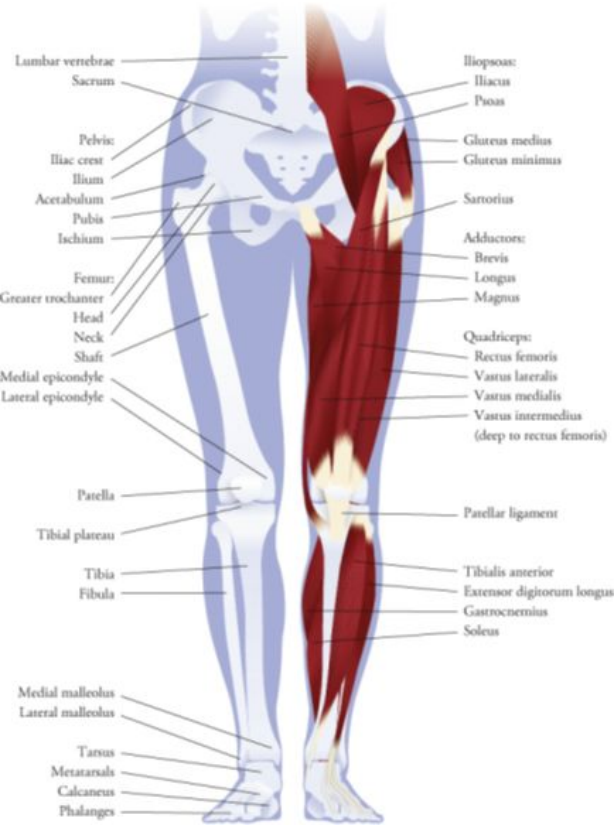
Моделирование биомеханики коленного сустава с помощью Opensim

А.С. Юрова, В.Ю. Саламатова

Сеченовский Университет, Москва

XIII конференция «Математические модели и численные методы в биологии и медицине» и Школа молодых ученых «Математические модели в биомедицине»

Опорно-двигательная система человека



Компоненты: кости, мышцы (скелет.), связки, сухожилия

Кость-Связки-Кость = Сустав

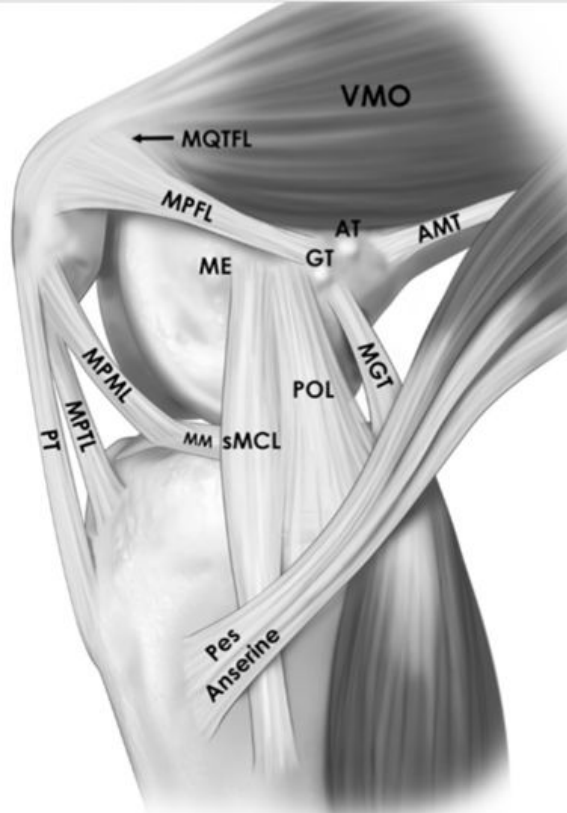
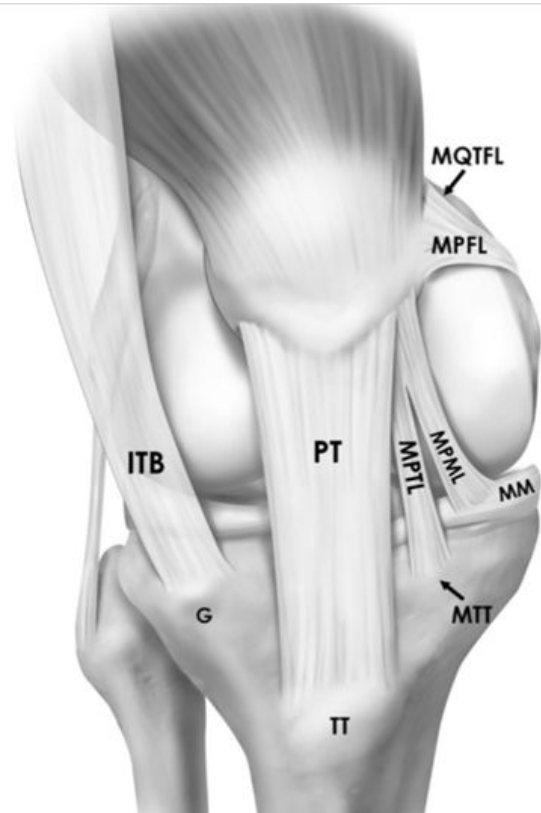
Мышца-Сухожилие-Кость

Связки - пассивные элементы, мягкотканые стаб. структуры

Мышцы - активные элементы, позволяют двигаться



Колено



- Бедренная кость (femur)

Б. берцовая (tibia) + м. берцовая кость (fibula)

Надколенник (patella)

- Сложный капсульно-связочный аппарат

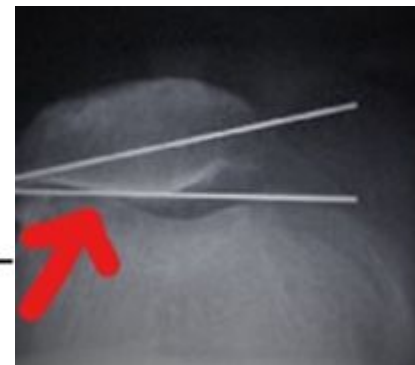
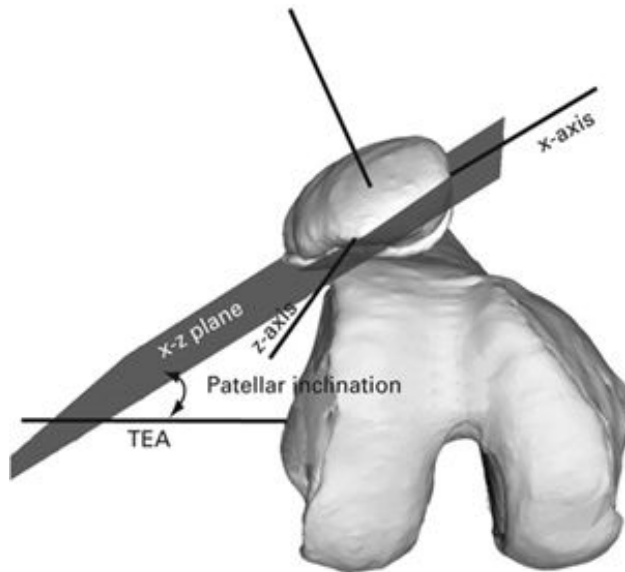
- Тибioфеморальный сегмент/сустав (tibiofemoral joint)

Пателлофеморальный сегмент/сустав (patellofemoral joint)

Пателлофеморальный болевой синдром (ПФБС)

Нормальное движение: плавно скользит между мыщелков бедра, не выходя за пределы межмыщелковой борозды

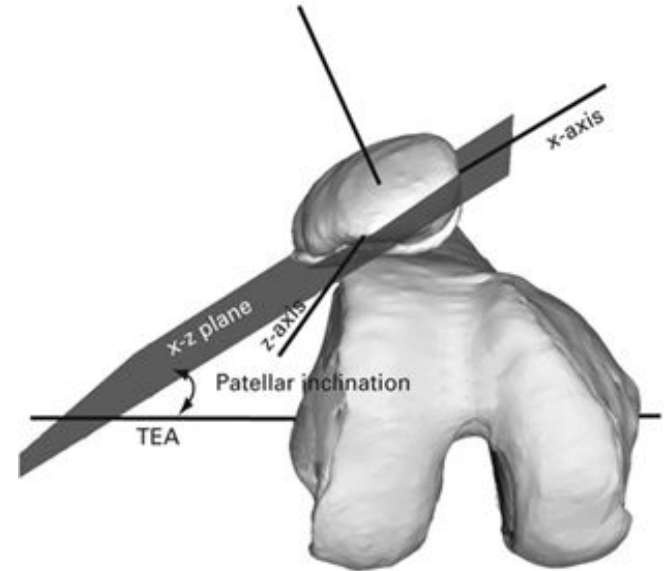
Основная причина ПФБС: надколенник “соскакивает”



Исследование патологий надколенника

Существующие проблемы:

- отсутствие общепринятых методов диагностики различных отклонений и наклонов надколенника
- отсутствие инструментальных точных методов обследования
- отсутствие постоянства данных об эффективности применяемых методик оперативного лечения



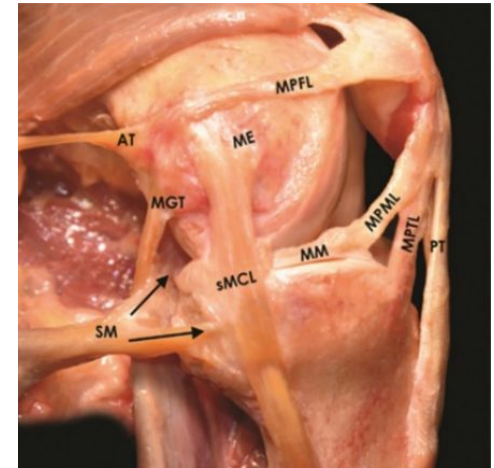
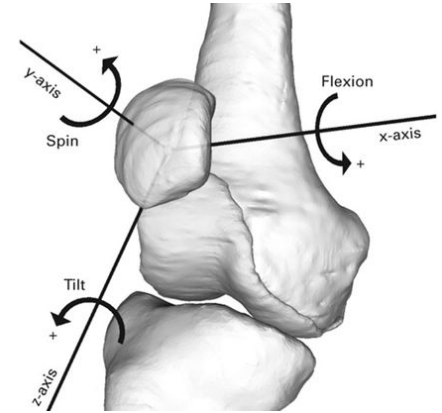
Задачи исследования

При помощи математического моделирования определить характер и степень отклонения от нормальных параметров биомеханики надколенника у пациентов с патологией области коленного сустава:

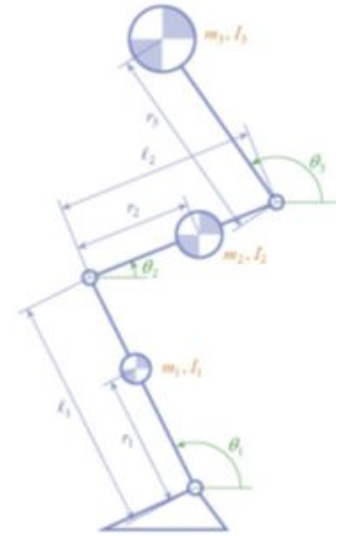
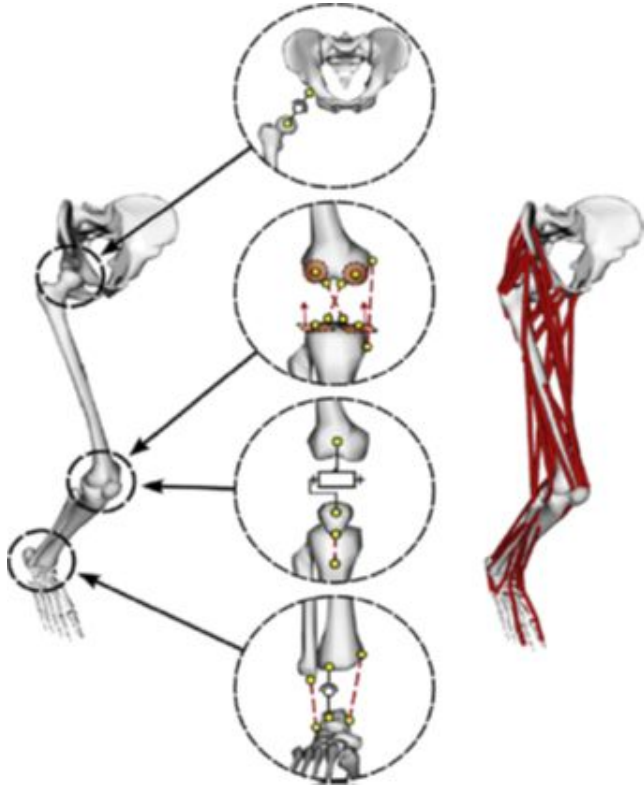
- Показать вклад отдельно взятых анатомических структур (мышц и капсульно-связочных структур) в нормальное функционирование пателлофemorального (бедренно-надколенникового) сегмента коленного сустава
- Разработать классификацию нарушений функционирования пателлофemorального (бедренно-надколенникового) сегмента коленного сустава (поражение каких основных стабилизаторов надколенника (капсульно-связочный аппарат, мышцы) приводят к интересующим патологиям).

Существуют только сильно упрощенные модели пателлофemorального сегмента.

Интересует пассивное сгибание колена.



Динамика многих тел (multibody dynamics)



Платформа OpenSim

Уравнения движения (уравнение Лагранжа)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, \dots, n$$

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + R(\mathbf{q})F^{MT} + E(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0$$

$\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$ – вектор обобщенных координат, скоростей, ускорений соотв.

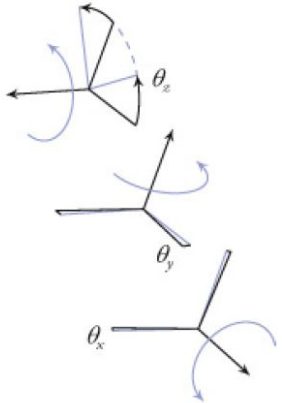
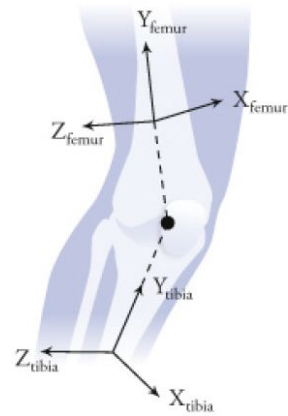
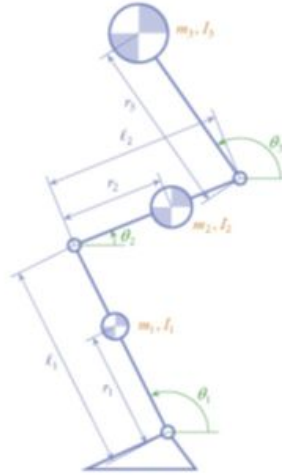
$M(\mathbf{q})$ – матрица масс

$E(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – вектор приложенных внешних сил и моментов

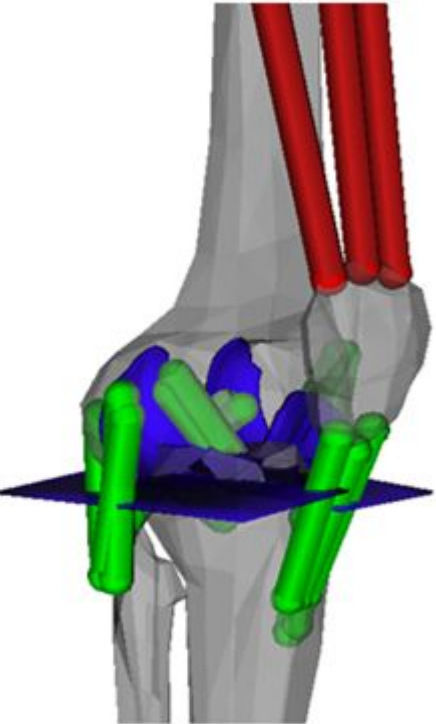
F^{MT} – вектор мышечных сил

$R(\mathbf{q})$ – матрица плеч мышечных сил

$\dot{F}^{MT} = \mathbf{f}(F^{MT}, l^{MT}, v^{MT}, a_m)$ – учитывает кривые (сила — длина мышцы, сила — скорость сокращения)



Существующая модель колена (Schmitz A. et al.)



Сегменты

- 6 DoF тибioфеморальный
- 1 DoF пателлофеморальный

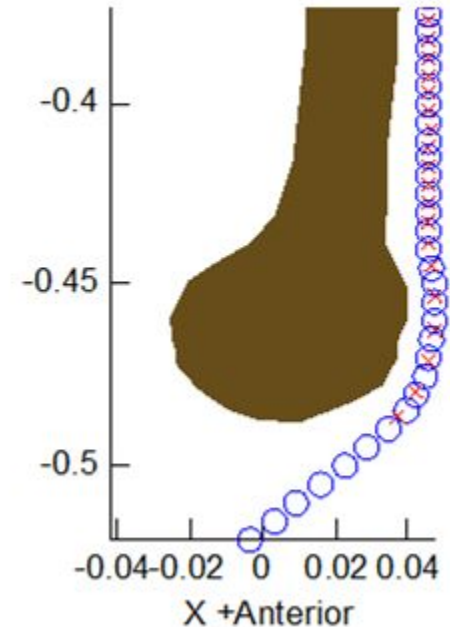
Связки

- ACL (2), PCL (2), MCL (5), LCL (1), PFL (1), задняя часть капсульного аппарата (4), сухожилие четырёхглавой мышцы бедра (3)
- Моделируются как нелинейные пружины

Контакт между костями

- Модель линейно-упругого основания

Patellofemoral Joint



Движение надколенника в существующей модели

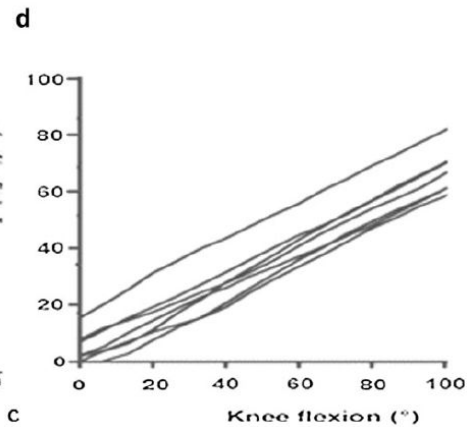
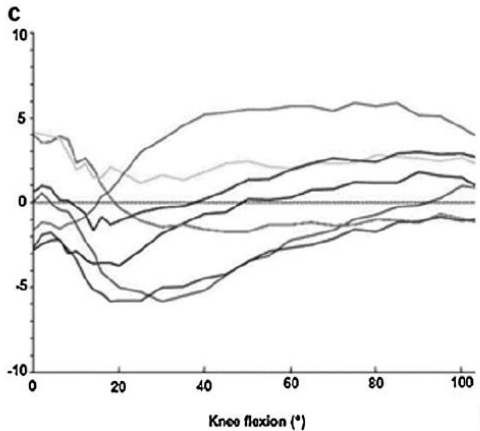
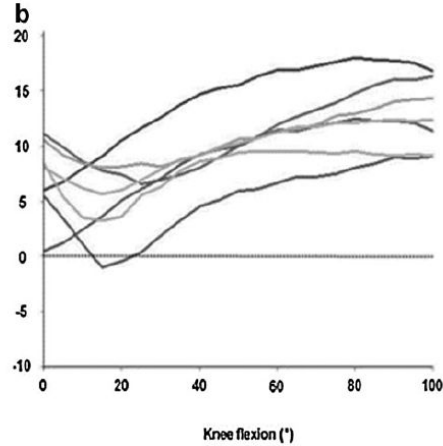
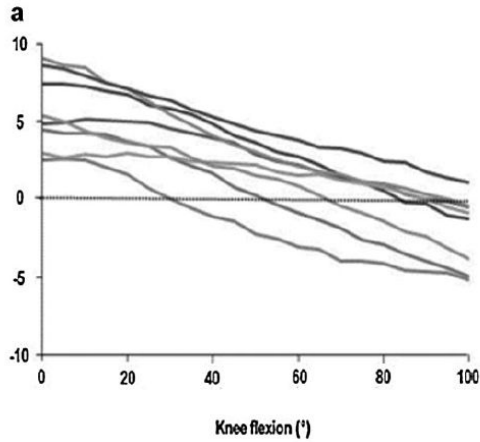
Достоинства:

1. Реализовано движение надколенника при сгибании колена
2. Реализовано контактное взаимодействие между femur и tibia
3. Реализовано БОльшая часть стабилизирующих мягкотканых структур

Недостатки:

1. 1 DoF
2. Отсутствие контакта с femur при завершении сгибания
3. Некорректные крепления vastus medialis и vastus lateralis к patella
4. Высокое положение надколенника

Кинематика надколенника в норме



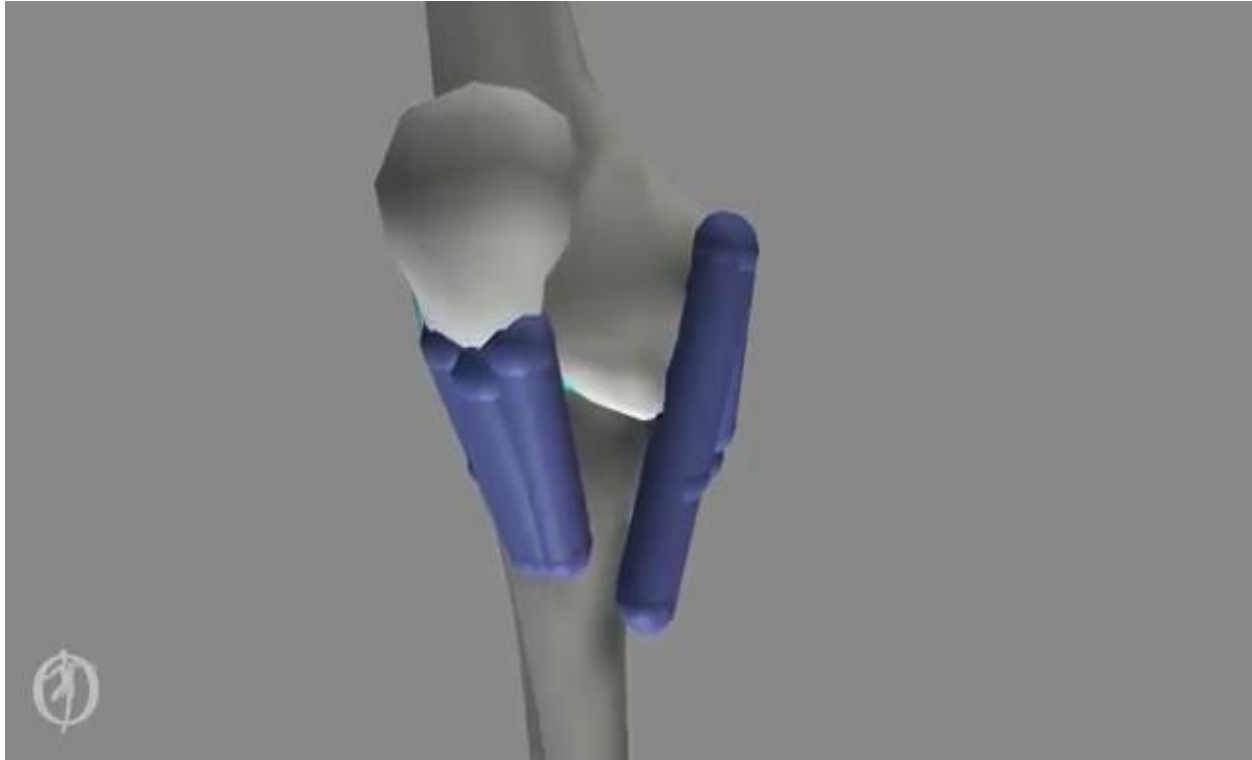
Farhad Iranpour, Azhar M. Merican, Ferdinando Rodriguez Y. Baena, Justin P. Cobb, Andrew A. Amis.

Patellofemoral Joint Kinematics: The Circular Path of the Patella around the Trochlear Axis

2009. Wiley InterScience

- a. Lateral rotation (°)
- b. Lateral tilt (°)
- c. Lateral translation (mm)
- d. Flexion (°)

Воспроизведение движения здорового надколенника по фиксированной траектории



Достоинства:

1. Реализовано движение надколенника при сгибании колена

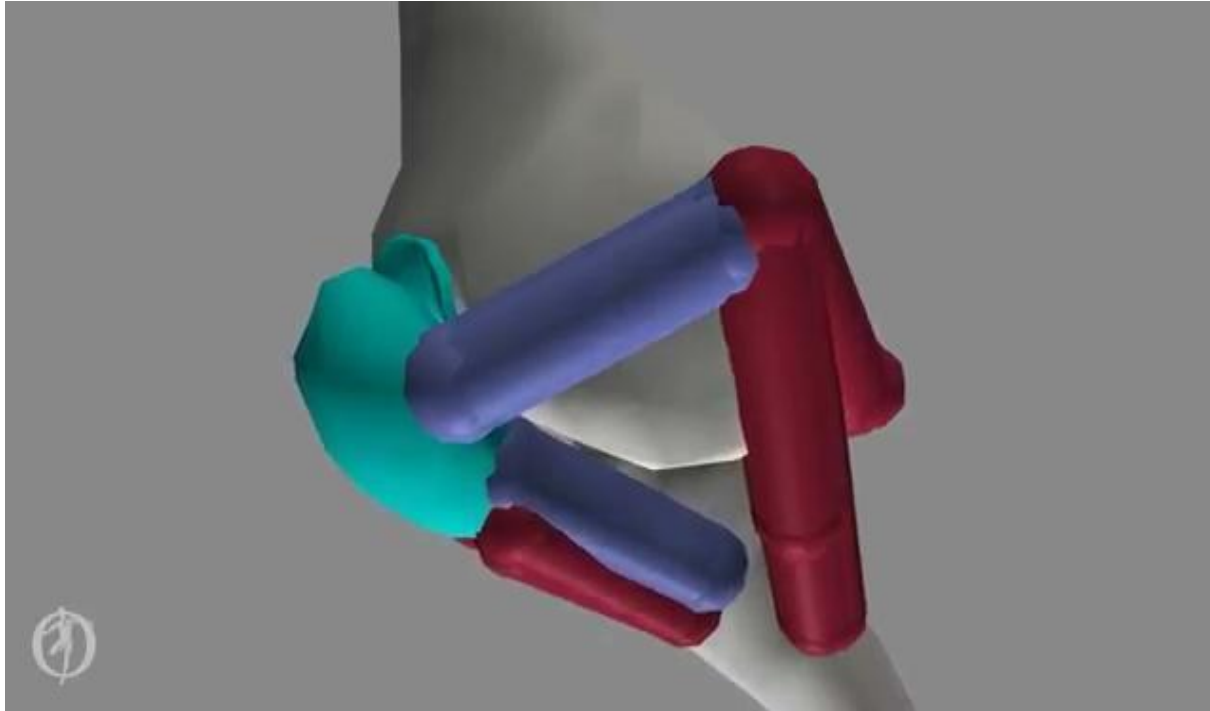
Недостатки:

1. 1 DoF
2. Отсутствие контактного взаимодействия между надколенником и большеберцовой костью

Модификация существующей коленной модели

1. Добавление новых связок (стабилизаторы MPFL, MPLT)
2. Удаление некорректно обозначенных структур (vastus medialis, vastus lateralis)
3. Добавление в модель новых функциональных элементов, позволяющих более реалистично воспроизвести движение надколенника (контактное взаимодействие надколенника и большеберцовой кости, bushing force)

Новая модель коленного сустава



Достоинства:

1. 6 DoF
2. Реализовано контактное взаимодействие между надколенником и большеберцовой костью
3. Добавлены дополнительные структуры

Недостатки:

1. Необходима корректировка траекторий по некоторым направлениям движения

Планы дальнейших работ

1. Персонализация полученной модели:
 - использование персонализированной геометрии (построение поверхностных сеток по данным сегментации КТ-данных)
 - детектирование точек креплений связок и сухожилий по КТ и МРТ данным конкретного пациента
2. Исследование влияния мягкотканых стабилизирующих структур на движение надколенника
3. Детализация представления связок (включение в модель нескольких волокон с разными точками крепления)