

КАТЕГОРНАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Ю. П. Муха, С. А. Безбородов, С. А. Русаков

*Волгоградский государственный медицинский университет,
кафедра биотехнических систем и технологий*

Предложена категорная модель коленного сустава, которая позволяет объективизировать состояние сустава, дает возможность формировать технологию лечения. Она предполагает четкую последовательность анализа физиологического состояния объекта и способствует развитию информационных технологий в рамках лечебных и реабилитационных технологий.

Ключевые слова: категорная модель, коленный сустав, анализ физиологического состояния объекта.

CATEGORY MODEL OF A KNEE JOINT

Yu. P. Mukha, S. A. Bezborodov, S. A. Rusakov

We propose a category model of knee joint, which allows an objective assessment of the joint condition, helps to define the strategy of treatment. The model implies a definite sequence of the analysis of physiological condition and promotes the development of IT within the framework of therapeutic and rehabilitation technologies.

Key words: category model, knee joint, physiological condition analysis.

С анатомической и физиологической точки зрения, коленный сустав представляет собой сложную систему в структурном и функциональном отношениях. Все элементы сустава являются нелинейными физическими средами. Подвижность сустава определяет характер пространственного поведения всех остальных органов движения человека. Наконец, следует отметить, что любые показатели, характеризующие сустав, строго индивидуализированы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Корректный выбор лечебных и реабилитационных технологий, что в значительной мере определяется достижением следующих целей:

- 1) описанием фазового пространства наблюдения коленного сустава и выбором информационных параметров для осуществления системного подхода в рамках измерительного процесса;
- 2) синтезом структурной модели силовых взаимодействий между элементами коленного сустава;

3) распределением аналитических формализмов описания силовых контактов элементов коленного сустава.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ:

Корректный выбор лечебных и реабилитационных технологий за счет управления силовыми взаимодействиями элементов сустава целесообразно объективизировать введением модели диагностируемого состояния:

$$M_{\text{дфс}} = \{M_{\text{фус}}, M_{\text{ооп}}, M_{\text{фк}}, M_{\text{уфс}}, M_{\text{сп}}\}, \quad (1)$$

где $M_{\text{дфс}}$ — модель диагностируемого физиологического состояния;

$M_{\text{фус}}$ — модель физиологической функциональной системы (ФФС);

$M_{\text{ооп}}$ — модель области определения ФФС;

$M_{\text{фк}}$ — модель физиологических констант;

$M_{\text{уфс}}$ — модель условий функционирования;

$M_{\text{сп}}$ — модель системного параметра.

На основании анатомической схемы коленного сустава (1) составим блок-схему структуры взаимодействий между его элементами (рис.):

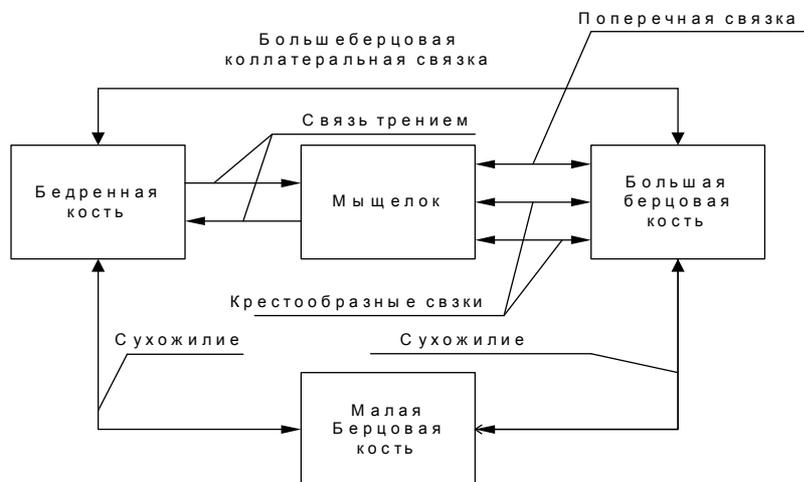
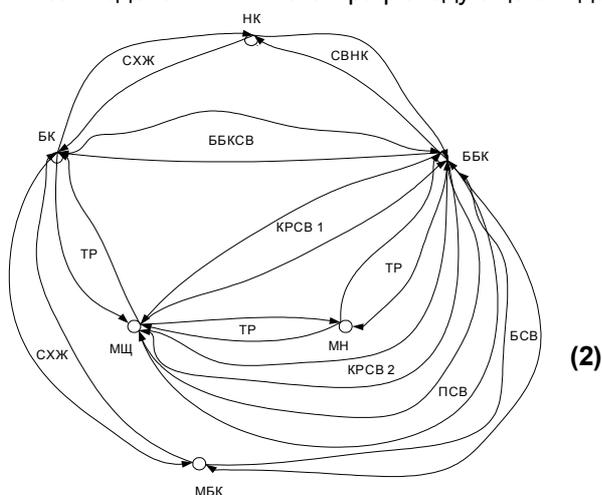


Рис. Структура межэлементных взаимодействий

Формальным изображением структуры межэлементных взаимодействий является граф следующего вида:



Здесь приняты следующие обозначения:
 КРСВ_{1,2} — крестообразные связки 1 и 2 соответственно;

- ПСВ — поперечная связка;
- СХЖ — сухожилие;
- ТР — трение;
- БК — бедренная кость;
- МЩ — мыщелок;
- ББК — большая берцовая кость;
- МБК — малая берцовая кость;
- МН — мениск;
- ББКСВ — большеберцовая коллатеральная связка;
- НК — надколенник;
- СВНК — связка надколенника;
- БСВ — бедренная связка.

С помощью графа (2) можно составить категорную систему [2] силовых межэлементных взаимодействий:

$$\left. \begin{aligned}
 M_{БКНК} &\subset (БК, НК) \cup (НК, БК), \\
 M_{ББКНК} &\subset (ББК, НК) \cup (НК, ББК), \\
 M_{БКББК} &\subset (БК, ББК) \cup (ББК, БК), \\
 M_{БКМЩ} &\subset (БК, МЩ) \cup (МЩ, БК) \\
 M_{МЩМН} &\subset (МЩ, МН) \cup (МН, МЩ) \\
 M_{МЩББК1} &\subset (МЩ, ББК)_1 \cup (ББК, МЩ)_1 \\
 M_{ББКМН} &\subset (ББК, МН) \cup (МН, ББК) \\
 M_{БКМБК} &\subset (БК, МБК) \cup (МБК, БК) \\
 M_{ББКМБК} &\subset (ББК, МБК) \cup (МБК, ББК) \\
 M_{МЩББК2} &\subset (МЩ, ББК)_2 \cup (ББК, МЩ)_2 \\
 M_{МЩББК3} &\subset (МЩ, ББК)_3 \cup (ББК, МЩ)_3
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Здесь индексы 1, 2, 3 у категорий соответствуют первой и второй крестообразным связкам (индексы 1 и 2) и поперечной связке (индекс 3). Поскольку элементы БК, ББК, МЩ, МН, НК и МБК входят в тот или иной комбинации во все категории системы (3), постольку эта система корректно адекватна модели функциональной системе Мфус.

Категория (3) может быть дополнена информацией о типах связи структурных элементов и типах нагружения соединительных элементов. С этой целью строятся матрицы типов связи и типов нагружения (табл. 1, 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всякая модель предполагает использование числовых характеристик ее отдельных элементов, их ха-

Таблица 1

Матрица типов связи

	БК	МЩ	ББК	МБК
БК		Связь трением	Коллатеральная связка	Сухожилие
МЩ	Связь трением		Крестообразная и поперечная связки	
ББК	Коллатеральная связка	Крестообразная и поперечная связки		Сухожилие
МБК	Сухожилие		Сухожилие	

Таблица 2

Матрица типов нагружения

	БК	МЩ	ББК	МБК
БК		Трение скольжения, сжатие	Деформация растяжения	Деформация растяжения
МЩ	Сжатие		Реакция на срез, реакция на сжатие	
ББК	Реакция на растяжение	Трение среза, реакция на сжатие		Растяжение, кручение
МБК	Реакция на растяжение/кручение		Реакция на растяжение/кручение	

ракти и рисунок распределения на модели. В данном случае назначение числовых величин основывается на том, что связки — это плотные соединительно-тканые тяжи и пластины, соединяющие кости скелета или отдельные органы. Располагаясь преимущественно в области суставов, укрепляют их, ограничивают или направляют движение в суставах. При этом все связки имеют физические характеристики в соответствии с их индивидуальным назначением.

Содержанием модели области определения $M_{ооп}$ являются интервалы значений каждого компонента системы (3), которые обозначим следующим образом:

$$M_{ооп} = \{ \langle \overline{BK}_{min}, \overline{BK}_{max} \rangle; \{ \langle \overline{HK}_{min}, \overline{HK}_{max} \rangle; \{ \langle \overline{BBK}_{min}, \overline{BBK}_{max} \rangle; \{ \langle \overline{MЦ}_{min}, \overline{MЦ}_{max} \rangle; \{ \langle \overline{MH}_{min}, \overline{MH}_{max} \rangle; \{ \langle \overline{MBK}_{min}, \overline{MBK}_{max} \rangle \} \} \} \} \} \quad (4)$$

Здесь $\{ \langle \overline{BK}_{min}, \overline{BK}_{max} \rangle_i \}$ означает комплекс конкретных значений, что соответствует употреблению записи $\langle \cdot \rangle$, семейств параметров, что обозначено штриховой линией над именем элемента, угловые скобки имеют свой порядковый индекс i . Фактор семейства обозначен фигурными скобками. Среди подобных параметров следует отметить, прежде всего, модуль упругости материала элемента: E_{BK} , например.

Модель $M_{фк}$ представляет собой совокупность неизменных констант, характеризующих элементы объекта, то есть коленного сустава, в геометрическом или физическом отношении:

$$M_{фк} = \{ \langle \overline{BK} \rangle_{const}, \langle \overline{HK} \rangle_{const}, \langle \overline{BBK} \rangle_{const}, \langle \overline{MЦ} \rangle_{const}, \langle \overline{MH} \rangle_{const}, \langle \overline{MBK} \rangle_{const} \} \quad (5)$$

Модель содержит перечень разнообразных условий, при которых соблюдается стабильность функционирования коленного сустава и перечисляются допустимые границы этих условий.

Модель системного параметра $M_{сп}$ содержит имя параметра или параметров, измерения которого (или которых) позволяет объективно оценивать физиологическую функциональную систему (ФФС), а также уравнение измерительной процедуры, так как это сделано, например, авторами [3, 4]. При детализации поведения сустава в фазовом силовом пространстве нужно для каждого его элемента разместить центр координатной системы и рассматривать перемещение каждого элемента под воздействием внешних относительно элементов сил.

Основанием для определения положения систем координат нагружения взаимодействующими парами служит граф (2). Все взаимодействующие пары реализуют удержание общего равновесия тела в пространстве, и вектор взаимодействия имеет произвольное текущее направление, однако оси координат всех координатных систем коллинеарны между собой и результирующей системе. Поэтому в данном случае целесо-

образно организовать системы координат относительно всех пар взаимодействий. С учетом сказанного результирующий вектор силовых взаимодействий пар можно представить следующим образом:

$$\overline{F}_{СП} = \overline{F}_{BK/MЦ} + \overline{F}_{BK/BBK} + \overline{F}_{BK/MBK} + \overline{F}_{MЦ/BBK} + \overline{F}_{BBK/MBK} \quad (6)$$

Функционал каждой векторной компоненты определяется в соответствии с таблицами матриц типов соединения между элементами (табл. 1) и типов нагружения (табл. 2) соединительных элементов. Области определения и существования функционалов, а также коэффициенты и параметры принимаются в соответствии с моделями (4) и (5). Начальные и граничные условия для функционалов из (6) назначаются по модели $M_{уфс}$.

С учетом (6) можно написать

$$M_{СП} = \overline{F}_{СП} \quad (7)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, категорная модель коленного сустава позволяет объективизировать состояние сустава, то есть диагноз. Она дает возможность формировать технологию лечения (терапии) более корректно, будучи определенной по жесткостям и упругостям связок.

Предложенная формализация поведения коленного сустава является корректной, обобщенной благодаря категорному описанию, и в то же время допускает требуемую конкретизацию, определяемую индивидуализацией самого объекта. Она предполагает четкую последовательность анализа физиологического состояния объекта и способствует развитию информационных технологий в рамках лечебных и реабилитационных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анатомия человека / Под редакцией М. Р. Сапина — М.: Медицина, 2001.
2. Букур И., Деляну А. Введение в теорию категорий. — М.: Издание «Мир», 1972. — 259 с.
3. Воробьев А. А., Муха Ю. П., Барасов А. С. и др. // Биомедицинская электроника. — 2008. — № 4. — С. 59—63.
4. Безбородов С. А. ПТК для определения биомеханических характеристик коленного сустава: Автореф. дис. ... канд. диссертации — Волгоград, 2011. — 18 с.

Контактная информация

Муха Юрий Петрович — д. т. н., профессор каф. биотехнических систем и технологий, Волгоградский государственный медицинский университет, e-mail: muxaup@mail.ru