

Методика управления роботизированным протезом на основе критериев антропоморфности

А. П. Гусев

МГТУ имени Н.Э. Баумана
xitren@ya.ru

А. М. Андреев

МГТУ имени Н.Э. Баумана
arkandreev@gmail.com

Аннотация. Успехи в области реабилитационной медицины требуют создания более совершенных протезов для организации мягкого реабилитационного цикла и повышения эксплуатационных характеристик мехатронных устройств. Имеется множество исследований, которые пытаются воссоздать модель управления, схожую по качеству с человеческой центральной и периферической нервной системой прошедшей многие века эволюции. В этом исследовании мы проанализируем современные методы управления мехатронными устройствами и выведем формальные признаки антропоморфности для оценки эффективности управления протезом при ходьбе. На основе выведенных критериев разработан алгоритм синтеза управляющих программ для антропоморфных биомеханических протезов.

Ключевые слова: метод управления; роботизированный протез; антропоморфность; математические критерии; признаки; синтез; управление

I. ВВЕДЕНИЕ

Термин «антропоморфность» дословно означает «человекообразность» поведения и во многом современные исследования в области робототехники призваны нивелировать любые нюансы в современных машинах, сделав из них достойное объединение с человеком. Такой подход позволит решить большое количество вопросов, связанных с медицинскими задачами. При должном уровне технологий мы сможем полностью и неотличимо для стороннего наблюдателя заменять потерянные человеком функции при помощи внедрения роботизированных комплексов [1].

Восстановление функций имеет огромное социальное и экономическое значение. Во-первых, качество жизни людей существенно увеличится. Во-вторых, снизятся затраты государства на социальные выплаты, и люди, получающие степень инвалидности, вернутся на рабочие места.

Однако термин антропоморфности [2], с точки зрения инженерного проектирования, и по сей день остается, что называется, «state of art». На данный момент в этой области науки не сформировалось определения, отвечающего этому понятию. Нашу поставленную цель мы трактуем с точки зрения трех классических оптимизационных задач:

- минимизация давления в месте стыковки протеза с человеком (культеприемнике);
- минимизация количества энергии, потребляемого роботизированной системой;
- минимизация визуальных кинетических различий для приобретения схожести с функционированием человеческой ноги (косметический принцип).

Современные разрабатываемые методологии управления протезом нижней конечности можно разделить на несколько условных классов: 1) управления, построенные на основе PID (proportional integral derivative controller) и имеющие в своей структуре простой автомат [3], предназначенный для переключения фаз шага; 2) предиктивная модель, имеющая в своей основе физическую модель протеза и анализирующая кинематическое соответствие реальной походки заложенной модели; 3) адаптационные техники, использующие статистические данные для поиска наилучших решений.

Последний класс представляет для нас особый интерес, т.к. именно такой тип управляющего алгоритма позволяет решать задачи следующих типов: использование наблюдения для понимания ситуации; выбор наиболее подходящего действия в возникшей ситуации; гибкость с точки зрения адаптации к изменяющейся среде; обучение на собственном опыте.

Именно такие задачи возникают в реальном опыте применения технологий протезирования и реабилитации, ведь каждый человек имеет свое уникальное телосложение, походку, изменяющуюся внешнюю среду (имеется в виду не только тип передвижения и тип местности: вреде песка, асфальта и земли, но также и смена погоды и времен года). Невозможно заложить в систему достаточное количество правил, чтобы она смогла реагировать на абсолютно любые условия в виду огромного количества их комбинаций.

II. НАУЧНАЯ БАЗА

Основной научной базой для проведения этого исследования, стали результаты НИОКР «3.1-ЭКЗОМОДУЛЬ», в рамках которого были разработаны и

апробированы базовые модели экзопротезов с электронным управлением.

В ходе данной НИОКР был получен комплекс сервисов для проведения исследований и создана база знаний о зависимости конечных результатов (значений отклонения биомеханики от нормы) от параметров решения.

Также в рамках данного проекта были сделаны выводы о необходимости активного управления бионическим протезом ноги для увеличения скорости передвижения по неровным поверхностям и увеличения срока рабочего времени аккумулятора [4].

III. ПРЕДЛОЖЕННАЯ МЕТОДИКА

В данной работе мы предлагаем использовать в качестве управления описанной динамической системой модель искусственного интеллекта, реализованную при помощи семантических байесовых сетей. Такая концепция поможет нам достичь удовлетворительной оценки [5] по параметрам, описанным в пункте E, решив поставленные цели.

A. Входные параметры системы

Входными параметрами системы является любой из перечисленных в табл. 1 сигналов. Список достаточно полный, т.к. покрывает собой разный спектр задач. Конечно, для наиболее эффективного управления хочется иметь максимально полную информацию о происходящих процессах, однако это не всегда реализуемо вне лабораторных условий. Электробиологические сигналы используются для повышения качества сопряжения с физиологией пользователя, реализуя пропорциональное управление скоростями в протезе нижней и верхней конечности. Датчики углов, сил и моментов являются основными способами получения информации о механических ограничениях качества работы самого протеза, а также обработки самой циклики шага (рис. 1).

ТАБЛИЦА 1 Типы данных, используемые в качестве входных ПАРАМЕТРОВ

Тип параметра	Источник сигнала	К	Каналов	Частота
Функциональные	Энцефалограмма	1	8	250 Гц
	Электрокардиограмма	1	1	250 Гц
	Электромиограмма	1	4	4 кГц
Кинематические	Датчик угла в коленном суставе	1	1	3 кГц
	Датчик угла в тазобедренном суставе	1	1	3 кГц
	Поперечная сила в протезе	1	1	3 кГц
Динамические	Продольная сила в протезе	1	1	3 кГц
	Значение сагиттального момента	1	1	3 кГц
	Изображение внешнего пространства	2	2	30 Гц
Окружения	Изображение положения зрачка	2	1	200 Гц
	Изображение ближнего айтрекера			

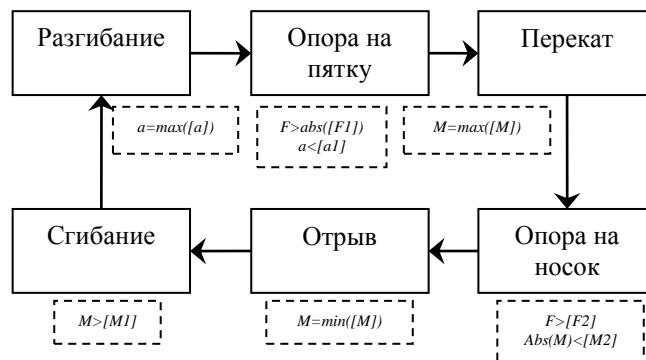


Рис. 1. Биомеханика ходьбы с разбиением на функциональные циклы

Здесь $\alpha 1$ – угол в КС при достижении которого инициируется опирание (одно из условий); $\alpha 2$ – угол в КС при достижении которого режим сидения (одно из условий); $F1$ – осевая сила при достижении которой инициируется опирание (одно из условий); $F2$ – осевая сила достижение которой означает фазу опоры (одно из условий для подгибания); $M1$ – малый момент при достижении которого инициируется подгибание (одно из условий); $M2$ – момент при достижении которого инициируется фазу переноса.

Изображения внешнего пространства и определение направления взгляда в пространственных координатах [6] может быть использовано для автоматического переключения между режимами преодоления препятствий (например, переключение на подъем по лестнице).

B. Архитектура системы управления

Архитектура системы управления [7], представленная на рис. 2, устанавливает несколько отдельных процедурных блоков: блок подготовки информации (для статистического анализа); блок построения семантической конструкции; оптимизатор динамической структуры сети; блок распространения вероятностей.

Рассмотрим каждый архитектурный блок более подробно.

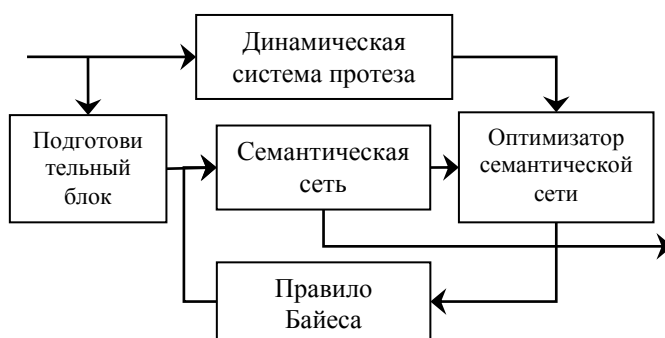


Рис. 2. Архитектура интеллектуального контура управления динамической системы

С. Представление данных

В общем случае, каждый набор данных добавляется в семантическую сеть в виде фрагмента сети, представляющего собой однородные классы данных. Формат представления данных для оптимизатора сети необходимо выстраивать в виде ненаправленного ациклического графа, представленного на рис. 3.

Входные данные, имеющие единичную размерность, выделялись из дискретизированного потока сигнала в виде окна [8] и использовали только одноуровневую сеть. Для сигналов биологической природы величина окна устанавливалась равной 500 миллисекундам [9]. Например, в случае электроэнцефалограммы величина такого окна составляла 128 сэмплов.

Изображения и многомерные сигналы для представления используют два уровня, тогда как во втором уровне описывается связь элементов структуры с его размерностями. Подробнее можно прочитать в [10].

Д. Правила организации сети

Байесова сеть представляет собой набор переменных Y , имеющих конечное количество состояний, и набор направленных ребер C между переменными. При этом переменные вместе со связями формируют ациклический направленный граф. Оптимизатор семантической сети следит за соблюдением этих требований [11].

Добавляя в граф новые вершины, мы должны убедиться в первую очередь в отсутствии дублирующих друг друга структур. Это правило называется правилом исключения эквивалентов (рис. 4А) и разработано исключительно для оптимизации размера семантической сети.

Другое правило диктует необходимость определения, когда один процесс является частью другого процесса. Оно получило название правила конкретизаций (рис. 4В).

Последнее правило направлено на выделение различных конечных состояний переменной и называется правилом абстракций (рис. 4С).

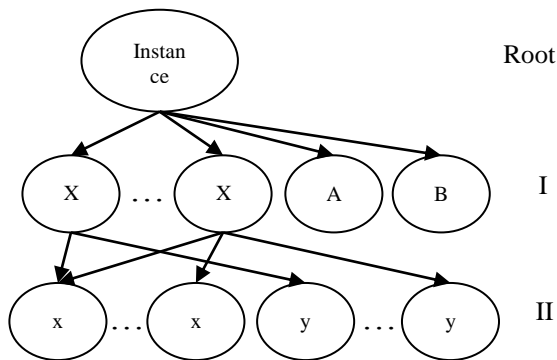


Рис. 3. Общий вид представления инстанции данных

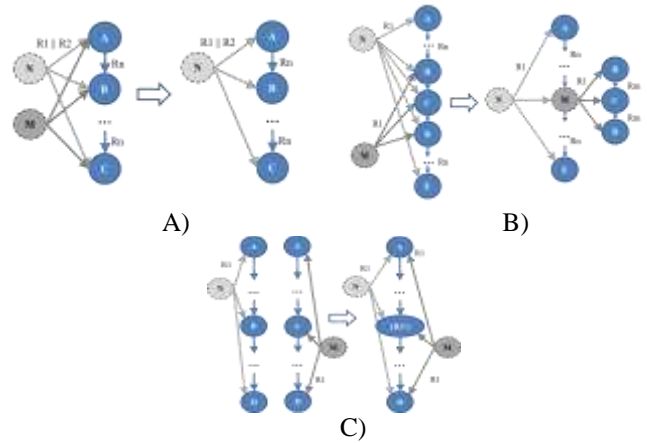


Рис. 4. Правила оптимизации структуры данных семантической сети

Е. Функциональные действия

Полученную семантическую структуру теперь необходимо привести к дереву связности [12], для этого произведем несколько простых действий:

1. Введем в граф условное распределение:

$$p(Y) = \prod_i p(Y_i | Y_{pa(i)}) = \prod_i f_i(Y_{C_i}),$$

где $C_i = i \cup pa(i)$ и $f_i(Y_{C_i}) = p(Y_i | Y_{pa(i)})$;

2. Введем вершины-доказательства (например, D – импульс n100, C – импульс p300):

$$f_D(D) = \begin{cases} 1 & \text{if } (D) = n100 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_C(C) = \begin{cases} 1 & \text{if } (C) = p300 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

3. Преобразуем граф в ненаправленный и выполним морализацию:

$$p(Y) = \frac{1}{Z} \prod_i f_i(Y_{C_i});$$

4. Триангулируем граф, чтобы избежать самовозбуждения при передаче контекстных сообщений для распространения вероятностей.

5. Теперь преобразуем триангулированный граф в дерево связности, обозначив вершины – гранями, а связи – смежными ребрами этих граней.

В приведенном дереве связности возможно распространение вероятностей посредством сообщений, где сообщение может быть рекурсивно вычислено по следующей формуле:

$$M_{i \rightarrow j}(Y_j) = \sum_{Y_i} f_{(ij)}(Y_i, Y_j) \prod_{k \in ne(i) \setminus j} M_{k \rightarrow i}(Y_i)$$

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИЙ

Для апробации разработанного алгоритма была построена классовая модель на языке Java высокого уровня. Также были реализованы методы оптимизации семантической структуры в качестве фаз (1 – конкретизация; 2 – абстракции; 3 – эквиваленты). Данные полученных экспериментов представлены на рис. 5 и 6.

В качестве входного сигнала использовалась запись ЭЭГ и запись динамики шага, при этом результаты в рамках оцениваемых параметров были получены идентичные.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модели управления динамическими системами при помощи байесовых сетей имеют эффективные механизмы решения с конкурентными теоретическими параметрами, что делает их весьма популярными. Тем не менее, классические байесовы сети имеют много ограничений, возникающих при планировании базы знаний.

Предложенная модель позволяет упростить организацию и увеличить применяемость. А введение оценки помогает формализовать качество адаптации построенного алгоритма к поставленной задаче.

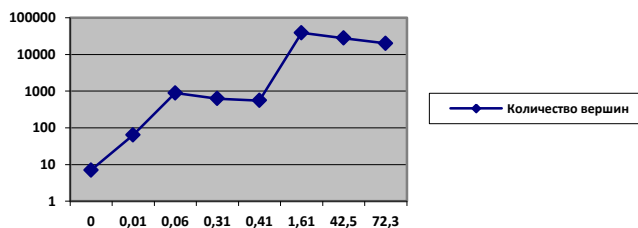


Рис. 5. Изменение количества вершин в процессе симуляции обучения по сигналу

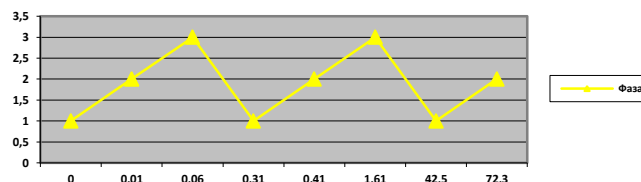


Рис. 6. Смена фаз в процессе симуляции обучения по биологическому сигналу

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] I-Tech Education and Publishing, Rehabilitation Robotics, Vienna: I-Tech Education and Publishing, 2007.
- [2] Питкин М.Р. Теория построения и практика синтеза антропоморфных протезов нижних конечностей. Санкт-Петербург, 2006, 205 с.
- [3] Brevik P. Two-Axis Reaction Wheel Inverted Pendulum. Norwegia, 2017.
- [4] Mezghani E. Towards Autonomic and Cognitive IoT Systems, Application to Patients' Treatments Management. Toulouse, 2017.
- [5] Tjen-Sien L., Wei-Yin L., Yu-Shan S. A Comparison of Prediction Accuracy, Complexity, and Training Time of Thirty-three Old and New Classi. Machine Learning. pp. 203-229, 2000.
- [6] Favorskaya M.N., Jain L.C. Computer Vision in Control Systems. V.1. Switzerland. Springer. 2015.
- [7] Leitch R. Knowledge based control: selecting the right tool for the job. IFAC Artificial Intelligence in Real-Time. Delft. 1992.
- [8] Bhardwaj S., Vrudhula S., Blaauw D. Probability Distribution of Signal Arrival Times Using Bayesian Networks. IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. p. 1784, November 2005.
- [9] IEEE Press Handbook of neural engineering. Canada. IEEE Press, 2007.
- [10] Гусев А.П. Экспериментальный комплекс нейроинтерфейса с использованием видеоаналитики. Москва, 2014.
- [11] Кулик Б.А. Обобщенный подход к моделированию и анализу интеллектуальных систем на основе алгебры кортежей. Санкт-Петербург, 2008, 37 с.
- [12] Jensen F.V., Nielsen T.D. Bayesian Networks and Decision, Denmark: Springer, 2007.