

при исследовании неврологических заболеваний и в оценке эффективности их лечения. Старший показатель Ляпунова хорошо подходит для разделения нормы и патологии как таковой. Можно заключить, что нелинейные характеристики ЭЭГ имеют высокую диагностическую ценность при исследовании данных неврологических патологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зенков Л.Р.* Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии). – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1996. – 358 с.
2. *Жадин М.Н.* Биофизические механизмы формирования электроэнцефалограммы. – М.: Наука, 1984. – 197 с.
3. *Меклер А.А.* Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ // Вестник новых медицинских технологий – 2007. – Т. XIV, № 1. – С. 73.
4. *Hegger R., Kantz H. and T. Schreiber,* Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package, CHAOS 9, 413 (1999).
5. *Шустер Г.* Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 240 с.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. доцент Н.В. Авилова.

Ермолаева Ирина Олеговна – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации»; e-mail: irisa-irisa@bk.ru; 346779, Ростовская область, Азовский район, село Кулешовка, ул. Пролетарская, 29, кв. 17; тел.: 89614016622; кафедра медицинской и биологической физики; аспирант.

Омельченко Виталий Петрович – e-mail: vitaly.omelchenko@mail.ru; 344010 г Ростов-на-Дону, пр-кт Ворошиловский, 40/12 кв. 55, тел.: 88632504184; кафедра медицинской и биологической физики; зав. кафедрой; д.б.н.; профессор.

Ermolaeva Irina Olegovna – Rostov State Medical University of Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation; e-mail: irisa-irisa@bk.ru; 29, Proletarskaya street, Kuleshovka village, Azov area, Rostov region, 346779, Russia; phone: +79614016622; the department of medical and biological physics; postgraduate student.

Omelchenko Vitaly Petrovich – e-mail: vitaly.omelchenko@mail.ru; 40/12, Voroshilovsky av., ap. 55, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phone: +78632504184; the department of medical and biological physics; head the department; dr. of biolog. sc.; professor.

УДК 004.8

В.В. Истомин, М.Ю. Михеев

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ГРУПП АВТОНОМНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

Работа связана с решением задачи синтеза информационных моделей поведения групп биомедицинских автономных интеллектуальных агентов и исследования методов машинного обучения, обеспечивающих повышение достоверности прогноза их поведения с помощью многоагентных систем на основе применения бионических принципов, методов и моделей роевого интеллекта. Разработанная многоагентная система моделирует поведение групп автономных интеллектуальных агентов по разработанной методике, удовлетворяя предложенным критериям достоверности, отличаясь сформированной структурой системы и набором разработанных специализированных агентов, что обеспечивает возможности для моделирования системы биомедицинской групповой робототехники с помощью автономных интеллектуальных агентов.

Многоагентные системы; интеллектуальные агенты; моделирование поведения; роевой интеллект; групповая робототехника.

V.V. Istomin, M.U.Mikheev

**DEVELOPMENT OF BEHAVIOR MODELS FOR GROUPS
OF AUTONOMOUS INTELLIGENT AGENTS FOR BIOMEDICAL SYSTEMS:
A SUBSTANTIATION STUDY**

The work associated with the problem of synthesis of the information models for behavior of groups of biomedical autonomous intelligent agents and machine learning methods for ensuring the improvement of the reliability prediction of their behavior with the means of multi-agent systems based on the bionic principles, methods and models of swarm intelligence. The developed multi-agent system simulates the behavior of groups of autonomous intelligent agents by means of developed technique, meeting the proposed reliability criteria, differing in the structure formed by the system and a developed set of specialized agents, which provides opportunities for modeling biomedical swarm robotics system on autonomous intelligent agents.

Multi-agent systems; intelligent agents; behavior modeling; swarm intelligence; swarm robotics.

В данной работе обосновывается создание информационной модели, прогнозирующей поведение больших самоорганизующихся групп автономных интеллектуальных агентов. Прогнозирование поведения групп основывается на алгоритме их управления, использующем математический аппарат теории роевого интеллекта. Создание информационной модели позволит произвести качественную оценку достоверности прогнозирования поведения. После обоснованного подтверждения практической применимости разработанного алгоритма станет возможным перспективное внедрение его в системы групповой робототехники, в которых роль автономных интеллектуальных агентов играют упрощенные робототехнические устройства.

Так как одной из наиболее привлекательных научно-технических областей для потенциального внедрения подобных робототехнических систем является биомедицина, то с первых этапов разработки информационной модели необходимо учитывать специфику биомедицинских систем. Предполагается, что робототехническая система, состоящая из группы миниатюрных биомедицинских роботов, будет способна решить комплексные задачи, стоящие перед современной высокотехнологичной медициной в области удаленной диагностики, терапии и хирургии. Таким образом, при создании автономных интеллектуальных агентов должны быть учтены характеристики, отвечающие за особенности функционирования элементов будущих робототехнических систем в данной предметной области.

Целью работы является решение задачи синтеза и исследования методов машинного обучения, обеспечивающих повышение достоверности прогноза поведения групп биомедицинских автономных интеллектуальных агентов с помощью многоагентных систем на основе применения бионических принципов, методов и моделей роевого интеллекта.

В групповой робототехнике применяются большие группы миниатюрных роботов, формирующие децентрализованную систему. Роботы, составляющие группы, чаще всего имеют значительные аппаратные ограничения. Все роботы являются автономными и действуют на основе доступной им локальной информации. Критическими факторами для реализации систем групповой робототехники являются миниатюризация и стоимость. Следовательно, простоте каждого члена группы должно уделяться особое внимание, и актуален подход по использованию роевого интеллекта для достижения значимого поведения на уровне группы, а не на индивидуальном уровне [1].

В зарубежной литературе неоднократно обсуждался подход, заключающийся в разработке роевых алгоритмов на основе моделирования. Прогнозирование на основе модели с результатами, которые можно получить достаточно быстро, предназначено для поддержки разработки на раннем этапе, до реализации на роботах.

Поиск оптимальных значений может быть проведен даже по полным наборам возможных значений параметров. Предлагаемый в данной работе модельный подход описывается с помощью точного отображения пространства и формальных связей между микро- и макроуровнями.

Системы, состоящие из групп роботов, являются нелинейными, и могут демонстрировать сложные формы поведения. Дополнительная сложность обусловлена большим количеством взаимодействий между роботами, эффекты от которых в общем случае тяжело поддаются оценке и прогнозу.

Для систематического изучения поведения группы роботов в исследовательских целях необходима разработка методик, способных обеспечить достоверный прогноз поведения группы, когда заданы только свойства отдельных её членов [2]. Тем не менее оценить уровень достоверности прогноза поведения, определяемого конкретной методикой, не представляется возможным без использования соответствующих вспомогательных критериев достоверности. Из этого следует, что их разработка является актуальной и необходима для качественного и объективного определения достоверности методик прогнозирования поведения.

Решение задач планирования и прогнозирования поведения может быть произведено с помощью агентного моделирования групп автономных интеллектуальных агентов, играющих роль роботов, способных к планированию и выполняющих набор действий в определенном порядке для достижения своей цели [3]. Моделирование поведения группы биомедицинских роботов с помощью системы, состоящей из автономных интеллектуальных агентов актуально и с экономической точки зрения, принимая во внимание высокую экономическую стоимость реализации сценариев групповой робототехники с реальными роботами.

Агентное моделирование может быть реализовано с помощью многоагентной системы [4]. Хотя традиционно в рамках таких систем исследуются интеллектуальные агенты, в роли их агентов также могут выступать и роботы. Данный метод имитационного моделирования исследует поведение децентрализованных автономных интеллектуальных агентов и то, как их поведение определяет поведение всей системы в целом. Поведение агентов определяется на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов [5]. Таким образом, в условиях необходимости реализации агентного моделирования поведения групп биомедицинских роботов будет актуальна разработка многоагентной системы. Кроме того, в ходе агентного моделирования необходимо решение задачи по определению структуры и типов агентов, составляющих соответствующую систему.

Так как методы имитации и моделирования большого числа биомедицинских роботов на данный момент все еще являются несовершенными и достаточно сложными, их результаты часто оказываются неточными [6]. Поэтому решение задачи качественной программной реализации многоагентных систем, состоящих из групп автономных интеллектуальных агентов на основе усовершенствованных методов моделирования поведения, является актуальной.

Таким образом, имеет место противоречие между недостатками существующего аппарата моделирования многоагентных систем и требованиями в области достоверности прогнозирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о необходимости повышения достоверности результатов прогнозирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов на основе совершенствования информационных моделей многоагентных систем.

Так как классическое программирование применительно к группам роботов является сложной задачей, возникла необходимость в альтернативном подходе. Если исключить применение эволюционных или обучающих алгоритмов, единственно возможным является модельный подход. Основной его идеей является обес-

печение поддержки разработчика алгоритма с помощью инструмента, который сможет прогнозировать поведение, заданное исполняемым алгоритмом, с наивысшей возможной точностью и в кратчайший период времени.

Базовая модель расположения роботов основана на принципе броуновского движения и составлена из пар соответствующих уравнений [7]. С одной стороны, используется уравнение Ланжевена, дифференциальное уравнение со стохастическими производными (1). С помощью него дается локальное, или микроскопическое описание конкретных траекторий:

$$\frac{dR}{dt} = A(r, t) + B(r, t)F(t), \quad (1)$$

где r – местоположение; t – время; $A(r, t)$ – смещение; $B(r, t)$ – коэффициент диффузии; $F(t)$ – нормализованная шумовая составляющая.

На рис. 1 представлена иллюстрация уравнения (1) с помощью четырех одномерных траекторий, начинающихся при $r = 0$, со смещением и без него.

С другой стороны, применяется уравнение Фоккера-Планка (прямое уравнение Колмогорова), дифференциальное уравнение с частными производными (2), которое может быть аналитически выведено из уравнения Ланжевена. Оно с помощью плотностей распределения вероятностей дает глобальное, или макроскопическое описание.

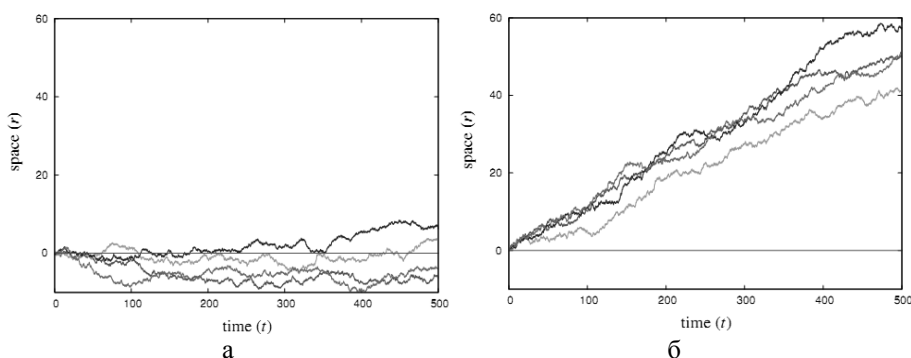


Рис. 1. Траектории, построенные с помощью уравнения Ланжевена в одном измерении: а – четыре траектории при $A = 0$; б – четыре траектории при $A = 0,1$

$$\frac{\partial \rho(r, t)}{\partial t} = -\nabla(A(r(t), t)\rho(r, t)) + \frac{1}{2}Q\nabla^2(B^2(r(t), t)\rho(r, t)), \quad (2)$$

где $\rho(r, t)dx dy$ – вероятность появления частицы в местоположении r внутри прямоугольника, заданного dx и dy в момент времени t ; ∇ – дифференциальный оператор.

Уравнение (2) проиллюстрировано на рис. 2, изображающем плотность распределения вероятности ρ в одномерном пространстве при смещении $A = 0,1$; диффузии $B = 0,6$ и установке, близкой к δ -функции в $r = 0$. Линия $r = At = 0,1t$ показывает траекторию наивысшей вероятности.

На рис. 3 изображена плотность распределения вероятности ρ , описывающая вероятность встречи частицы, начавшей движение в момент времени $t = 0$ и $r = 0$ в заданной точке в одномерном пространстве, рассчитанную с помощью уравнения Фоккера-Планка для смещения $A = 0,1$ и диффузии $B = 0,3$. На плоскость rt нанесены четыре траектории, рассчитанные с помощью соответствующего уравнения Ланжевена.

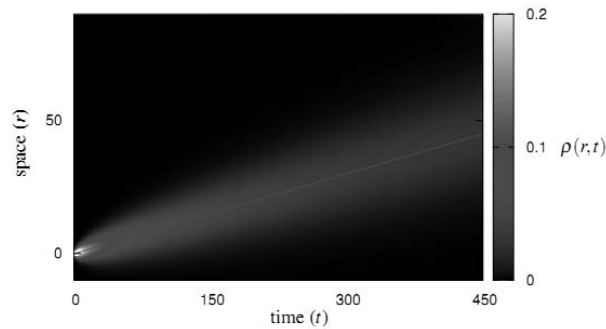


Рис. 2. Плотность распределения вероятности в одномерном пространстве, вычисленная с помощью уравнения Фоккера-Планка

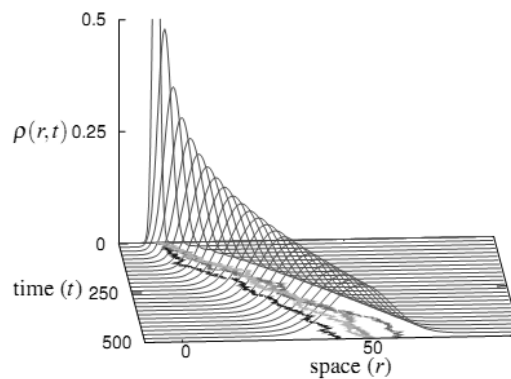


Рис. 3. Связь плотности распределения вероятности с траекториями

В рамках данной работы физическая модель расширяется до обобщенной модели сообщающихся групп роботов, основанной на эвристических рассуждениях. Такой модельный подход имеет большое количество применений, однако адаптация к специальному алгоритму управления требует отдельного этапа моделирования.

В результате выполнения данной работы разработана информационная модель достоверного прогнозирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов, построенная на теории искусственного роевого интеллекта, обосновывающая перспективность разработки системы биомедицинской групповой робототехники, позволяющей с определенной степенью достоверности предсказывать результат выполнения поставленных перед ней специфических задач. Кроме того, определяются критерии достоверности прогнозирования поведения, характеризуемые универсальностью и точностью в требуемых пределах, что позволит сформировать механизм оценки степени достоверности прогнозирования поведения системы автономных интеллектуальных агентов, реализованной на основе той или иной методики.

Рис. 4,а иллюстрирует агентно-ориентированный подход к определению плотности распределения роботов. В его рамках считается, что роботы близко расположены, если они находятся на расстоянии в $r_{\text{sensor}}/2$. Таким образом, оценочная плотность роботов в полном радиусе действия сенсоров равна $\frac{6}{\pi r_{\text{sensor}}^2}$. Пространственно-ориентированный подход к определению плотности распределения роботов проиллюстрирован на рис. 4,б, оценка произведена на основе гистограммы.

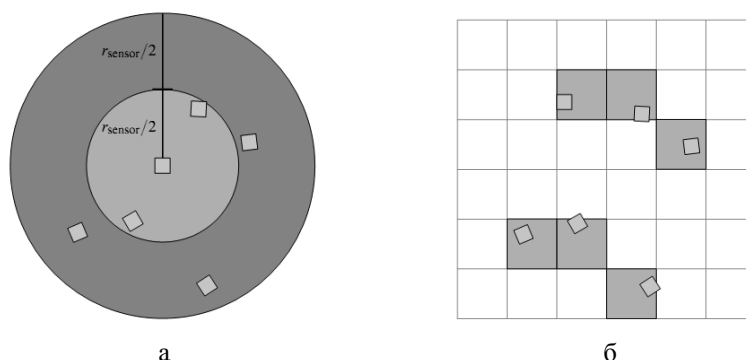


Рис. 1. Подходы к определению плотности распределения роботов:
 а – агентно-ориентированный; б – пространственно-ориентированный

Разработанная многоагентная система моделирует поведение групп автономных интеллектуальных агентов по разработанной методике, удовлетворяя предложенным критериям достоверности, отличаясь сформированной структурой системы и набором разработанных специализированных агентов, что обеспечивает возможности для моделирования системы биомедицинской групповой робототехники с помощью автономных интеллектуальных агентов. Программная реализация разрабатываемой многоагентной системы отличается качественным и эффективным представлением разработанной многоагентной системы с возможностью удаленной работы. Подобная реализация подтверждает эффективность разработанной методики и доказывает возможность практического внедрения систем биомедицинских роботов с прогнозированием поведения, основанных на данной методике.

Разработанная модель апробируется на основе нескольких сценариев групповой робототехники с применением моделируемых роботов, таких как адаптивное объединение на основе столкновений, коллективное восприятие, коллективный фототаксис, фуражировка (поиск ресурсов) с помощью виртуальных феромонов, а также древовидные объединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Истомин В.В.* Прогнозирование поведения групп автономных интеллектуальных агентов на основе теории многоагентных систем // Инженерный Вестник Дона. – 2011. – № 4.
2. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М. Физматлит, 2009.
3. *Russell, Stuart J.; Norvig, Peter,* Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
4. *Michael Wooldridge,* An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons Ltd, 2002. – 366 p.
5. *Hong Lin,* Architectural Design of Multi-Agent Systems: Technologies and Techniques, Information Science Reference Hershey-New York, 2007.
6. *Farshad Arvin.* Khairulmizam Samsudin, Abdul Rahman Ramli, “Development of a Miniature Robot for Swarm Robotic Application” // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 1, № 4. – P. 436-442.
7. *Hamann H.* Space-Time Continuous Models of Swarm Robotic Systems, Cognitive Systems Monographs, volume 9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Б. Старченко.

Истомин Виктор Владимирович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенская государственная технологическая академия» в г. Пензе; e-mail: v.ist@mail.ru; 440039, г. Пенза, проезд Байдукова, ул. Гагарина, 1а/11; тел.: 88412496009; кафедра информационных технологий и систем; аспирант.

Михеев Михаил Юрьевич – e-mail: mix1959@gmail.com; кафедра информационных технологий и систем; д.т.н.; профессор.

Istomin Victor Vladimirovich – Federal State-Owned State-Financed Educational Establishment of Higher Vocational Education “Penza State Technological Academy”; e-mail: v.ist@mail.ru; 1A/11, Baidukova/Gagarina, Penza, 440039, Russia; phone: +78412496009; the department of information technologies and systems; postgraduate student.

Mikheev Mikhail Ur’evich – e-mail: mix1959@gmail.com; the department of information technologies and systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 57.087

Л.И. Калакутский, А.А. Федотов, Е.П. Лебедева

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ БИОСИГНАЛОВ СЕРДЕЧНОГО РИТМА С ЦЕЛЬЮ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ

Рассматривается методика обработки биосигналов сердечного ритма (сигнал биоэлектрической активности сердца и сигнал периферической артериальной пульсации крови) для диагностики состояния эластичности коронарных артерий. Предложены показатели для оценки состояния эластичности коронарных артерий, основанные на спектральных различиях пульсового и сердечного ритмов. Была проведена клиническая апробация разработанной методики обработки биосигналов. С этой целью были сформированы 2 группы добровольцев: первая группа состояла из людей с нормальным состоянием коронарных артерий, вторая – из людей с патологическим состоянием коронарных артерий. Были получены достоверные и статистически значимые различия в значениях предлагаемых диагностических показателей для двух групп обследуемых.

Стеноз коронарных артерий; вариабельность сердечного ритма; проба с контролируемым дыханием.

L.I. Kalakutskiy, A.A. Fedotov, E.P. Lebedeva

METHOD OF PROCESSING HEART RATE BIOSIGNALS FOR DIAGNOSIS STATE OF CORONARY ARTERIES

The method of processing heart rate biosignals (the signal of bioelectrical heart activity and distal arterial pulse signal) for diagnosis coronary artery elasticity is considered. Indices to assess the elasticity of the coronary arteries based on spectral differences between pulse and heart rhythms were proposed. Clinical testing of concerned method was carried out. For this purpose, two groups of volunteers were formed: one group is consisted of people with a normal state of the coronary arteries, the second is consisted of people with a pathological condition of the coronary arteries. Reliable and statistically significant differences in the values of the proposed diagnostic indices for two groups of examinees were obtained.

Stenosis of the coronary arteries; heart rate variability; test with controlled breathing.

Одним из возможных подходов к диагностике состояния эластичности артериальных сосудов может являться определение показателей вариабельности сердечного ритма на основе обработки сигнала биоэлектрической активности сердца в ходе проведения проб с контролируемым дыханием [1]. Известно, что временная