

4. Shcherbakov M. V., Yanovskiy T. A., Brebels A., Shcherbakova N. L. Metodika vyyavleniya potentsiala energosberezheniya na osnove intellektualnogo analiza dannykh [Method of identifying power saving potential on the basis of intelligent data mining]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2011, no. 2, pp. 51–55.

5. Abdella M. I., Marwala T. The use of genetic algorithms and neural networks to approximate missing data in database. *Computing and Informatics*, 2006, vol. 24, pp. 1001–1013.

6. Mohamed S., Marwala T. Neural network based techniques for estimating missing data in databases. *The 16th Annual Symposium of the Patten Recognition Association of South Africa*. Langebaan, 2005, pp. 27–32.

7. Qiao W., Gao Z., Harley R. G. Continuous on-line identification of nonlinear plants in powersystems with missing sensor measurements. *Proc. of Intel. Joint Conf. on Neural Networks*, 2005, pp. 1729–1734.

8. Thompson B. B., Marks R. J., El-Sharkawi M. A. On the contractive nature of autoencoders: Application to sensor restoration. *Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2003, vol. 4, pp. 3011–3016.

9. Troyanskaya O., Cantor M., Sherlock G. et al. Missing value estimation methods for DNA microarrays. *Bioinformatics*, 2001, vol. 17, pp. 520–525.

УДК 004.8

АЛГОРИТМ ПОВЕДЕНИЯ ГРУПП АВТОНОМНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Истомин Виктор Владимирович, аспирант, Пензенский государственный технологический университет, 440039, Российская Федерация, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: v.ist@mail.ru

Данная работа является одним из этапов решения задачи синтеза информационной модели поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем. Предварительно была произведена постановка задачи и ее обоснование, затем был разработан математический аппарат, удовлетворяющий требованиям моделирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов.

На данном этапе работы был создан алгоритм поведения, описывающий последовательные целенаправленные действия автономных интеллектуальных агентов в ходе выполнения поставленной перед ними задачи. Важной особенностью разработанного алгоритма является то, что он учитывает специфику биомедицинских систем.

В дальнейшем предполагается провести экспериментальное исследование алгоритма и оценить адекватность прогнозирования на его основе поведения групп агентов.

Ключевые слова: информационная модель, многоагентные системы, интеллектуальные агенты, моделирование поведения, роевой интеллект, групповая робототехника, принятие решений

ALGORITHM OF BEHAVIOR OF GROUPS OF AUTONOMOUS INTELLIGENT AGENTS FOR BIOMEDICAL SYSTEMS BASED ON THE THEORY OF SWARM INTELLIGENCE

Istomin Viktor V., post-graduate student, Penza State Technological University, 1a/11 pr. Baydukova/Gagarin St., Penza, 440039, Russian Federation, e-mail: v.ist@mail.ru

This work is one of the stages of solution of the problem of synthesis of the information model of behavior of groups of autonomous intelligent agents for biomedical systems. Before was made a formulation

of the problem and its justification, then was developed the mathematical apparatus that meets the requirements of the simulation of the behavior of groups of autonomous intelligent agents.

At this stage, has been developed the algorithm of behavior that describes the sequential purposeful actions of autonomous intelligent agents during the execution of their task. An important feature of the developed algorithm is that it takes into account the specificity of biomedical systems.

After the development of this algorithm it is necessary to conduct an experimental research of the model to evaluate the adequacy of behavior forecast.

Keywords: information model, multi-agent systems, intelligent agents, modeling behavior, swarm intelligence, robotics group, decision-making

В данной работе описана разработка алгоритма поведения больших самоорганизующихся групп автономных интеллектуальных агентов. Прогнозирование поведения таких групп основывается на алгоритме управления, использующем математический аппарат теории роевого интеллекта [11], как это показано на рис. 1.

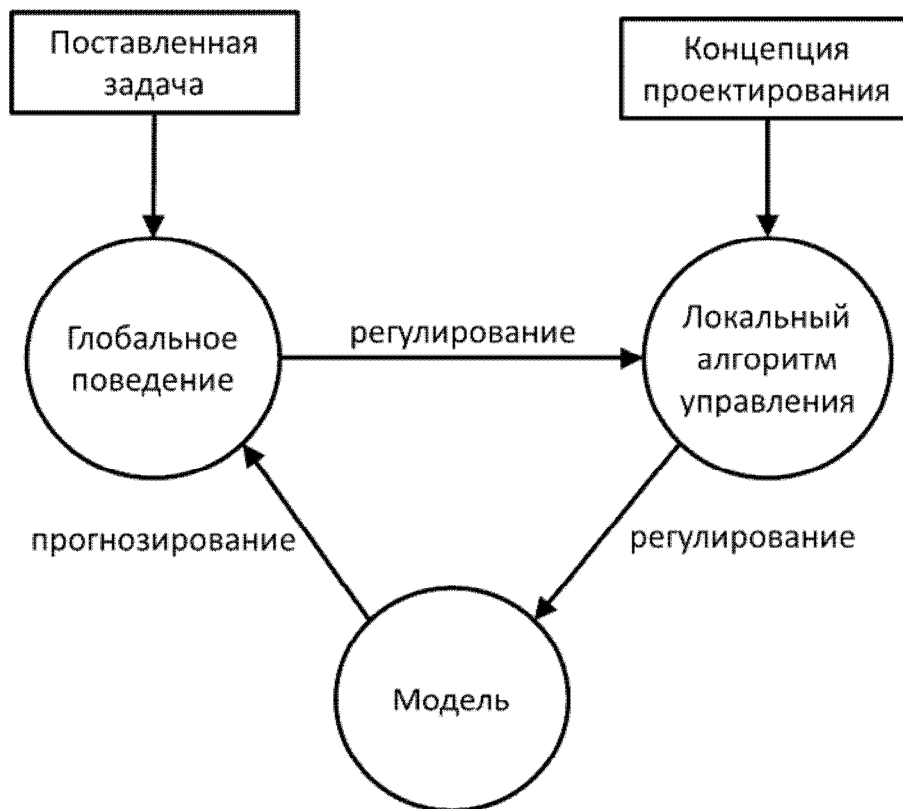


Рис. 1. Иллюстрация роли использования моделирования в разработке роевых алгоритмов

В случае практической реализации разработанного алгоритма станет возможным потенциальное внедрение его в системы групповой робототехники, в которых роль агентов играют упрощенные робототехнические устройства [5].

В групповой робототехнике применяются большие группы миниатюрных роботов [13], формирующих децентрализованную систему. Роботы, составляющие такие группы, чаще всего имеют значительные аппаратные ограничения. Такие роботы являются автономными и действуют на основе доступной им локальной информации. Критическими факторами для реализации систем групповой робототехники являются миниатюризация и стоимость

[9]. Следовательно, вопросам простоты каждого члена группы должно уделяться особое внимание. Поэтому актуален подход, основанный на использовании роевого интеллекта для достижения требуемого поведения (целей) на уровне всей группы, а не на индивидуальном уровне, соответствующем отдельным роботам [8].

Целью настоящей работы была разработка алгоритма поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем (БМС) с помощью подходов, разработанных для многоагентных систем. При этом применяются бионические принципы, методы и модели теории роевого интеллекта.

Одной из наиболее привлекательных областей для потенциального внедрения подобных робототехнических систем является биомедицина. Поэтому с первых этапов разработки информационной модели нами учитывалась специфика БМС. Предполагается, что робототехническая система, состоящая из группы миниатюрных биомедицинских роботов, будет способна решать комплексные задачи, стоящие перед современной высокотехнологичной медициной в области удаленной диагностики, терапии и хирургии [1]. Использование таких систем можно считать одним из направлений развития высокотехнологичных видов медицинской помощи [7]. При создании автономных интеллектуальных агентов должны быть учтены характеристики, определяющие особенности функционирования элементов будущих робототехнических систем в данной предметной области. Для эмпирического изучения поведения группы микророботов в БМС необходима разработка алгоритма, описывающего поведение группы с высокой точностью, что обеспечит возможность качественного прогнозирования результата деятельности микророботов. При этом должны быть заданы только свойства отдельных членов группы, т.е. микророботов, способных к планированию и выполняющих набор действий в определенном порядке для достижения своих целей [6] (рис. 2).

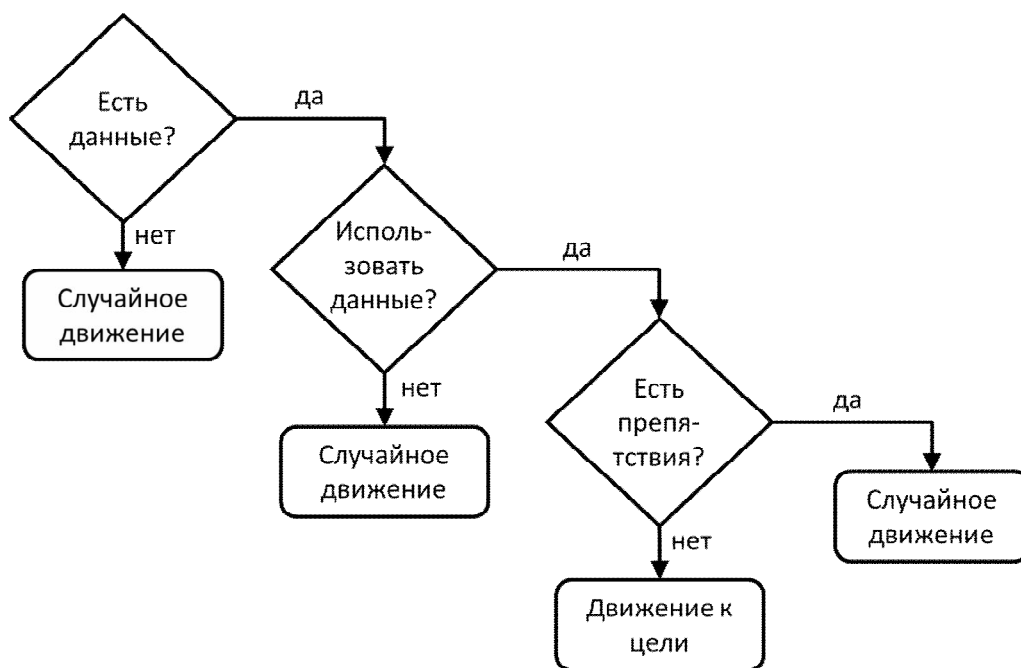


Рис. 2. Алгоритм, иллюстрирующий поведение (перемещение) автономных интеллектуальных агентов в условиях неопределенности

Для оценки уровня достоверности прогноза поведения на основе рассматриваемого алгоритма необходима разработка системы «критериев достоверности». Разработка такого алгоритма в совокупности с системой критериев является актуальной задачей, необходимой для объективного определения достоверности прогнозирования поведения [12].

В предыдущих работах [1, 3–5] был представлен математический аппарат, решающий задачу математического моделирования поведения во времени группы элементарных микроботов в условиях шума. Такой аппарат позволяет реализовать алгоритм для коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток, а также составляет основу для многоуровневой информационной модели поведения групп автономных интеллектуальных агентов. Базовая модель расположения микроботов основана на принципе броуновского движения и составлена из пар уравнений Ланжевена и Колмогорова [10]. С одной стороны, используется уравнение Ланжевена в виде дифференциального уравнения со стохастическими производными. С помощью него дается локальное описание конкретных траекторий на микроуровне:

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

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

С другой стороны, применяется прямое уравнение Колмогорова (уравнение Фоккера-Планка), т.е. дифференциальное уравнение с частными производными, которое может быть получено из уравнения Ланжевена. Оно с помощью плотностей распределения вероятностей дает глобальное описание ансамблей на макроуровне:

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

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

На рис. 3 показана связь между микроуровнем (траекториями) и макроуровнем (ансамблями).

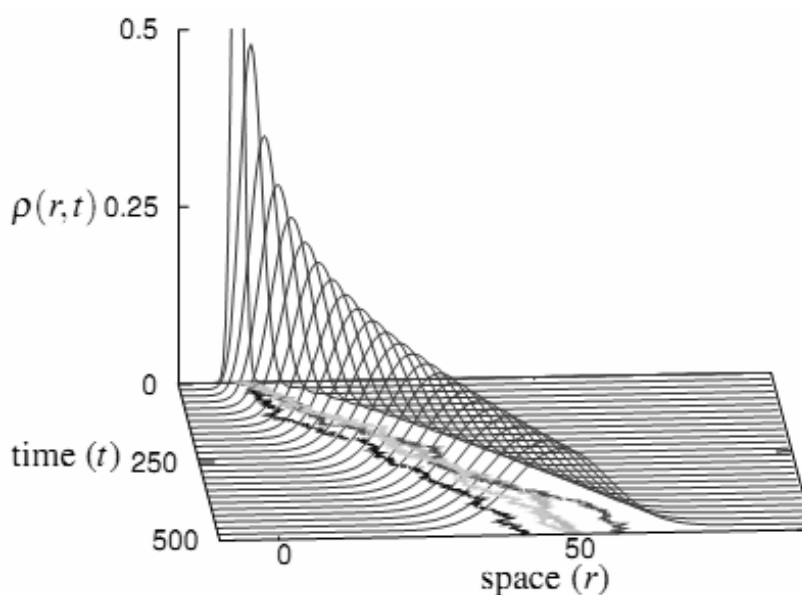


Рис. 3. Взаимосвязь плотности распределения вероятности $\rho(r, t)$ с траекториями движения микроботов

На данном рисунке изображена плотность распределения вероятности ρ , описывающая вероятность появления микроробота, начавшего движение в момент времени $t = 0$ и $r = 0$ в заданной точке в одномерном пространстве – расчет осуществлялся с помощью уравнения Фоккера – Планка для смещения $A = 0,1$ и диффузии $B = 0,3$. На плоскость « $r-t$ » нанесены траекторная расщепленная процессорная соответствующей уравнения. Наблюдения групп микророботов, основанной на эвристических рассуждениях. Поэтому для использования в алгоритме, описывающем поведение, группам интеллектуальных агентов в БМС требуется адаптация модели – в частности, выбор таких коэффициентов A и B в уравнениях (1) и (2), которые бы удовлетворяли специфике использования в БМС [3].

Для разработки и верификации алгоритма поведения микророботов, а также определения методики проведения экспериментального исследования необходимо проанализировать планируемые (ожидаемые) результаты эксперимента. В данном случае предполагается узнать, будут ли микророботы действовать так, как от них ожидается, достоверно ли прогнозируются их действия усовершенствованным алгоритмом. Кроме того, необходимо получить сведения о том, насколько различается степень достоверности при моделировании с использованием усовершенствованного алгоритма по сравнению с базовым вариантом алгоритма. При этом учитываются некоторые ограничения, введенные для соответствия микророботов специфическим условиям их использования в БМС.

Так, с помощью разрабатываемого алгоритма предполагается промоделировать поведение групп микророботов, предназначенных для поиска пораженных участков тканей и обезвреживания больных клеток. Будем считать, что микророботы уже попали в нужную область внутри человеческого тела и эксперимент проходит на микроскопическом уровне. В качестве целевых областей для локализации и обезвреживания микророботами «принимаются» клетки абстрактного злокачественного новообразования, так как в данной работе исследуется обобщенный алгоритм поведения больших групп микророботов в БМС, а не конкретные инженерно-технические решения.

Тем не менее необходимо ввести ограничения, обуславливающие предметную область применения алгоритма. Наиболее значимым из них является ограничение по продолжительности проведения эксперимента. Практическим смыслом этого условия является ограниченный запас энергии, которой может распоряжаться микроробот для осуществления передвижения, взаимодействия и обезвреживания пораженных клеток тканей. Микророботы, израсходовавшие имеющийся у них первоначальный запас энергии (условный), прекращают деятельность. Моменты такого прекращения в общем случае различны для разных микророботов. Вычислительный эксперимент заканчивается, когда не остается ни одного дееспособного (т.е. обладающего энергией) микроробота.

Предполагается, что при разработке микророботов, предназначенных для применения внутри тела человека, будет решена инженерно-техническая задача конструирования их из биоразлагаемых материалов – такую возможность доказывают современные исследования. Поэтому с практической точки зрения можно считать, что через некоторое время после окончания вычислительного эксперимента происходит «рассасывание» микророботов внутри организма – даже если они не выполнили свою задачу. Таким образом, процесс моделирования поведения микророботов с условием определенного времени окончания эксперимента и подведения его итогов отражает требование о необходимости завершения микророботами выполнения своих задач до начала процесса. Другим рисунком является необходимость обезвреживания клеток, отвечающих признакам заболевания. Для этой цели микророботы должны быть способны осуществлять требуемую диагностику клетки, на которой они находятся, и при необходимости обезвреживать ее. Предполагается, что механизм обезвреживания аналогичен процессу фагоцитоза, осуще-

ствляемого лейкоцитами, и включает в себя: обволакивание целевой клетки с целью последующего запуска процесса ее разрушения и последующим рассасыванием в организме, либо выделением во внешнюю среду. Для соответствия этому механизму моделируемым микророботам необходимо совместить свое месторасположение с координатами пораженной клетки и запустить механизм ее уничтожения. После этого клетка считается обезвреженной, а микроробот исчезает с поля (расчетной области) проведения эксперимента, оставаясь связанным с клеткой.

На основе обобщенного алгоритма фуражировки [10] был разработан модифицированный алгоритм для коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток, предназначенный для использования системами медицинских микророботов внутри организма человека. Процесс модификации состоит в корректировке последовательности целенаправленных действий микророботов, а также подборе таких параметров и коэффициентов для формул (1) и (2), которые наиболее точно отражали бы специфику решаемой задачи и БМС в целом.

С целью описания взаимодействия между микророботами, выступающими в роли агентов, а также их характеристик, нужно ввести некоторые переменные, описанные ниже.

Переменная G характеризует процесс сбора микророботов в целевых областях. В случае присутствия микроробота в целевой области значение G принимается равным значению фиксированного коэффициента r_{add} , во всех иных случаях G считается равным нулю. Переменная T связана с обменом между микророботами сведениями друг о друге. Так как этот процесс происходит на микроуровне, его механизм должен быть предельно упрощен. Поэтому принимается допущение о том, что эти сведения заключаются в характеристике распределения потенциального поля по расчетной области проведения вычислительного эксперимента. Так, для расчета моментального значения T находится значение суммы разностей между значениями потенциального поля данного микроробота и всех остальных. Переменная C описывает потребление микророботом энергии из его индивидуального запаса, происходящее в каждый момент времени. Количество энергии, расходуемой микророботом, задается с помощью коэффициента $r_{consmpt}$.

Основной характеристикой микроробота является значение его потенциального поля P . Оно описывает количество энергии, которой распоряжается микроробот, и изменяется в каждый момент времени по правилу перерасчета потенциального поля с учетом текущих значений переменных сбора, обмена и потребления.

На рис. 4 схематически представлен алгоритм коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток микророботами.

Значения переменных, характеризующих сбор G , обмен T , потребление C , значение потенциального поля P и коэффициент для шагов градиентного подъема g_{alg} , определяются уравнениями, приведенными ниже.

Для каждого робота i , находящегося в позиции R_i в момент времени t , значения сбора G , обмена T и потребления C определяются как:

$$G(R_i, t) = \begin{cases} r_{add}, & \text{если } R_i(t) \text{ находится в целевой области;} \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

$$C(R_i, t) = P(R_i, t)r_{consmpt}; \quad (4)$$

$$T(R_i, t) = \sum_{j \in N} (P(R_i, t) - P(R_j, t))r_{transfer}. \quad (5)$$

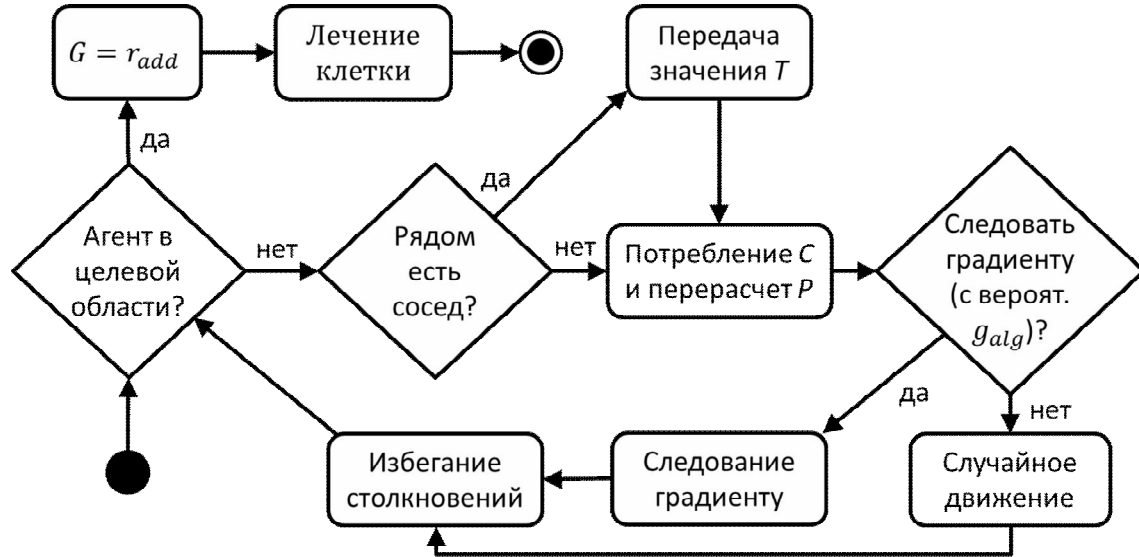


Рис. 4. Алгоритм поведения агентов при коллективной локализации и обезвреживании пораженных клеток

Правило перерасчета потенциального поля представлено в следующем виде:

$$P(R_i, t + \Delta t) = P(R_i, t) + T(R_i, t) - G(R_i, t) - C(R_i, t). \quad (6)$$

Коэффициент шагов градиентного подъема для определения порога сосредоточения δ_{sat} можно выразить как:

$$g_{alg}(R_i, t) = \max\left(\min\left(\frac{P(R_i, t - \delta_{aggr})}{1000}, 0.75\right), 0\right); \quad (7)$$

$$\frac{\delta_{sat} - \delta_{aggr}}{1000} = 0.75 \Leftrightarrow \delta_{sat} = 750 + \delta_{aggr}. \quad (8)$$

Результаты моделирования поведения во времени группы микророботов в некоторых случаях может быть целесообразным представить с помощью многомерных временных рядов [2]. При этом один робот может минимально характеризоваться четырьмя временными рядами – для P , G , T и C . Использование таких рядов потенциально позволяет выполнить дополнительный апостериорный (по окончании вычислительного эксперимента) анализ полученных результатов.

Для применения уравнений обобщенной модели в алгоритме коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток (1) и (2) находятся коэффициенты A и B , используемые в уравнениях, описывающих траектории роботов и плотность распределения их ансамблей. С помощью этих коэффициентов, рассчитанных с учетом специфики БМС, обобщенные уравнения используемого математического аппарата могут быть применены для прогнозирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов.

$$A = d(\rho) g_{mod}(P) \frac{\nabla P}{\|\nabla P\|} v, \quad A = 0, \text{ если } \|\nabla P\| = 0, \quad (9)$$

где g_{mod} – эффективный коэффициент шагов градиентного подъема, v – номинальная скорость, ограничивающий коэффициент $d(\rho) \in [0, 1]$; $d(0) = 1$; $d(\rho) = 0$ для максимальной плотности ρ_{max} .

$$B = (1 - g_{\text{mod}} d) v d, \quad (10)$$

где d – нормализованное положение в пространстве.

Таким образом, исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы.

1. Разработан алгоритм, позволяющий моделировать поведение групп автономных интеллектуальных агентов путем модификации и доработки обобщенного алгоритма фуражировки.

2. Созданный новый алгоритм описывает процесс коллективной локализации (определения) и обезвреживания пораженных клеток микророботами на основе разработанного ранее математического аппарата.

3. В процессе разработки алгоритма была создана методика проведения экспериментального исследования, заключающегося в имитационном моделировании поведения групп микророботов в процессе коллективной локализации и обезвреживания пораженных клеток.

4. Нами была показана необходимость разработки системы критериев достоверности как инструмента оценки качества прогнозирования поведения групп микророботов с помощью предлагаемого алгоритма.

5. Для завершения работы по синтезу информационной модели поведения групп автономных микророботов для БМС необходимо выполнить программную реализацию многоагентной системы и произвести экспериментальное исследование ее поведения с помощью вычислительных экспериментов. Также требуется разработать систему критериев, учитывающую целый ряд параметров, позволяющих оценить точность локализации местоположения и количество микророботов, достигших цели.

6. После этого на основе результатов вычислительных экспериментов необходимо выполнить оценку достоверности прогнозирования поведения групп микророботов с использованием разработанной системы критериев.

Список литературы

1. Акжигитов Р. Ф. Система мультидиагностики для больных с постуральным дефицитом и разработка алгоритма распознавания стабильнографических сигналов / Р. Ф. Акжигитов, А. В. Киреев, В. В. Истомин, А. С. Слива // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 23, № 4–2. – С. 22.

2. Брумштейн Ю. М. Одно- и многомерные временные ряды: анализ возможных методов оптимизации отсчетов и оценки характеристик / Ю. М. Брумштейн, М. В. Иванова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань, 2012. – № 4. – С. 34–43.

3. Истомин В. В. Обоснование разработки информационных моделей поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем / В. В. Истомин, М. Ю. Михеев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 134, № 9. – С. 98–104.

4. Истомин В. В. Повышение качества прогнозирования поведения групп автономных интеллектуальных агентов для биомедицинских систем / В. В. Истомин, М. Ю. Михеев // Надежность и качество : труды международного симпозиума. – Пенза, 2012. – Т. 2. – С. 467–469.

5. Истомин В. В. Прогнозирование поведения групп автономных интеллектуальных агентов на основе теории многоагентных систем / В. В. Истомин // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 18, № 4. – С. 29–32.

6. Каляев И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009.

7. Рыбальченко И. Е. Приоритетные проблемы в развитии системы высокотехнологичной медицинской помощи / И. Е. Рыбальченко // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань, 2012. – № 1. – С. 146–151.

8. Ahmed Salman. A testbed for control schemes using multi agent nonholonomic robots / Ahmed Salman, Karsiti Mohammad Noh // Electro/Information Technology : 2007 IEEE International Conference. – Chicago, 2007. – P. 459–464.

9. Arvin Farshad. Development of a Miniature Robot for Swarm Robotic Application / Arvin Farshad, Samsudin Khairulmizam, Ramli Abdul Rahman // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2009. – vol. 1, no. 4. – P. 436–442.

10. Hamann Heiko. Space-Time Continuous Models of Swarm Robotic Systems / Hamann Heiko // *Cognitive Systems Monographs*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – vol. 9.
11. Hong Lin. Architectural Design of Multi-Agent Systems: Technologies and Techniques / Hong Lin // *Information Science Reference*. – Hershey – New York, 2007.
12. Russell Stuart J. Artificial Intelligence: A Modern Approach / Russell Stuart J., Norvig Peter. – 3rd ed. – Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 2010.
13. Wooldridge Michael. An Introduction to MultiAgent Systems / Wooldridge Michael. – John Wiley & Sons Ltd, 2002. – 366 p.

References

1. Akzhigitov R. F., Kireev A. V., Istomin V. V., Sliva A. S. Sistema multidiagnostiki dlya bolnykh s posturalnym defitsitom i razrabotka algoritma raspoznavaniya stabilograficheskikh signalov [Multidiagnostics system for patients with postural deficits and algorithm for recognizing stabilographic signals]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2012, vol. 23, no. 4–2, p. 22.
2. Brumshteyn Yu. M., Ivanov M. V. Odno- i mnogomernye vremennye ryady: analiz vozmozhnykh metodov optimizatsii otschetov i otsenki kharakteristik [Single- and multi-dimensional time series: analysis of possible methods for optimization of characteristics samples and evaluation]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High technologies]. Astrakhan, 2012, no. 4, pp. 34–43.
3. Istomin V. V., Mikheev M. Yu. Obosnovanie razrabotki informatsionnykh modeley povedeniya grupp avtonomnykh intellektualnykh agentov dlya biomeditsinskikh sistem [Development of behavior models for groups of autonomous intelligent agents for biomedical systems: a substantiation study]. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Southern Federal University. Technical Sciences], 2012, vol. 134, no. 9, pp. 98–104.
4. Istomin V. V., Mikheev M. Yu. Povyshenie kachestva prognozirovaniya povedeniya grupp avtonomnykh intellektualnykh agentov dlya biomeditsinskikh sistem [Improving predicting behavior for groups of autonomous intelligent agents for biomedical systems]. *Nadezhnost i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality: Proceedings of International Symposium], 2012, vol. 1, no. 1, pp. 146–151.
5. Istomin V. V. Prognozirovanie povedeniya grupp avtonomnykh intellektualnykh agentov na osnove teorii mnogoagentnykh sistem [Prediction of the behavior of groups of autonomous intelligent agents based on the theory of multi-agent systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2011, vol. 18, no. 4, pp. 29–32.
6. Kalyaev I. A., Gayduk A. R., Kapustyan S. G. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Models and algorithms for collective control in groups of robots]. Moscow, 2009.
7. Rybalchenko I. Ye. Prioritetnye problemy v razvitiy sistemy vysokotekhnologichnoy meditsinskoj pomoshchi [Priority problems in development of high-tech medical care system]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies]. Astrakhan, 2012, no. 1, pp. 146–151.
8. Ahmed Salman, Karsiti Mohammad Noh. A testbed for control schemes using multi agent nonholonomic robots. *Electro/Information Technology: 2007 IEEE International Conference*. Chicago, 2007, pp. 459–464.
9. 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, no. 4, pp. 436–442.
10. Heiko Hamann. Space-Time Continuous Models of Swarm Robotic Systems. *Cognitive Systems Monographs*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, vol. 9.
11. Hong Lin, Architectural Design of Multi-Agent Systems: Technologies and Techniques. *Information Science Reference*. Hershey – New York, 2007.
12. Russell Stuart J., Norvig Peter. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2010.
13. Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons Ltd, 2002. 366 p.