

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕОРИИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУППЫ РОБОТОВ¹

И.А. ПШЕНОКОВА

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»
360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а
E-mail: iipru@rambler.ru

В работе проводится анализ существующих направлений в теории целенаправленного коллективного поведения группы роботов. Приводятся основные результаты по представленным направлениям с описанием достоинств и недостатков методов исследования. Предлагается объединить существующие теоретические разработки различных направлений в теории группового управления и принятия решений с целью построения эффективных вычислительных абстракций, моделей и математических методов целенаправленного коллективного поведения автономных роботов.

Ключевые слова: коллективное поведение, интеллектуальные системы, роботы, робототехнические системы, системы принятия решений и управления.

Для решения различного рода неструктурированных задач в неизвестных, неисследованных или удаленных средах используют различные робототехнические устройства или роботов различного назначения. Причем существуют такие задачи, выполнение которых невозможно с одним роботом. Следовательно, весьма актуальна задача разработки теоретических основ, моделей, методов и алгоритмов согласованного целенаправленного коллективного поведения групп автономных роботов, являющегося одним из направлений искусственного интеллекта [1].

Под группой роботов принято понимать группу автономных мобильных объектов, которые координируют свои действия для достижения общей цели. Эта группа способна воспринимать информацию о среде, реагировать на изменения состояния среды и взаимодействовать друг с другом для решения единой целевой задачи. Определение и реализация действий каждого отдельного робота, приводящих к оптимальному достижению групповой цели, является задачей группового управления [2].

Одним из основных факторов, сдерживающих развитие систем управления коллективным поведением автономных роботов, в настоящее время является отсутствие теоретической базы для решения проблемы взаимодействия гетерогенных групп, состоящих из людей, активных сенсоров, мобильных и стационарных роботов, виртуальных и программных агентов. Такое взаимодействие должно строиться на основе когнитивных процессов, таких как понимание, внимание, рассуждение, суждение и т. д. Многие системы коллективного поведения группы роботов не используют такие когнитивные процессы и вместо этого включают относительно простые законы управления, которые приводят к появлению группового поведения. Такие системы не являются интеллектуальными. С другой стороны, существуют интеллектуальные системы коллективного поведения группы роботов, которые предполагают более прямое и целенаправленное взаимодействие. В них ро-

¹ Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 19-01-00648 А

боты должны принять решение, как координировать свои действия путем машино-машинной и человеко-машинной коммуникации, иметь способность к самообучению и самоорганизации.

В настоящее время основные подходы, конкурирующие в области решения задач синтеза интеллектуального управления поведением автономных роботов в реальной среде, относят к так называемым «мягким формализмам». К ним относятся нечеткие и гранулярные вычисления, методы эволюционной оптимизации (генетические алгоритмы), методы роевой оптимизации, искусственные нейронные сети, методы обучения с подкреплением, мультиагентные алгоритмы, когнитивные архитектуры.

В современной интеллектуальной групповой робототехнике различают следующие направления, интегрирующие указанные выше формализмы в различных комбинациях: адаптивное поведение и аниматы, робототехника, «основанная на поведении», эволюционная робототехника.

Моделированием адаптивного поведения заинтересовались еще с 50-х годов XX в. [3]. Однако активное развитие данное направление получило после конференции «Симуляция адаптивного поведения: от животных к аниматам», прошедшей в Париже в 1990 году. Аниматы (от англ. *animal* – животное и *automat* – автономно действующее устройство) – программные модельные агенты, способные существовать в изменяющейся среде так же, как любые живые организмы. Действия таких агентов не могут быть запрограммированы, а должны быть подчинены тем же закономерностям, что и у животных. Эти действия могут быть направлены на решение неструктурированных задач путем адаптации в плохо предсказуемой среде. Сейчас это направление активно развивается, регулярно проводятся конференции *Simulation of Adaptive Behavior (From Animals to Animats)*, издается журнал *Adaptive Behavior*.

Минимальной задачей данного направления является исследование архитектуры и принципов функционирования, позволяющих животным или роботам жить в изменяющейся внешней среде. Максимальной является задача анализа эволюции когнитивных способностей животных и эволюционного происхождения человеческого интеллекта [4]. Данное направление исследований рассматривается как бионический подход к разработке систем искусственного интеллекта [5].

Для выявления принципов функционирования необходимо смоделировать работу хотя бы примитивной нервной системы таким образом, чтобы она могла приспособиться к окружающей среде, проявляя предпосылки к самоорганизации. Такое моделирование позволит вывести фундаментальные схемы для разработки искусственного интеллекта. Однако даже относительно простые организмы обладают нервной системой, состоящей из десятков и сотен тысяч нейронов. Поэтому изучение поведения аниматов позволяет наблюдать за процессом эволюции и обучения путем исследования работы клеток нервной системы и контактов в ней как в частном, так и в целом. В некоторых проектах, например, определенные «нервные узлы» аниматов постепенно начинают специализироваться на тех или иных задачах, таких как категоризация предметов, распознавание лиц или объектов в пространстве.

К наиболее известным проектам по моделированию адаптивного поведения относится NOMAD (мобильное адаптивное устройство с нейронной организацией), разработанное исследователями из Института нейронаук (Калифорния) во главе с Нобелевским лауреатом Джеральдом Эдельманом. NOMAD позиционируется как «настоящий мыслящий робот, который начинает учиться на собственном опыте» [6]. Поведение NOMAD контролируется деятельностью клеток имитируемого мозга, и уже позволило исследователям лучше понимать устройство человеческого мозга. Робот обладает спо-

способностью взаимодействовать с окружающей средой, ощущать вкус и свет, перемещаться и хватать игровые блоки с различными узорами.

Исследования по данному направлению также ведутся в лаборатории Искусственного интеллекта Массачусетского технологического института (проекты *Genghis*, *Kismet*, *Coco*) [7], в Парижской лаборатории *Animat Lab* (проекты *Hexapod*, *Psikharpax*) [8, 9]. Лаборатория искусственного интеллекта в университете Цюриха создает интеллект для понимания его природы (*understanding by building*), проводя исследование общих принципов естественного интеллекта животных и человека [10].

Лаборатория искусственной жизни и робототехники в Институте когнитивных наук и технологий в Риме ведёт исследования в направлении эволюционной робототехники и принципов формирования адаптивного поведения [11, 12].

В России в этом направлении ведутся работы в Институте прикладной математики по проекту «Мозг анимата» [13].

Главным недостатком этого направления групповой робототехники является то, что моделирование проводится на основе различных нейронных сетей, которые требуют больших вычислительных ресурсов, а необходимость согласованного функционирования всех элементов системы управления аниматом накладывает ограничения на ее архитектуру. Кроме того, существующие на данный момент системы еще не способны принимать самостоятельные и нестандартные решения в условиях неструктурированной и изменяющейся окружающей среды.

Рассмотрим теперь системы, в которых интеллект формируется в результате поведения и взаимодействия множества физических или виртуальных агентов. Такие системы получили название систем, основанных на поведении (англ. *Behavior-Based Systems*, *BBS*). История развития *BBS*-систем насчитывает уже почти три десятилетия. В [14] впервые была представлена архитектура поведения интеллектуального агента. Эта архитектура известна как *subsumption architecture* (архитектура типа иерархии категорий) или реактивная архитектура, которая задает описание «паттернов поведения» [15] в определенной задаче. Автомат моделирует варианты поведения системы, которая на вход с сенсорной системы получает состояние внешней среды, а выходом является реакция системы. В архитектуре, предложенной в [15], конечный автомат имеет структуру, в которой каждому входу ставится в соответствие выход по правилу «ситуация–действие», и выбор действия в ней не зависит от внутреннего состояния автомата. Однако реактивной архитектуре свойственен ряд ограничений [16].

В существующих сейчас системах рассматриваются более сложные модели поведения, организованные в иерархическую структуру, и при выборе действия учитывают внутреннее состояние автомата. Каждый автомат может выполнять определенный набор действий, имеет необходимые ресурсы для реализации этих действий и может взаимодействовать с другими автоматами на основе некоторого протокола координации для исполнения сценариев группового поведения [17, 18]. Возможность учитывать внутреннее состояние и координировать действия для группового взаимодействия показывает, что автоматы потенциально обладают способностью планировать, обучаться и рассуждать. Такая способность делает *BBS*-системы самообучающимися и самоорганизующимися [19, 20].

Робототехника, основанная на поведении, в настоящее время обретает все большую актуальность. Однако и это направление связано со сложностью моделирования большого количества автоматов при проектировании группового управления поведением как некоторых частей системы, так и всей системы в целом при неструктурированных условиях внешней среды и внутренних возмущениях системы.

Перейдем к достаточно перспективному направлению – эволюционной групповой робототехнике, которая совмещает групповую робототехнику и эволюционные вычисления. Основной идеей эволюционной групповой робототехники является использование непрерывной встроенной эволюции в реальных роботах. Это значит, что эволюционный алгоритм управляет всеми роботами одновременно в режиме реального времени. Эволюцион-

ный алгоритм – это модель естественного отбора [21]. Универсальность и способность этих алгоритмов генерировать структуры позволяет им изменять морфологию и систему управления роботом [22, 23, 24, 25]. В работах [26, 27] показано, что постепенное усложнение морфологии оказывает влияние на процесс адаптации системы управления робота и на сложность задач, которые он способен выполнять. Существенное влияние на этот процесс оказывают также модификации внешней среды. В Artificial Life Lab («Лаборатория искусственной жизни») в Karl-Franzens University of Graz для управления группой индивидуальных роботов разработали программы «Виртуальный эмбриогенез» и «Искусственная гомеостатическая гормональная система» для того, чтобы «выращивать» организм путем координирования стыковки индивидуальных роботов и двигать его. В этих моделях все правила встроены в структуру данных, называемую «геномом», и путем применения техник эволюционных вычислений эти геномы адаптируются в зависимости от того, насколько организм преуспевает. После чего геном фиксируется и применяется для управления коллективом роботов.

Недостатком данного подхода является то, что, хотя в результате моделирования процесс эволюции происходит быстро и выбираются наиболее оптимальные решения, однако при применении на реальных роботах чаще всего эти решения не работают. Эта проблема называется «разрыв в реальности» [28, 29, 30].

Предлагаются разные подходы к решению данной проблемы [31, 32], которые в первую очередь направлены на то, чтобы ускорить возможность применения эволюционной робототехники на практике. Однако такое ускорение скрытно, часто критично влияет на эволюционный процесс и приводит к обобщению важных характеристик окружающей действительности и потере более эффективного решения.

В настоящее время эволюционная робототехника позволяет создавать экспериментальный инструментарий для изучения различных вопросов, возникающих при проектировании группы автономных интеллектуальных агентов. Однако многократное повторение экспериментов и множество оценок полученных решений при моделировании целенаправленного коллективного поведения группы роботов накладывает ограничения на использование эволюционных алгоритмов. Эволюционные алгоритмы легко распараллелить, поэтому продолжительность эксперимента может быть значительно сокращена, если он выполняется параллельно на нескольких процессорах. Наличие мощных кластеров многоядерных процессоров, а также разработка программных сред, которые могут их использовать [33], открывает новые перспективы и позволяет исследователям рассматривать вопросы, которые были недоступны для эволюционной робототехники всего несколько лет назад из-за этих практических ограничений.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что к настоящему времени сложились неплохие тенденции в развитии теории коллективного группового управления группой роботов, однако отсутствуют эффективные методы распределенного коллективного интеллектуального принятия решений и управления. Недостаточная эффективность методов автономной обработки неструктурированных данных и принятия решений при изменяющихся внутренних и внешних параметрах среды приводят к невозможности пока моделировать систему, способную к самообучению и самоорганизации. Базовый принцип групповой робототехники заключается в том, что при объединении усилий относительно простых роботов, обладающих ограниченными когнитивными способностями, возникает синергетический эффект, и группа может справиться с задачами, которые не по плечу отдельным роботам из этой группы. Применение моделей социального поведения в групповой робототехнике относится к категории биоинспирированных подходов. Многочисленные биоинспирированные формализмы искусственного интеллекта можно рассматривать как источник вычислительных эвристик, позволяющих тем или иным способом ослабить требования к решению указанной задачи, снижая либо трудоемкость алгоритма, либо размерность и интенсивность потока данных.

К настоящему моменту сформировались условия для того, чтобы объединить существующие теоретические разработки различных направлений в теории группового управления и принятия решений с целью построения эффективных вычислительных абстракций, моделей и математических методов целенаправленного коллективного поведения автономных роботов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988. 168 с.
2. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Методы и модели коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.
3. *Цетлин М.Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969. 316 с.
4. *Donnart J.Y., Meyer J.A.* Learning reactive and planning rules in a motivationally autonomous animat // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 1996. V. 26. No 3. PP. 381-395.
5. *Wilson S.W.* The animat path to AI // In: From Animals to Animats: Proceedings of The First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (pp. 15-21), J.-A. Meyer and S.W. Wilson, eds., Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books (1991).
6. *Neural Darwinism. The Theory of Neuronal Group Selection.* By Gerald M. Edelman. Oxford University Press, 1990. Pp. 371.
7. *Brooks R.* Cambrian Intelligence. The Early History of the New AI. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England. 1999.
8. *Doupe A.J., Kuhl P.K.* Birdsong and human speech: common themes and mechanisms // Annual Reviews of Neuroscience, 1999, № 22. Pp. 567-631.
9. *Edelman G., Tononi G.* Consciousness. Penguin Press, 2000.
10. *Pfeifer Rolf* Designing Intelligence. Why Brains Aren't Enough. Anthology, 2011. Pp. 106.
11. *Nolfi S., Floreano D.* Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence and Technology of Self-Organizing Machines. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England. 2003.
12. *Broz F., Nehaniv C.L., Belpaeme T., Bisio A., Dautenhahn K., Fadiga L. and other.* The ITALK project: A developmental robotics approach to the study of individual, social, and linguistic learning // Topics in cognitive science. №6 (3). Pp. 534-544.
13. *Red'ko V.G., Anokhin K.V. et al.* Project «Animat Brain»: Designing the animat control system on the basis of the functional systems theory // In: M.V. Butz, O. Sigaud, G. Pezzulo, G. Baldassarre (Eds.), Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 2007. Pp. 94-107.
14. *Brooks R.A.* A Robust Layered Control System for a Mobile Robot // IEEE J. of Robotics and Automation. RA-2. 1986. P. 14-23.
15. *Weiss Ed. G.* Multi-agent Systems – A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. Boston: MIT Press, 1999. 610 p.
16. *Jennings N., Sycara K., Wooldridge M.* A Roadmap of Agent Research and Development // Intern. J. Autonomous Agents and Multi-agent Systems. Kluwer Academic Publishers. 1998. No. 1. P. 7-38.
17. *Rzevski G., Skobelev P., Zhilyaev A. et al.* Customization of Multi-Agent Systems for Adaptive Resource Management with the Use of Domain Ontologies // International Journal of Economics and Statistics. 2018. Vol. 6. P. 112-124.
18. *Городецкий В.И.* Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление: основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. № 1. 2019. С. 133-152.

19. Fischer Y. On Situation Modeling and Recognition. Technical Report IES-2009-14 / Eds J. Beyerer, M. Huber. Proceedings of the 2009 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthromatics, Vision and Fusion Laboratory. Karlsruhe, Germany. Kit Scientific Publishing. 2009. P. 203-215.
20. Endsley M.R. Towards a theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37. P. 32-64.
21. Bongard J., Zykov V., Lipson H. Resilient machines through continuous self-modeling // Science, 2006. Vol. 314. Pp. 1118-1121.
22. Sims K. «Evolving virtual creatures», in Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (*SIGGRAPH'94*), (ACM). 1994. Pp. 15–22.
23. Lipson H., Pollack J.B. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms // Nature Vol. 406. 2000. Pp. 974-978. doi:10.1038/35023115.
24. Komosinski M. The framsticks system: versatile simulator of 3D agents and their evolution // Kybernetes Vol. 32. 2003. Pp. 156-173. doi:10.1108/03684920310452382.
25. De Margerie E., Mouret J.-B., Doncieux S. and Meyer J.-A. Artificial evolution of the morphology and kinematics in a flapping-wing mini-UAV. *Bioinspir. Biomim.* 2. 2007. Pp. 65-82. doi:10.1088/1748-3182/2/4/002.
26. Bongard J.C. Innocent until proven guilty: Reducing robot shaping from polynomial to linear time // IEEE Transactions on Evolutionary Computation Vol. 15(4). 2011. Pp. 571-585.
27. Bongard J.C. The utility of evolving simulated robot morphology increases with task complexity for object manipulation // *Artificial Life*, Vol. 16(3). 2010. Pp. 201-223.
28. Jakobi N., Husbands P. and Harvey I. Noise and the reality gap: the use of simulation in evolutionary robotics // *Lect. Notes Comput. Sci.* Vol. 929. 1995. Pp. 704–720. doi:10.1007/3-540-59496-5_337.
29. Miglino O., Lund H.H. and Nolfi S. Evolving mobile robots in simulated and real environments // *Artif. Life* Vol. 2. 1995. Pp. 417-434. doi:10.1162/artl.1995.2.4.417.
30. Koos S., Cully A. and Mouret J.-B. (a). Fast damage recovery in robotics with the T-resilience algorithm // *Int. J. Rob. Res.* 32. 2013. Pp. 1700-1723. doi:10.1177/0278364913499192.
31. Hornby G. S., Pollack J. B. Creating high-level components with a generative representation for body-brain evolution // *Artif. Life* Vol. 8. 2002. Pp. 223-246. doi:10.1162/106454602320991837.
32. Yosinski J., Clune J., Hidalgo D., Nguyen S., Zagal J., Lipson H. Evolving robot gaits in hardware: the HyperNEAT generative encoding vs. parameter optimization // in Proc. of the European Conference on Artificial Life (ECAL), (MIT Press), 2011. Pp. 1-8.
33. Mouret J.-B., Doncieux S. MENNAG: a modular, regular and hierarchical encoding for neural-networks based on attribute grammars // *Evol. Intell.* Vol. 1. 2008. Pp. 187-207. doi:10.1007/s12065-008-0015-7.

REFERENCES

1. Pospelov G.S. *Iskusstvennyy intellekt – osnova novoy informatsionnoy tekhnologii* [Artificial intelligence – the basis of new information technology]. M.: Science, 1988. 168 p.
2. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Methods and models of collective management in groups of robots]. M.: FIZMATLIT, 2009. 280 p.
3. Tsetlin M. L. *Issledovaniya po teorii avtomatov i modelirovaniyu biologicheskikh sistem* [Research on automata theory and modeling of biological systems]. M.: Science, 1969. 316 p.
4. Donnart J.Y., Meyer J.A. Learning reactive and planning rules in a motivationally autonomous animat // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics*, 1996. V. 26. No 3. Pp. 381-395.

5. Wilson S.W. The animat path to AI // In: From Animals to Animats: Proceedings of The First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (pp. 15-21), J.-A. Meyer and S.W. Wilson, eds., Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books (1991).
6. Neural Darwinism. The Theory of Neuronal Group Selection. By Gerald M. Edelman. Oxford University Press, 1990. Pp. 371.
7. Brooks R. Cambrian Intelligence. The Early History of the New AI. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England. 1999.
8. Doupe A.J., Kuhl P.K. Birdsong and human speech: common themes and mechanisms // Annual Reviews of Neuroscience. 1999. № 22. P. 567-631.
9. Edelman G., Tononi G. Consciousness. Penguin Press, 2000.
10. Pfeifer Rolf Designing Intelligence. Why Brains Aren't Enough. Anthology, 2011. Pp. 106.
11. Nolfi S., Floreano D. Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence and Technology of Self-Organizing Machines. The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, London, England. 2003.
12. Broz F., Nehaniv C.L., Belpaeme T., Bisio A., Dautenhahn K., Fadiga L. and other. The ITALK project: A developmental robotics approach to the study of individual, social, and linguistic learning // Topics in cognitive science. №6 (3). Pp. 534-544.
13. Red'ko V.G., Anokhin K.V. et al. Project "Animat Brain": Designing the animat control system on the basis of the functional systems theory // In: M.V. Butz, O. Sigaud, G. Pezzulo, G. Baldassarre (Eds.), Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems: From Brains to Individual and Social Behavior. LNAI 4520, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 2007. Pp. 94-107.
14. Brooks R.A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot // IEEE J. of Robotics and Automation. RA-2. 1986. P. 14-23.
15. Weiss Ed. G. Multi-agent Systems—A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. Boston: MIT Press, 1999. 610 p.
16. Jennings N., Sycara K., Wooldridge M. A Roadmap of Agent Research and Development // Intern. J. Autonomous Agents and Multi-agent Systems. Kluwer Academic Publishers. 1998. No. 1. P. 7-38.
17. Rzevski G., Skobelev P., Zhilyaev A. et al. Customization of Multi-Agent Systems for Adaptive Resource Management with the Use of Domain Ontologies // International Journal of Economics and Statistics. 2018. Vol. 6. P. 112-124.
18. Gorodetsky V.I. *Povedencheskiye modeli kiber-fizicheskikh sistem i gruppovoye upravleniye: osnovnyye ponyatiya* [Behavioral models of cyber-physical systems and group management: basic concepts] // *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki* [Izvestia SFU. Technical science]. № 1. 2019. P. 133-152.
19. Fischer Y. On Situation Modeling and Recognition. Technical Report IES-2009-14 / Eds J. Beyerer, M. Huber. Proceedings of the 2009 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. Karlsruhe, Germany. Kit Scientific Publishing. 2009. P. 203-215.
20. Endsley M.R. Towards a theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors. 1995. Vol. 37. P. 32-64.
21. Bongard J., Zykov V., Lipson H. Resilient machines through continuous self-modeling // Science, 2006. Vol. 314. Pp. 1118-1121.
22. Sims K. «Evolving virtual creatures» in Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (*SIGGRAPH'94*), (ACM). 1994. Pp. 15–22.
23. Lipson H., Pollack J. B. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms // Nature Vol. 406. 2000. Pp. 974-978. doi:10.1038/35023115.
24. Komosinski M. The framsticks system: versatile simulator of 3D agents and their evolution // *Kybernetes* Vol. 32. 2003. Pp. 156-173. doi:10.1108/03684920310452382.

25. De Margerie E., Mouret J.-B., Doncieux S. and Meyer J.-A. Artificial evolution of the morphology and kinematics in a flapping-wing mini-UAV. *Bioinspir. Biomim.* 2. 2007. Pp. 65-82. doi:10.1088/1748-3182/2/4/002.
26. Bongard J. C. Innocent until proven guilty: Reducing robot shaping from polynomial to linear time // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* Vol. 15(4). 2011. Pp. 571-585.
27. Bongard J. C. The utility of evolving simulated robot morphology increases with task complexity for object manipulation // *Artificial Life*, Vol. 16(3). 2010. Pp. 201-223.
28. Jakobi N., Husbands P. and Harvey I. Noise and the reality gap: the use of simulation in evolutionary robotics // *Lect. Notes Comput. Sci.* Vol. 929. 1995. Pp. 704–720. doi:10.1007/3-540-59496-5_337.
29. Miglino O., Lund H.H. and Nolfi S. Evolving mobile robots in simulated and real environments // *Artif. Life* Vol. 2. 1995. Pp. 417-434. doi:10.1162/artl.1995.2.4.417.
30. Koos S., Cully A. and Mouret J.-B. Fast damage recovery in robotics with the T-resilience algorithm // *Int. J. Rob. Res.* 32. 2013. Pp. 1700-1723. doi:10.1177/0278364913499192.
31. Hornby G. S., Pollack J. B. Creating high-level components with a generative representation for body-brain evolution // *Artif. Life* Vol. 8. 2002. Pp. 223-246. doi:10.1162/106454602320991837.
32. Yosinski J., Clune J., Hidalgo D., Nguyen S., Zagal J., Lipson H. Evolving robot gaits in hardware: the HyperNEAT generative encoding vs. parameter optimization // in *Proc. of the European Conference on Artificial Life (ECAL)*, (MIT Press), 2011. Pp. 1-8.
33. Mouret J.-B., Doncieux S. MENNAG: a modular, regular and hierarchical encoding for neural-networks based on attribute grammars // *Evol. Intell.* Vol. 1. 2008. Pp. 187-207. doi:10.1007/s12065-008-0015-7.

MODERN STATE OF RESEARCH IN THE THEORY OF TARGETED COLLECTIVE BEHAVIOR OF INTELLECTUAL ROBOTS GROUP

I.A. PSHENOKOVA

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Federal public budgetary scientific establishment "Federal scientific center
«Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»
360000, KBR, Nalchik, 37-a, I. Armand St.
E-mail: iipru@rambler.ru

The paper analyzes the existing trends in the theory of targeted collective behavior of a group of robots. The main results in the presented areas with a description of the advantages and disadvantages of research methods are presented. It is proposed to combine the existing theoretical developments of various areas in the theory of group management and decision-making with the aim of building effective computational abstractions, models and mathematical methods of purposeful collective behavior of autonomous robots.

Keywords: collective behavior, intelligent systems, robots, robotic systems, decision-making and control systems.

Работа поступила 04.06.2019 г.