

УДК 621.865.8, 616.7

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

## Управляемый микроробот для перемещения в сосудах человека

А. Е. Городецкий<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3465-4438](https://orcid.org/0000-0002-3465-4438)

И. Л. Тарасова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-2282-150X](https://orcid.org/0000-0002-2282-150X), [g17265@yandex.ru](mailto:g17265@yandex.ru)

В. Г. Курбанов<sup>а, б</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-2450-9341](https://orcid.org/0000-0002-2450-9341)

<sup>а</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Большой пр. В. О., 61, Санкт-Петербург, 199178, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** создание управляемых микророботов, способных перемещаться в сосудах человека в соответствии с заданным трафиком движения, является одной из наиболее сложных и трудно решаемых задач. Среди эффективных путей ее решения находится использование в конструкции подобных микророботов модулей SEMS (Smart ElectroMechanical Systems). Различные соединения таких модулей позволяют имитировать работу ресниччатого аппарата и жгутикового двигателя, которые могут использоваться в качестве двигателей микроробота. **Цель исследования:** разработка для медицинских целей управляемого микроробота, конструкция которого базируется на стандартных модулях SEMS. **Результаты:** разработан медицинский микроробот. Рассмотрены принципы управления коллективным движением таких микророботов. Особая роль в управлении группой микророботов отводится центральной нервной системе микроробота, выполняющей функцию системы автоматического управления. При синтезе оптимального ситуационного управления группой микророботов осуществляется перевод логико-вероятностных и логико-лингвистических ограничений в логико-интервальные, что позволяет оптимизационную задачу свести к решению ряда классических задач математического программирования. **Практическая значимость:** использование различных объединений модулей SEMS в конструкции медицинских микророботов позволяет повысить точность, быстродействие и их адаптивность к окружающей среде, так как, в отличие от известных механизмов, применяемых в микророботах, в данном случае вводится параллелизм не только в процессы измерения и вычисления, но и в процессы исполнения управляющих команд. Конструктивные особенности разработанных модулей обеспечивают широкие технологические возможности различных биомедицинских робототехнических комплексов.

**Ключевые слова** – безопасное управление, интеллектуальные роботы, умные электромеханические системы, групповое ситуационное взаимодействие, динамическое пространство конфигураций, центральная нервная система.

Для цитирования: Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г. Управляемый микроробот для перемещения в сосудах человека. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 38–44. doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

For citation: Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. Controlled microrobot for moving in human vessels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 38–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

### Введение

В последние годы большое внимание уделяется созданию микророботов, имитирующих сложность и адаптивность биологических систем [1]. Исследование и разработка робототехнических систем с использованием бионического подхода становятся одной из главных целей в области робототехники [2], в том числе и для медицинского назначения [3].

Во всем мире ученые ищут способы использования микророботов для лечения болезней. Они вводятся в организм человека, чтобы быстро и безошибочно доставлять лекарства в нужный орган или выполнять операции, требующие максимальной точности (например, очистку забитых артерий).

Исследователи из Института умных систем имени Макса Планка (Германия) под руководством профессора Пира Фишера выяснили, что роботы в форме устриц являются отличными плов-

цами в неньютоновской жидкости. Сегодня робот-устрица выступает в качестве базовой структуры будущих микророботов [4]. Специалисты Харбинского технического института (Китай) создали микроскопического робота, который умеет плавать по человеческим венам самым быстрым видом плавания — кролем [5]. Ученые институтов EPFL и ETHZ (Швейцария) разработали робота, который имеет структуру бактерии, вызывающей африканский трипаносомоз (сонную болезнь) [6]. В Калифорнийском университете в Сан-Диего (США) разработан микроскопический робот, с помощью которого осуществляется транспортировка препарата в желудок подопытной мыши [7]. Ученые из России разработали медицинский микроробот, предназначенный для транспортировки с высокой эффективностью лекарственных препаратов в труднодоступные места живого организма [8].

Эффективность функционирования таких устройств существенно зависит от способности

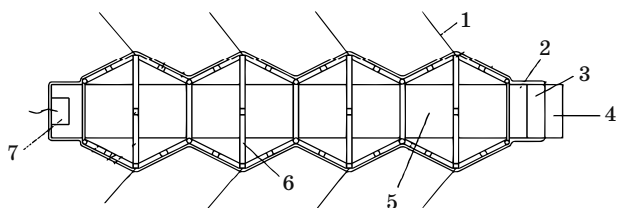
адаптироваться к окружающей среде, в том числе к возникающим на пути движения различного рода препятствиям.

Существующие медицинские микророботы имеют высокую сложность управления, требующую применения специальных средств визуализации положения микроробота в живом организме, низкую точность позиционирования и сильную зависимость от внешних электромагнитных полей [9].

Значительного прогресса в этой области можно достичь за счет использования в конструкции подобных микророботов модулей SEMS (Smart ElectroMechanical Systems) [10]. Различные соединения таких модулей позволяют имитировать работу реснитчатого аппарата и жгутикового движителя [11], которые могут использоваться в качестве движителей микроробота.

### Модель и центральная нервная система робота

Конструкция микроробота, предназначенного для транспортировки лекарственных веществ в труднодоступные места живого организма, содержит (рисунок): корпус 5, состоящий из последовательного соединения модулей, например, типа SM5 SEMS [10]; реснитчатые движители 1, которые крепятся к верхним и (или) нижним платформам промежуточных модулей корпуса медицинского микроробота и состоят из последовательного соединения модулей, например, типа SM5 SEMS; центральную управляющую вычислительную машину 2, выполняющую функции системы автоматического управления (САУ); систему технического зрения 3, обеспечивающего САУ навигационной информацией; жгутиковый движитель 7, который крепится к нижней платформе первого модуля корпуса и состоит из последовательного соединения модулей, например, типа SM5 SEMS; модули с управляемой жесткостью 6, устанавливаемые между модулями SM5 SEMS корпуса 5 и обеспечивающие требуемую гибкость в сочетании с твердостью; адаптивный захват 4, который крепится к верхней платформе последнего модуля корпуса и состоит из соедине-



- Медицинский микроробот
- Medical microrobot

ния типа кольцо модулей SEMS, например, типа SM7 SEMS [10].

Микроробот работает следующим образом. После введения медицинского микроробота в вену (сосуд) включается электропитание, и система технического зрения 3 передает изображение внутренних стенок сосуда оператору и в центральную управляющую вычислительную машину 2 САУ. Она анализирует полученное изображение и подает сигнал управления в модули SM5 SEMS корпуса 5 на изменение толщины робота в зависимости от текущей величины сечения сосуда.

Одновременно САУ подает управляющие сигналы в модули SM5 SEMS корпуса 5 на изменение положений их платформ и соответственно на изгиб тела робота сообразно текущему изгибу внутренних стенок сосуда. Кроме того, САУ подает управляющие сигналы на модули SM5 SEMS жгутикового движителя 7 для обеспечения продвижения робота вдоль сосуда и на модули SM5 SEMS реснитчатых движителей 1, создающих гребные движения, благодаря которым обеспечивается большая проходимость робота в труднодоступных участках. Эти гребные движения жгутиков могут создавать также эффект чистки внутренней поверхности сосуда. Улучшение проходимости робота достигается за счет поворотов робота и изменения его толщины. Кроме того, САУ может подавать управляющие сигналы в модули с управляемой жесткостью 6, обеспечивая изменение жесткости конструкции корпуса 5 в соответствии с изменяющимися условиями движения в сосудах. После прибытия робота к месту назначения САУ подает сигналы в модули SM7 SEMS адаптивного захвата 4, обеспечивая удаление бляшек.

Медицинский микроробот может быть снабжен центральной нервной системой (ЦНС), в которой происходит обработка информации, вычисления, управление по параллельным каналам [11]. ЦНС робота выполняет функции САУ, собирает сведения об окружающей обстановке и «поведении» самого робота и вырабатывает управляющие воздействия, обеспечивая его целесообразное или целеустремленное поведение [11]. Обеспечение роботов ЦНС и ее совершенствование является очень важной и актуальной задачей. Поэтому для того, чтобы роботы могли самостоятельно, обходясь без вмешательства человека, формулировать задачи и успешно их выполнять, они должны не только быть снабжены более совершенными датчиками ощущений, но и иметь способность понимать язык ощущений, т. е. обладать чувствами типа «свой — чужой», «опасно — безопасно», «любимый — нелюбимый», «приятно — неприятно» и др.

При создании ЦНС роботов целесообразно использовать, и в ряде случаев уже используется,

бионический подход [12]. При этом ЦНС будет содержать следующие параллельные цепочки: РЕЦЕПТОРЫ (сенсоры, датчики и другие измерительные системы робота) → НЕРВНАЯ ЦЕПЬ (информационный канал приема сигналов и их первичная обработка) → ЗОНЫ КОРЫ (объединение сигналов, распознавание, классификация, принятие решения) → ИМПУЛЬС (информационный канал передачи управляющих сигналов, их преобразование и формирование управляющего воздействия) → РЕАКЦИЯ (перемещение, растяжение и другие действия рабочих органов робота).

### Управление движением группой роботов

При одновременной работе группы микророботов в сосудистой системе человека возникает задача ситуационного управления. Например, задача формирования формаций [13], отработки согласованных движений [14], совместного поиска и транспортировки объектов [15, 16] и др.

Однако рассматриваемые в этих задачах механизмы не гарантируют полноту инструментария, который необходим для решения всех задач, которые могут ставиться перед группой микророботов. Необходим еще один уровень управления, который являлся бы интерфейсом между группой и оператором, ставящим целевые задачи [17, 18], и который можно отнести к оптимизационным задачам ситуационного управления [19–21]. При этом оператором может быть не только человек, но и компьютерная программа, принимающая решения [22, 23].

Характерным примером ситуационного управления роботами, перемещающимися в сосудах, может быть задача перевода группы роботов  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , размещенных в момент времени  $t_0$  в точках  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  окружающего ограниченного пространства  $L^3 \subset E^3$  ( $E^3$  — трехмерное евклидово пространство), в целевые точки  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  этого пространства к моменту времени  $t_f$  за минимальное время

$$T = t_f - t_0 \rightarrow \min \quad (1)$$

при минимальной вероятности столкновения роботов

$$P_A \rightarrow \min. \quad (2)$$

Обычно при использовании различных математических методов оптимизации условие (2) заменяется неравенством вида

$$\sum_{i,j} m_{ij}(t_k) \leq M, \quad (3)$$

где  $M$  — максимально допустимое число столкновений;  $i, j$  — номера роботов из чисел от 1 до  $n$

( $i \neq j$ );  $k$  — номер момента времени из промежутка времени  $T$ ; значение  $m_{ij}(t_k)$  определяется из логического выражения

Если в момент времени  $t_k$  траектория движения  $r_i$  робота  $a_j$  пересекается с траекторией движения  $r_j$  робота  $a_i$ , то есть  $r_i \cap r_j \neq \emptyset$ , то  $m_{ij}(t_k) = 1$ , иначе  $m_{ij}(t_k) = 0$ .

Поиск решения поставленной задачи производится в окружении выбора среды, которое меняется во времени  $t$ , т. е. является динамическим  $O(t)$ . Его можно разбить на слои  $O(t_k)$  с некоторым постоянным или переменным шагом  $h_k$ :

$$O(t) = \{O(t_0), \dots, O(t_k), \dots, O(t_f)\}. \quad (4)$$

Каждый слой  $O(t_k)$  ( $k = 0, 1, \dots, [t_f/h_k]$ ) содержит окружающее пространство  $L^3$ , разбитое на ячейки  $e_q(t_k)$  с постоянными либо переменными шагами  $h_x, h_y, h_z$  по осям  $X, Y, Z$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$  — номер ячейки):

$$O(t_k) = \{e_1(t_k), e_2(t_k), \dots, e_Q(t_k)\}. \quad (5)$$

Каждая ячейка  $e_q(t_k)$  характеризуется наличием либо отсутствием роботов  $a_i$ , различных препятствий  $B_i(t_k)$  и др.:

$$B_i(t_k) = \{v_i(t_k), w_i(t_k), \gamma(t_k), \dots\}. \quad (6)$$

Кроме того, каждая ячейка характеризуется матрицами взаимодействия робота со средой  $G(t_k) = \{G_1(t_k), G_2(t_k), \dots, G_v(t_k)\}$ , описывающими влияние среды ячейки на динамическое состояние робота, а совокупность ячеек — правилами движения типа ЕСЛИ — ТО.

Сложность поставленной задачи, требующей использования методов ситуационного управления, заключается в том, что параметры и функции, характеризующие ячейки  $e_q(t_k)$ , могут быть детерминированными, стохастическими либо не полностью определенными.

При централизованном управлении с оператором необходимы [17] взаимодействие между группой роботов и оператором; создание базы данных и базы правил об окружающей среде и роботах [24]; декомпозиция поставленной задачи на подзадачи; построение совместного плана действий группы роботов; распределение зон ответственности между роботами [25].

Большинство из этих функций характерны и для любой другой структуры управления. Для того чтобы рассматриваемая структура гарантированно обладала свойством полноты (т. е., если цель достижима, то последовательность действий к цели будет найдена), необходим доступ всех роботов группы к базе данных и знаний оператора. Это накладывает определенные ограничения на время доступа к общей базе каждого члена груп-

пы и требует вычисления и динамического перераспределения приоритетов на последовательность управления членами группы роботов.

При любом структурном подходе к организации ситуационного управления группой роботов необходимо собирать информацию о параметрах окружающей среды, о текущем состоянии отдельных роботов, о планируемых действиях членов группы роботов и др. После сбора информации в общем случае окружение выбора  $O(t_k)$  может быть охарактеризовано в некоторый момент времени  $t_k$  следующим кортежем:

$$O(t_k) = \langle A(t_k), S(t_k), F(t_k), \sum_{i,j} m_{ij}(t_k), M, B_i(t_k), G(t_k), R_m(t_k) \rangle. \quad (7)$$

Планирование ситуационного управления группой роботов заключается:

— в разделении групповой задачи на подзадачи:

$$O(t_0) \xRightarrow{U(t_1)} O(t_1), \dots, O(t_0) \xRightarrow{U(t_f)} O(t_f); \quad (8)$$

$$U(t_k) = \{u_{a_1}(t_k), u_{a_2}(t_k), \dots, u_{a_n}(t_k)\}, \quad (9)$$

где  $u_{a_i}(t_k)$  — управляющее воздействие, подаваемое на робот  $a_i$  в момент времени  $t_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, f$ ;

— в распределении между роботами группы решений подзадач так, чтобы решение групповой задачи осуществлялось за минимальное время с учетом имеющихся ограничений, в том числе и на информационное взаимодействие.

В общем виде решением групповой задачи управления будет синтез алгоритма поиска упорядоченного множества  $\omega \subset \Omega$  из множества альтернативных комбинаций управлений  $U(t_k)$  лучших сочетаний законов управления каждого члена группы роботов  $u_{a_i}$  на основе оценок качества  $Q$ , построенных с учетом системы предпочтений и окружения выбора  $O(t_k)$ :

$$\omega \subset 2^U \times Q^U, \quad (10)$$

где  $2^U$  обозначает множество всех подмножеств  $U$ , а  $Q^U$  — множество всех оценок качества (кортежей длиной от 2 до  $|U|$ );  $\times$  — знак декартова произведения.

В связи с тем, что параметры и функции, характеризующие окружение выбора, могут быть детерминированными, стохастическими либо не полностью определенными, при решении такой

оптимизационной задачи требуется не полностью определенные ограничения записывать в виде логико-вероятностных и логико-лингвистических выражений. В дальнейшем эти ограничения целесообразно переводить с использованием введенных ранее [26] теорем в логико-интервальные сведения. Тогда решение оптимизационной задачи можно свести к решениям ряда классических задач математического программирования.

## Заключение

Использование различных объединений модулей SEMS в моделях медицинских микроботов обеспечивает высокую точность, быстродействие и адаптивность к окружающей среде, так как, в отличие от известных конструкций, применяемых в микроботах, в данном случае вводится параллелизм не только в процессы измерения и вычисления, но и в процессы исполнения управляющих команд [10]. Причем системы управления такими роботами целесообразно строить в виде ЦНС робота. Структура и алгоритмы построения такой системы впервые предложены авторами [11, 12] по аналогии с ЦНС человека.

Управление движением группой таких роботов можно отнести к оптимизационным задачам ситуационного управления. Тогда планирование ситуационного управления будет заключаться в разделении групповой задачи на подзадачи и в распределении между роботами группы решений подзадач так, чтобы решение групповой задачи осуществлялось за минимальное время с учетом имеющихся ограничений, в том числе и на информационное взаимодействие. Сложность поставленной задачи заключается в том, что параметры и функции, характеризующие окружение выбора, могут быть детерминированными, стохастическими либо не полностью определенными. Имеющиеся в этом случае логико-вероятностные и логико-лингвистические ограничения целесообразно переводить в логико-интервальные. Тогда решение оптимизационной задачи можно свести к решению ряда классических задач математического программирования.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-04424, 18-01-00076, 19-08-00079.

## Литература

1. Tarasova I. L., Kurbanov V. G., Gorodetskiy A. E. Adaptive Capture. In: *Smart Electromechanical Systems: The*

*Central Nervous System. Series: Studies in Systems, Decision and Control/* Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 119–143. doi:10.1007/978-3-319-53327-8\_10

2. Пат. PCT/US2011/025001 США, B25J 15/00 (2006.01), B25J 15/08 (2006.01). A Dexterous and compliant robotic finger, Torres-Jara (EC), Eduardo R. A. (US). № WO/2011/152898; заявл. 16.02.2011, опубл. 08.12.2012.
3. Li Zhang, Jake J. Abbott, Lixin Dong, Bradley E. Kratochvil, Dominik Bell, Bradley J. Nelson. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 6, 064107. doi:10.1063/1.3079655
4. <https://robo-hunter.com/news/mikroskopicheskie-roboti-ustriciv-vashih-glazah> (дата обращения: 21.05.2013).
5. <https://nplus1.ru/news/2017/07/25/blood-roboswimmers> (дата обращения: 21.05.2013).
6. [https://robo-hunter.com/?utm\\_source=geek-times&utm\\_campaign=1-02&utm\\_content=1-02](https://robo-hunter.com/?utm_source=geek-times&utm_campaign=1-02&utm_content=1-02) (дата обращения: 21.05.2013).
7. <http://integral-russia.ru/2018/02/03/17307/> (дата обращения: 21.05.2013).
8. Пат. № 2469752 РФ, МПК: А61М37/00. Медицинский микроробот. Агапов В. А. (RU), Городецкий А. Е. (RU), Кучмин А. Ю. (RU), Селиванова Е. Н. (RU). № 2011120517/14; заявл. 20.05.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35. 7 с.
9. Hongliang Ren, Hritwick Banerjee. A Preface in Electromagnetic Robotic Actuation and Sensing in Medicine. In: *Electromagnetic Actuation and Sensing in Medical Robotics*/ Eds. Hongliang Ren, Jinji Sun. 2018. P. 1–10. doi:10.1007/978-981-10-6035-9\_1
10. *Smart Electromechanical Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control* / Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. Vol. 49. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
11. *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control* / Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. 270 p. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
12. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Принятие решений в центральной нервной системе робота. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 1, с. 21–30. <https://doi.org/10.15217/issnl684-8853.2018.1.21>
13. Rubenstein M., Ahler C., Nagpal R. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, Saint Paul, Minnesota, May 14–18, 2012, pp. 3293–3298. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224638>
14. Jong-Hyun Lee, Chang Wook Ahn, Jinung An. An approach to self-assembling swarm robots using multitree genetic programming. *The Scientific World Journal*, 2013, no. 1, pp. 10. Article ID 593848. doi:10.1155/2013/593848
15. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolffi S., Baaboura T., Birattari M., et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 60–71. doi:10.1109/MRA.2013.2252996
16. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Situational Control a Group of Robots Based on SEMS. In: *Smart Electromechanical Systems: Group Interaction*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control* / Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9
17. Воробьев В. В. Логический вывод и элементы планирования действий в группах роботов. *Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2018*/ тр. конф., Москва, 24–27 сентября 2018 г., т. 1, М., 2018, с. 88–96.
18. Иванов Д. Я., Шабанов И. Б. Модель применения коалиций интеллектуальных мобильных роботов при ограниченных коммуникациях. *Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту КИИ-2018*/ тр. конф., Москва, 24–27 сентября 2018 г., т. 1, М., 2018, с. 97–105.
19. Поспелов Д. А. *Ситуационное управление: Теория и практика*. М., Наука, 1986. 286 с.
20. Кунц Г., О Доннел С. *Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций*. М., Прогресс, 2002. 588 с.
21. Зацаринный А. А., Козлов С. В., Шабанов А. П. Об информационной поддержке деятельности в системах управления критическими технологиями на основе ситуационных центров. *Системы управления, связи и безопасности*, 2017, № 4, с. 98–113. <http://sees.intelgr.com/archive/2015-04/05-Zatsarinnyu.pdf> (дата обращения: 26.02.2019).
22. Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. Logical-mathematical model of decision making in central nervous system SEMS. In: *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*/ Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 51–60. doi:10.1007/978-3-319-53327-8\_4
23. Dolgova E. V., Fayzrakhmanov R. A., Kurushin D. S. Decision-making in autonomous mobile robot control system based on active semantic network. *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, Saint-Petersburg, Russia, May 24–26, 2017, с. 221–223.
24. Ludovico Orlando Russo, Stefano Rosa, Marcello Maggiora, Basilio Bona. A novel cloud-based service robotics application to data center environmental monitoring. *Sensors*, 2016 Aug, vol. 16, iss. 8, p. 1255. doi:10.3390/s16081255
25. Mohammed Owais Qureshi, Rumaiya Sajjad Syed. The impact of robotics on employment and motivation of employees in the service sector, with special reference to health care. *Safety and Health at Work*, 2014, vol. 5, iss. 4, pp. 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.07.003>

26. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova, Vugar G. Kurbanov. *Reduction of Logical-Probabilistic and Logical-Linguistic Constraints to Interval Constraints in the Synthesis of Optimal SEMS*. Series:

*Studies in Systems, Decision and Control*/ Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9-7

UDC 621.865.8, 616.7

doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

### Controlled microrobot for moving in human vessels

A. E. Gorodetskiy<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-3465-4438

I. L. Tarasova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2282-150X, g17265@yandex.ru

V. G. Kurbanov<sup>a,b</sup>, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2450-9341

<sup>a</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The creation of controlled microrobots capable of moving in human vessels in accordance with a given traffic is a sophisticated problem. An effective way to solve it is the use of SEMS (Smart ElectroMechanical System) modules. These modules connected in a special way can simulate the operation of a ciliary apparatus or a flagellated propulsor used as propulsive devices for a microrobot. **Purpose:** Development of a controlled medical microrobot based on standard SEMS modules. **Results:** A medical microrobot is developed. The principles of collective movement control for such microrobots are discussed. A special role in microrobot group control is assigned to the central nervous system of a microrobot which functions as an automatic control system. When synthesizing an optimal situational control over a group of microrobots, logical-probabilistic and logical-linguistic constraints are translated into logical-interval ones, reducing the optimization problem to solving a number of classical mathematical programming problems. **Practical relevance:** The use of various combinations of SEMS modules in medical microrobots allows you to increase their accuracy, speed and adaptability to the environment. This is because in this case, in contrast to the mechanisms commonly used in microrobots, parallelism is introduced not only in the measurement and calculation processes, but also in the execution of control commands. The design features of the developed modules allow you to provide broad technological capabilities of various biomedical complexes.

**Keywords** — safe control, intelligent robots, smart electromechanical systems, group situational interaction, dynamic configuration space, central nervous system.

**For citation:** Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. Controlled microrobot for moving in human vessels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 38–44 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-4-38-44

### References

1. Tarasova I. L., Kurbanov V. G., Gorodetskiy A. E. *Adaptive Capture*. In: *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 119–143. doi:10.1007/978-3-319-53327-8\_10
2. Torres-Jara (EC), Eduardo R. A. (US) *Dexterous and compliant robotic finger*, Patent USA, no. PCT/US2011/025001, 2012.
3. Li Zhang, Jake J. Abbott, Lixin Dong, Bradley E. Kratochvil, Dominik Bell, Bradley J. Nelson. Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, iss. 6, 064107. doi:10.1063/1.3079655
4. Available at: <https://robo-hunter.com/news/mikroskopicheskie-roboti-ustrici-v-vashih-glazah> (accessed 21 May 2019).
5. Available at: <https://nplus1.ru/news/2017/07/25/blood-robot-swimmers> (accessed 21 May 2019).
6. Available at: [https://robo-hunter.com/?utm\\_source=geek-times&utm\\_campaign=1-02&utm\\_content=1-02](https://robo-hunter.com/?utm_source=geek-times&utm_campaign=1-02&utm_content=1-02) (accessed 21 May 2019).
7. Available at: <http://integral-russia.ru/2018/02/03/17307> (accessed 21 May 2019).
8. Agapov V. A. (RU), Gorodetskiy A. E. (RU), Kuchmin A. Yu. (RU), Selivanova E. N. (RU). *Medicinskij mikrorobot* [Medical microrobot]. Patent RU, no. № 2469752, 2012.
9. Hongliang Ren, Hritwick Banerjee. *A Preface in Electromagnetic Robotic Actuation and Sensing in Medicine*. In: *Electromagnetic Actuation and Sensing in Medical Robotics*. Eds. Hongliang Ren, Jinji Sun. 2018. P. 1–10. doi:10.1007/978-981-10-6035-9\_1
10. *Smart Electromechanical Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. Vol. 49. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5
11. *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. 270 p. doi:10.1007/978-3-319-53327-8
12. Gorodetskiy A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Decision-making in central nervous system of a robot. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 21–30 (In Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2018.1.21>
13. Rubenstein M., Ahler C., Nagpal R. Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. *Proc. of IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, Saint Paul, Minnesota, May 14–18, 2012, pp. 3293–3298. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224638>
14. Jong-Hyun Lee, Chang Wook Ahn, Jinung An. An approach to self-assembling swarm robots using multitree genetic programming. *The Scientific World Journal*, 2013, no. 1, pp. 10. Article ID 593848. doi:10.1155/2013/593848
15. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolfi S., Baaboura T., Birattari M., et al. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, vol. 20, no. 4. doi:10.1109/MRA.2013.2252996
16. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. *Situational Control a Group of Robots Based on SEMS*. In: *Smart Electromechanical Systems*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Ed. Andrey E. Gorodetskiy. Springer International Publishing, 2016. Vol. 49. 277 p. doi:10.1007/978-3-319-27547-5

- chanical Systems: Group Interaction. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9
17. Vorob'ev V. V. Logical inference and action planning elements in robot groups. *Proc. 16th National Conf. on Artificial Intelligence KII-2018*, Moscow, 2018, vol. 1, pp. 88–96 (In Russian).
  18. Ivanov D. Ya., Shabanov I. B. Model of application of coalitions of intelligent mobile robots with limited communications. *Proc. 16th National Conf. on Artificial Intelligence KII-2018*, Moscow, 2018, vol. 1, pp. 97–105 (In Russian).
  19. Pospelov D. A. *Situacionnoe upravlenie: Teoriya i praktika* [Situational Management: Theory and Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 286 p. (In Russian).
  20. Kunc G., O Donnel S. *Upravlenie: sistemnyj i situacionnyj analiz upravlencheskih funkcij* [Management: system and situational analysis of management functions]. Moscow, Progress Publ., 2002. 588 p. (In Russian).
  21. Zatsarinnyy A. A., Kozlov S. V., Shabanov A. P. Information support for the activities of the critical technologies in control systems based on situational centers. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 98–113. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2015-04/05-Zatsarinnyy.pdf> (accessed 26 February 2019) (In Russian).
  22. Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L., Kurbanov V. G. *Logical-mathematical model of decision making in central nervous system SEMS*. In: *Smart Electromechanical Systems: The Central Nervous System*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Vugar G. Kurbanov. Springer International Publishing, 2017. Vol. 95. P. 51–60. doi:10.1007/978-3-319-53327-8\_4
  23. Dolgova E. V., Fayzrakhmanov R. A., Kurushin D. S. Decision-making in autonomous mobile robot control system based on active semantic network. *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, Saint-Petersburg, Russia, 2017, pp. 221–223 (In Russian).
  24. Ludovico Orlando Russo, Stefano Rosa, Marcello Maggiora, Basilio Bona. A novel cloud-based service robotics application to data center environmental monitoring. *Sensors*, 2016 Aug, vol. 16, iss. 8, p. 1255. doi:10.3390/s16081255
  25. Mohammed Owais Qureshi1, Rumaiya Sajjad Syed. The impact of robotics on employment and motivation of employees in the service sector, with special reference to health care. *Safety and Health at Work*, 2014, vol. 5, iss. 4, pp. 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.07.003>
  26. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova, Vugar G. Kurbanov. *Reduction of Logical-Probabilistic and Logical-Linguistic Constraints to Interval Constraints in the Synthesis of Optimal SEMS*. In: *Smart Electromechanical Systems: Group Interaction*. Series: *Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Springer International Publishing, 2019. Vol. 174. 337 p. doi:10.1007/978-3-319-99759-9-7

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.