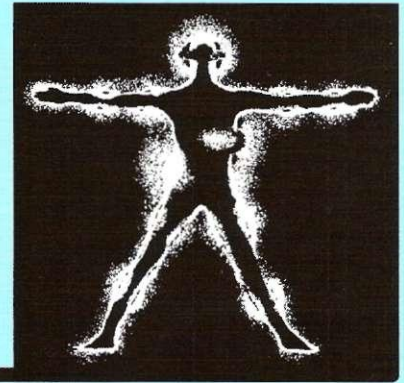


ISSN 1560-4136

БИОМЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



Biomedicine Radioengineering

5' 2013

В номере:

Концепция мобильных автономных
сервисных роботов для медицины

Оценка взаимосвязей между параметрами
сердечно-сосудистой системы человека

и др.



тел./факс: +7(495) 625-92-41
info@radiotec.ru

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 47339 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ



© Авторы, 2013

**Дмитрий Алексеевич
Рогаткин –**

д.т.н., доцент, зав. лабораторией
медико-физических исследований,
Московский областной
научно-исследовательский клинический
институт им. М.Ф. Владимирского
E-mail: rogatkin@medphyslab.com.

**Денис Григорьевич
Лапитан –**

мл. науч. сотрудник, лаборатория
медико-физических исследований,
Московский областной
научно-исследовательский клинический
институт им. М.Ф. Владимирского
E-mail: lapitandenis@mail.ru

**Людмила Геннадьевна
Лапаева –**

ст. науч. сотрудник,
отделение эндоскопии,
Московский областной
научно-исследовательский клинический
институт им. М.Ф. Владимирского
E-mail: laserrog@umail.ru.

УДК 004.896, 616.78

Концепция мобильных автономных сервисных роботов для медицины

Д.А. Рогаткин, Д.Г. Лапитан, Л.Г. Лапаева

Исследовались перспективы создания и функционирования автономных мобильных сервисных медицинских роботов (СМР). Получена экспертная оценка перспективных функций назначения СМР, на основе которой на инженерно-техническом языке сформулирована обобщенная концепция функционирования СМР в клинике. Выдвинут и обоснован тезис о существовании конечного и исчерпывающего набора элементарных алгоритмов поведения робота, из которого складывается любое ситуационное поведение СМР при решении им любой поставленной ему задачи. Сформулировано положение об определяющей роли органов чувств робота в формировании набора переменных среды обитания и набора переменных внутренней среды робота. Выполнен анализ и разработано формальное инженерно-техническое описание целевых функций СМР. Разработана научно-обоснованная обобщенная структурно-функциональная схема рассматриваемых СМР и сформулированы первые контуры подхода к методологии и этапам формулировки медико-технических требований к ним.

Ключевые слова: сервисный медицинский робот, обобщенная концепция функционирования, стратегия поведения, алгоритм действий, среда обитания робота, внутренняя среда робота, медико-технические требования, программное обеспечение.

In this paper prospects of creation and functioning of the autonomous mobile service medical robots (SMR) were investigated. The expert assessment of perspective purpose functions of SMR was received on the basis of which the generalized concept of SMR functioning in clinics was formulated using engineering and technical language. The thesis about existence of a limited and exhaustive set of elementary behavior algorithms of the robot which is a basis of any situational behavior of the SMR at the performing any task was formulated and justified. The thesis about a defining role of sense organs of the robot in formation of a set of habitat variables as well as a set of variables of the internal environment of the robot was formulated. Formal engineering and technical description and analysis of the objective functions for SMR were performed. The scientific-proved and generalized block diagram of the considered SMR was developed as well as the first contours of approach to the methodology and formulation stages of medical and technical requirements to SMR were formulated.

Keywords: the service medical robot, a generalized concept of functioning, the strategy of behavior, the algorithm of actions, habitat of robot, the internal environment of the robot, medical and technical requirements, software.

Введение

В сравнительно недавно опубликованных обзорах [1 – 4] показано, что с 2000 г. во всем мире наблюдается взрывной интерес к медицинским робототехническим системам, в том числе к мобильным сервисным медицинским роботам (СМР). Это обусловлено разными причинами: и появлением на рынке малогабаритных и дешевых сервоприводов (обеспечение двигательной активности робота), и появ-

лением уже достаточно мощных по своим возможностям электронных микроконтроллеров (мозг робота), и развитием прикладного программного обеспечения, специально нацеленного на применение в робототехнике (управление роботом), например, конкретно для разработки СМР [5]. Все это в совокупности, чисто технологически, позволяет создавать сегодня достаточно эффективные коммерческие машины в отличие от периода 70 – 90-х годов прошлого столетия, когда теория и чаяния разработчиков несколько опережали реальные возможности промышленности. Но есть и другая причина, обуславливающая развитие именно СМР – это потенциальный спрос на них. Во всем мире в клиниках на сегодняшний день присутствует большой объем рутинного труда низкой квалификации (ежедневная уборка помещений, разнос еды по больничным палатам, лекарств и т.д.), где во многих случаях людей вполне могли бы заменить роботы. Конечно, по традиции, большую часть финансирования робототехники во всем мире поглощают сегодня силовые ведомства, но и гражданские разработки, в том числе и в области здравоохранения, сегодня не отстают от военных, поскольку сулят огромные прибыли. Такие крупные частные корпорации, как IBM, Intel, Apple, Panasonic и другие тратят собственные немалые средства на разработку роботов для медицины [4]. Ближайшие 10 – 15 лет, по данным Европейской Комиссии, проводившей соответствующие исследования [6], будут охарактеризованы тотальной «роботизацией» всей нашей жизни, включая медицину, подобно факту «нашествия» персональных компьютеров и сотовых телефонов в конце XX века. А одним из перспективных направлений роботизации в здравоохранении станут автономные подвижные СМР.

В мире известен десяток СМР, проходящих испытания или даже реально ранее работавших в клиниках, пусть и не очень продолжительное время. Начиная с первого мобильного СМР «AMS-car», работавшего в государственной больнице г. Фэрфакс (США) в середине 1970-х годов и перевозившего контейнеры с подносами для кормления больных [7], идея внедрения роботов в хозяйственный оборот в учреждениях здравоохранения буквально «витают в воздухе». В Интернете и в доступных журналах можно встретить уже сотни статей, посвященных различным СМР (проекты «RP-7», «RP-8», «HelpMate», роботы-санитары от Panasonic

Healthcare Co. и др.) [1]. Однако, прочитывая все эти публикации, создается впечатление, что подавляющее большинство из них носят не научный или инженерно-технический характер, а характер рекламных и демонстрационных публикаций. Очень слабо в них, например, описываются (или не описываются вовсе) теоретические основы проектирования таких роботов, обобщенные модели и алгоритмы поведения СМР в клинике, их функции назначения, медико-технические требования (МТТ) к конструкции и программному обеспечению (ПО) СМР. Создается впечатление, что сами разработчики этих роботов слабо себе еще представляют их общее функциональное назначение в клинике и вытекающие из этого общие инженерные принципы и подходы к разработке и созданию конструкций СМР, а также их ПО, которые, очевидно, должны существовать. Складывается впечатление, что разработки ведутся в основном «на ощупь», от случая к случаю, в зависимости от получения финансирования под тот или иной частный коммерческий проект.

Известны классические монографии по общей (промышленной) робототехнике [7 – 12]. Они посвящены не конкретно медицинским роботам, а разработке промышленных роботов общего назначения. Но и в них нам не удалось найти научных основ теоретического подхода к начальным этапам создания робота, основ описания и формализации целевых функций роботов, алгоритмов их поведения в переменных внешних условиях, методов описания среды обитания робота, путей синтеза модели его поведения. С чего начинать разработку робота? Очень богатый и глубокий материал в этих монографиях дается по частным вопросам конструкции сенсорных датчиков роботов, манипуляторов и захватов, элементов подвижной механической части робота и т.д., но общие базовые вопросы формального инженерно-технического описания предметной области задачи (тем более для медицины) в них не найти. И только в последнее время общим закономерностям в построении различных сервисных роботов стали уделять в публикациях отдельное внимание [5, 13]. Правда, в первую очередь, это теперь касается стратегии развития объектно-ориентированных языков программирования и практических приложений для построения операционных систем роботов. Можно сказать, что «маятник качнулся» в другую край-





ность, в сторону прикладного программирования.

Цель данной статьи — по возможности заполнить указанный пробел и показать, как из «первых принципов» можно сформулировать инженерный теоретический подход к задаче создания СМР. По результатам проведенных исследований в ГУ МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского в статье на инженерно-техническом языке формулируется обобщенная концепция функционирования СМР в клинике, обосновывается структурно-функциональная схема рассматриваемых СМР, а также описываются основные задачи разработчиков и пути формирования специализированных МГТ к СМР, логично вытекающие из сформулированных в исследовании теоретических положений.

Концепция функционирования СМР в клинике

На начальном этапе исследований путем опроса врачей и пациентов разных клиник многопрофильного клинического института (МОНИКИ) было получено словесное описание наиболее перспективных (как с точки зрения врачей, так и пациентов) применений СМР в учреждениях здравоохранения. Затем, методом экспертной оценки, были выполнены работы по систематизации, анализу и обобщению результатов этих опросов, на основе чего были определены следующие приоритетные задачи, которые было бы интересно решать и которые могут быть решены средствами СМР в клинике:

проведение первичной интерактивной лекции-экскурсии (10...15 мин) пациенту при поступлении в клинику о распорядке дня, расположении необходимых пациенту помещений в отделении (палаты, душевая, столовая), порядке проведения лечения, режиме питания, прогулок (для ходячих больных) и т.д.;

информирование пациента о назначенном времени проведения процедур диагностики/лечения, повторное напоминание за 15...20 мин до назначенного времени в каждый конкретный день;

поиск в пределах клиники заданного пациента/врача/медсестры/санитарки и передача им необходимых сообщений/поручений, в том числе срочных;

предоставление врачам и руководителям клиники функций телеприсутствия и видеореги-

страции, в том числе предоставление функции дистанционного общения с пациентами и медперсоналом посредством технологии «Skype» в любое время и в любом помещении (в коридоре, лечебном кабинете и т.п.);

предварительное включение на прогрев лечебно-диагностических приборов для проведения необходимых процедур;

контроль за выключением оборудования и ненужного освещения по окончании рабочего дня;

контроль за состоянием закрытых дверей, если двери должны оставаться закрытыми;

взаимодействие с архивом лучевых карт и историй болезни, доставка их в нужное время врачу в кабинет и назад в архив;

доставка лекарств и медицинских материалов пациентам в палаты;

доставка в палаты еды лежачим больным; вывоз мусора и отходов от них;

выслушивание (запись) просьб и жалоб пациентов и передача их медицинскому персоналу клиники;

оценка присутствия посторонних людей в помещении клиники и посторонних крупногабаритных предметов (сумок, чемоданов); информирование дежурных о наличии посторонних предметов/лиц без привлечения внимания последних к их обнаружению;

оценка общей экологической, санитарной, климатической, пожарной и т.п. ситуации в помещениях; срочное информирование персонала клиники и пациентов в случае возникновения нештатных (аварийных) ситуаций через мобильные средства связи или при непосредственном «живом» контакте (приехать в комнату, оповестить);

а также ряд других схожих информационных, поисковых и транспортных задач общего назначения.

Эти функциональные обязанности (или функции назначения) СМР оказались общими для большинства клиник МОНИКИ, а следовательно, являются типовыми для любого лечебно-диагностического учреждения. Более того, из приведенного перечня видно, что подавляющее большинство перспективных для СМР задач являются задачами транспортными и информационно-поисковыми в пределах заданного помещения, т.е. СМР необходим в клинике для выполнения весьма компактного и достаточно унифицированного набора простых поручений. Это де-

ляет обобщенную задачу функционирования СМР в клинике конечной, ограниченной (как в физическом пространстве помещения, так и в пространстве возможных решений) и замкнутой, т.е. все возможные ситуации и весь спектр возможных методов их решения могут быть описаны исчерпывающе. Соответственно, это позволяет выполнить абстрагированное и четко формализованное описание *обобщенной концепции функционирования СМР в клинике* следующим образом. Под термином *сервисный медицинский робот* в рамках данной работы понимается некое компактное, многофункциональное, подвижное и автономно функционирующее электронно-механическое устройство, которое работает в условиях учреждения здравоохранения и предназначено для выполнения внутри этого учреждения различных транспортных, поисковых и информационных задач, т.е. для выполнения различных поручений, связанных с поиском объектов, взаимодействием с объектом, получением информации, хранением информации, её обработкой и сообщением человеку. При этом из современного уровня развития техники известно, что для выполнения всех этих функций роботу требуется некая программа или *алгоритм действий*. Хотя понятие *алгоритм* – одно из основных понятий (категорий) математики, не обладающих формальным определением в терминах более простых понятий, которое абстрагируется непосредственно из опыта [14 – 16], мы в данном случае под *алгоритмом действия (A)* интуитивно понимаем некий обобщенный конечный набор инструкций-программ, сколь бы большим он ни был, но конечный, предназначенный для его пошагового выполнения роботом за конечное время τ в целях решения какой-либо конкретной поставленной задачи T . Постановка задачи может осуществляться внешним оператором – доктором, пациентом или самим роботом; не важно, кем конкретно. Важно, что для решения поставленной задачи T_i роботу требуется некий подробный и достаточный для ее решения пошаговый алгоритм действий A_i , который должен быть сформулирован роботу извне или создан роботом самостоятельно в виде рабочей программы и который потенциально может быть выполнен роботом за конечное время τ_i . Поскольку по определению A_i реализуются некоторыми конечными, последовательными и дискретными «шагами», сам робот можно считать универсальным конечным автоматом или универ-

сальной машиной Тьюринга, способной принимать дискретное и конечное множество различных возможных состояний $\{C_i\}$ в зависимости от заданных ему инструкций (алгоритма) и в зависимости от внешних исходных данных D_i , которыми оперирует этот алгоритм. Это следует из известного тезиса Чёрча-Тьюринга, что любой алгоритм в интуитивном смысле этого слова требует входных данных для оперирования и может быть представлен эквивалентной машиной Тьюринга [17].

Общая стратегия поведения СМР в клинике может быть тогда формально представлена следующим образом. Все задачи должны решаться роботом алгоритмически за счет его перемещения во внешней среде, поиска и установления последовательных (пошаговых) контактов с внешними объектами взаимодействия (врач, пациент, дверь кабинета врача, диагностический прибор и пр.), которые заложены в него в виде наборов переменных для опознания и взаимодействия. Робот перемещается по клинике и стремится к решению поставленной ему оператором (врачом, пациентом, другим роботом) конкретной задачи T_i в заданный отрезок времени. По мере его движения возникают переменные ситуации S_i , включая внештатные ситуации (например, перегорожен необходимый для робота проход), которые СМР должен решать уже автономно, без участия оператора, ставя себе самому промежуточные ситуационные цели и подзадачи t_{ij} и формируя *ситуационную стратегию поведения Str_{ij}* (обход препятствия, подзарядка аккумулятора и пр.). Лишь в крайнем случае неразрешимой для него ситуации СМР может полностью остановиться и выдать сигнал бедствия (беспомощности).

Еще в конце 1980-х гг. на примере утоления жажды стаканом воды в [7] было обосновано, что любая задача для роботов может быть разбита на ряд более простых подзадач (найти стакан, наполнить водой, поднести ко рту и т.д.), что, собственно, и следует из анализа принципа действия машины Тьюринга. В формальном математическом представлении это можно сформулировать так: любая поставленная роботу обобщенная (сложная, комплексная) задача T_i представляет собой сумму из M более простых ситуационных подзадач:

$$T_i = \sum_{j=1}^{j=M} t_{ij}. \quad (1)$$





Так как общее время решения любой сложной задачи T_i , по определению, конечно, то конечно и время решения каждой отдельной подзадачи t_{ij} , причем сумма времен решения всех отдельных подзадач является общим временем решения комплексной задачи T_i . Более того, поскольку разбиение по (1) задачи более высокого уровня на ряд более простых подзадач произвольно, любые две подзадачи более низкого уровня могут быть легко объединены в одну более сложную подзадачу более высокого уровня. И наоборот. Любая частная подзадача более низкого уровня может быть разбита на еще более мелкий ряд отдельных подзадач еще более низкого уровня. Глубина такого «вложения» для СМР определяется существованием некоторого конечного множества элементарных подзадач $\{T_e\}$, содержащего N элементов – N элементарных подзадач t_{en} , $n=1 \dots N$, дальнейшее дробление которых на более мелкие подзадачи невозможно или нецелесообразно:

$$\{T_e\} = \{t_{e1}; t_{e2}; t_{e3}; \dots; t_{eN}\}. \quad (2)$$

Конечность глубины вложения задач друг в друга следует, вообще говоря, и из определения о конечности времени решения любой отдельной подзадачи t_{ij} . Конечность же массива $\{T_e\}$ для СМР мы пока просто постулируем в рамках данной разрабатываемой концепции.

Все это вместе означает, что всю процедуру решения роботом любой комплексной задачи T_i можно описать конечным числом последовательно выполняемых элементарных алгоритмов A_{en} , $n=1 \dots N$, т.е. можно поставить во взаимно однозначное соответствие элементы некоего массива элементарных алгоритмов $\{A_e\}$ элементам массива $\{T_e\}$. Эти массивы могут быть большими, но в каждом конкретном случае число выполняемых A_{en} , которые сами не разбиваются уже на более элементарные алгоритмы и подпрограммы, для СМР конечно. Одним словом, для СМР любой элемент конечного множества возможных алгоритмов его действия $\{A\}$ может быть представлен последовательностью выполнения конечного набора из M элементарных алгоритмов множества $\{A_e\}$:

$$A_i = \underbrace{A_{e1}; A_{e3}; A_{e8}; A_{e1}; A_{e4}; \dots; A_{en}; \dots}_M \quad (3)$$

В этой последовательности каждый отдельный A_{en} из общего множества $\{A_e\}$ может использоваться

несколько раз, в том числе и подряд, или может не использоваться вовсе – все это диктуется выбранной ситуационной стратегией поведения Str_{ij} и общей решаемой задачей T_i . Но в каждом конкретном случае M конечно.

Поскольку каждый A_i , включая каждый элементарный A_{en} , требует для своей работы набор входных данных D_i , которые для СМР описывают параметры его текущего состояния C_i и параметры возникающей внешней переменной ситуации S_i , любой результат выполнения любого алгоритма A_i , представляющий собой новое состояние робота C_{i+1} , может быть представлен некоторой функцией A_i от суммы этих исходных входных параметров:

$$C_{i+1} = A_i(C_i + S_i). \quad (4)$$

Тогда общая процедура выполнения любой последовательности алгоритмов для достижения роботом некоторого следующего ситуационного состояния C_{i+1} может быть математически сформулирована следующим образом:

$$C_{i+1} = A_i(\dots A_3(A_2(A_1(C_1 + S_1) + S_2) + S_3) + \dots S_i). \quad (5)$$

Выражение (5) при задании явных видов функций A_i позволяет строить математические модели ситуационного поведения робота и в целом достаточно строго математически формализует разрабатываемую концепцию. Как следует из (5), в рамках этой концепции существует множество алгоритмов-функций (операций) $\{A\}$, включая $\{A_e\}$, как элементы $\{A\}$, которые применимы к результату таких же, аналогичных по сути, операций, т.е. фактически аргументы этих функций являются объектами той же природы, что и сами функции. Поэтому результат действия одной функции на другую (на ее результат) – так же есть результат, пригодный в качестве аргумента подобной следующей функции из множества $\{A\}$. Собственно, эта запись близка системе записи Черча в его лямбда-исчислении, а само соглашение является следствием одного из тезисов Тьюринга, что для любой пары вложенных одно в другое перечислимых множеств можно подобрать алгоритм, у которого большее множество служит множеством исходных данных, а меньшее – областью применимости [16]. Одним из ключевых элементов в успешной реализации концепции (5) является определение момента окончания выполнения роботом того или иного

выполняемого алгоритма A_i и выбор следующего алгоритма действия A_{i+1} . Здесь мы логически подходим к понятию *целевой функции* робота.

Целевые функции СМР

Целевая функция (ЦФ) по определению [16] – это линейная функция конечного числа переменных с наложенными на них ограничениями, экстремальные значения которой требуется достигнуть. Если достигается максимум ЦФ, то она отражает эффективность решения задачи, а если минимум, то – минимизацию расхождений. Эти термины пришли из математических задач экономики [14, 15] и не в полной мере адекватно отражают сегодня онтологию робототехники. Для СМР правильнее было бы, на наш взгляд, в большинстве случаев говорить об ошибке достижения цели, стремиться к минимуму ЦФ, а саму ЦФ именовать, как функцию *оценки условий достижения цели* (при каком условии можно считать, что цель достигнута и поставленная задача решена, т.е. каждый конкретный A_i успешно реализован?). Но в силу устоявшейся терминологии приходится оперировать понятием ЦФ, понимая под ней в рамках данной статьи функцию *оценки ошибки достижения цели*. В нашем понимании ЦФ Q здесь есть *мера, позволяющая определить степень расхождения текущего проверяемого состояния робота C_R и заданного для него целевого состояния C_T* . Тогда условие целенаправленного поведения СМР, а именно, наиболее точного и быстрого достижения цели, может быть на языке ЦФ записано следующим образом:

$$Q(|C_R - C_T|, \tau) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где Q – целевая функция; $\tau > 0$ – время.

Время не обязательно будет существенной переменной для каждой Q , но в большинстве информационно-поисковых и транспортных задач решение поставленной задачи имеет смысл лишь в заданный промежуток времени, по истечении которого смысл решения задачи (например, информирование пациента, что ему надо пройти в диагностический кабинет по окончании рабочего дня врача) теряется. При объектно-ориентированной парадигме ЦФ с точки зрения программирования на языках высокого уровня в большинстве случаев может выступать в качестве условия продолжения/прекращения целенаправленного действия СМР. По достижении су-

щественной переменной этой ЦФ некоторого ее порогового значения выполняемые действия робота прекращаются. В качестве порогового значения может выступать некая числовая константа для численных переменных функции, например, для пространственных координат и времени, логические ноль или единица для логических переменных (переменных типа *bool* в языке программирования C++) и т.д. В частности, основным условием любых действий СМР должно быть условие достаточности напряжения на аккумуляторах блока автономного питания робота, т.е. напряжение U_a на его аккумуляторах в процессе деятельности СМР не должно падать ниже некоторого допустимого порогового значения U_{a_min} . В противном случае робот рискует потерять «жизнь». Тогда основной цикл жизнедеятельности робота с точки зрения его программной реализации на C++ будет выглядеть так: `{do something while $U_a > U_{a_min}$ }`, а при «выпадении» из этого цикла СМР должен немедленно отправиться на подзарядку. Это эквивалентно условию минимизации целевой функции риска «потери жизни», которая, как вариант, для данного примера может выглядеть так:

$$Q\left(\frac{1}{|U_a - U_{a_min}|}\right) \rightarrow \min. \quad (7)$$

То же самое можно сказать, если роботу поставлена задача переместиться в комнату с номером $RoomID=N$. Общая стратегия тогда может быть выбрана таким образом, что СМР будет выполнять движения по карте по заранее выбранному маршруту до тех пор, пока текущий номер помещения, в котором он находится, не станет равным N . Т.е. *любые целевые функции СМР могут быть формально представлены на языках программирования высокого уровня как условия продолжения/прекращения выполнения роботом циклических алгоритмических процедур*. Для каждого элементарного A_{en} должна формулироваться своя Q_{en} из общего конечного массива $\{Q_e\}$. Снятие противоречий при многопараметрических ЦФ (функциях, зависящих от нескольких существенных переменных), согласно тезису о возможности разбиения любой задачи на последовательность выполнения отдельных элементарных подзадач, логично осуществлять путем вложения циклических алгоритмов один в другой и путем их последовательного выполнения по (3), когда в каждом отдельном цикле проверяется достижимость ре-





шения каждой отдельной элементарной подзадачи по одной существенной переменной (ехать в комнату N (приехал?), взять груз (взял?), ехать в комнату M (приехал?) и т.д.). Снятие же противоречий при многоцелевом функционировании робота, как и в живой природе, решается стандартным путем использования принципа доминанты и расстановки приоритетов ЦФ (иерархия целей).

Для СМР можно выделить четыре основные группы ЦФ [18]:

- 1) главные целевые функции назначения, задаваемые оператором;
- 2) вспомогательные целевые функции решения промежуточных (ситуационных) задач;
- 3) системные целевые функции самосохранения робота;
- 4) целевые функции контроля и сохранения среды обитания.

К первой группе ЦФ относятся функции проверки условий окончания решения задачи и ошибки достижения цели, заданной ему оператором. Например, роботу поставлена задача: найти пациента и проинформировать его о предстоящем сеансе лечения. Робот начинает решение задачи с построения плана движения по клинике по тем помещениям, где наиболее вероятно нахождение искомого пациента (его палата, коридор, столовая и т.д.) в данный момент времени. Соответственно робот сам ставит себе промежуточные частные подзадачи (доехать до палаты, выехать в коридор, обогнуть препятствие), сам формирует частные целевые функции и сам проверяет их на экстремум. Таким образом, формируется 2-я группа ЦФ – вспомогательные (или ситуационные) ЦФ; 3-я группа функций обеспечивает самосохранение робота и поддержание его всегда в работоспособном состоянии. Прежде всего, это функция проверки достаточности заряда аккумулятора. Об этом говорилось выше. Сюда также могут входить функции контроля правильной работоспособности привода колес, манипуляторов (если есть), функции контроля температурного режима процессоров внутри СМР и т.д., т.е. все функции оценки штатного состояния *внутренней среды робота*. Отдельный набор ЦФ должен быть выделен для контроля правильной работоспособности ПО робота (проверка отсутствия сбоев, контроль функционирования ячеек оперативной памяти и т.д.),

а также контроль авторизации доступа во внутреннюю среду робота посторонних людей. И 4-я группа ЦФ касается проверки условий, что СМР своими действиями не наносит вред другим обитателям клиники и другим предметам (принцип «не навреди»!), а также то, что в среде обитания не происходят никакие чрезвычайные события (пожар, залив водой и т.д.). Например, ставится условие не приближаться к человеку на расстояние менее 50 см без специальной на то команды, не заходить в какие-либо отдельно выделенные помещения, постоянно проверять наличие задымления помещения и т.п. Каждые из этих ЦФ должны обладать соответствующим приоритетом решения так, чтобы СМР в каждый конкретный момент времени помешал менее приоритетную задачу в очередь ожидания и выполнял более приоритетную задачу.

В общем случае более высоким приоритетом должны обладать функции более старшей группы. У 4-й группы – наивысший приоритет. Например, в обычной штатной ситуации падение напряжения на аккумуляторах ниже выбранного предела должно в приоритетном порядке прерывать выполнение всех остальных задач и отправлять робота на подзарядку, или в противном случае он «умрет». Однако, если обнаружена ситуация угрозы человеку, например, пожар, приоритет сохранения жизни робота должен уступать приоритету оповещения и спасения людей. Таким образом, штатные приоритеты и иерархия действий СМР могут быть наглядно пояснены рис. 1.

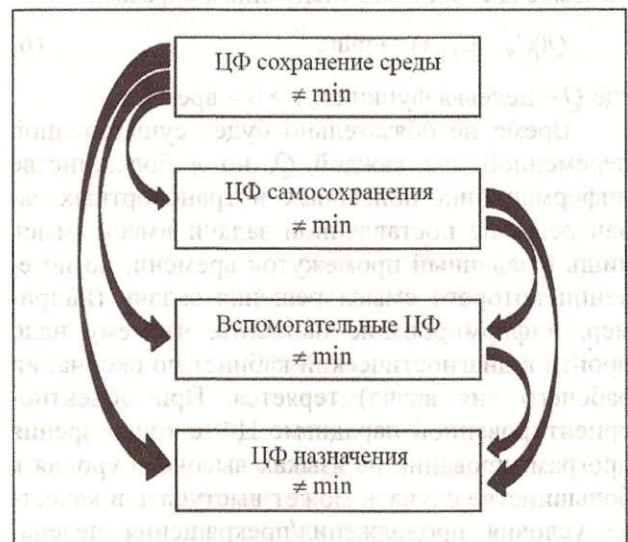


Рис. 1. Иерархия и приоритеты целевых функций СМР

Набор переменных, структурная схема и ключевые задачи проектирования

Анализируя изложенную концепцию, особенно выражения (3) – (7), можно заметить, что ее эффективность во многом определяется эффективностью и полнотой задания всех входных параметров модели C_i и S_i , а также полнотой задания массивов $\{A_e\}$ и $\{Q_e\}$. Каждая поставленная роботу задача должна транслироваться внутри робота в набор признаков (переменных) его конечного целевого состояния C_T . Внешние параметры ситуации S_i и текущее состояние робота C_R – суть тоже наборы переменных, по которым робот оценивает внешнюю обстановку и свою собственную внутреннюю среду. Внешняя среда обитания робота в клинике может быть классифицирована согласно рис. 2, где каждый объект, будь то объект территории (комната), предмет (прибор) или человек (пациент), имеет свои индивидуальные характерные признаки (размер, цвет, пропорции, имя, координаты на территории и т.д.). Оценивая эти признаки, СМР классифицирует объект взаимодействия и его состояние (для пациента – это, например, проинформирован он или нет, для прибора – включен/выключен, для прохода – свободен/занят, и т.д.) и принимает решение по построению плана действий. Одним словом, ключевым элементом всей этой парадигмы является конкретный список (массив) признаков (свойств) объектов внешнего и внутреннего мира, который надо закладывать в ПО робота на этапе его проектирования.

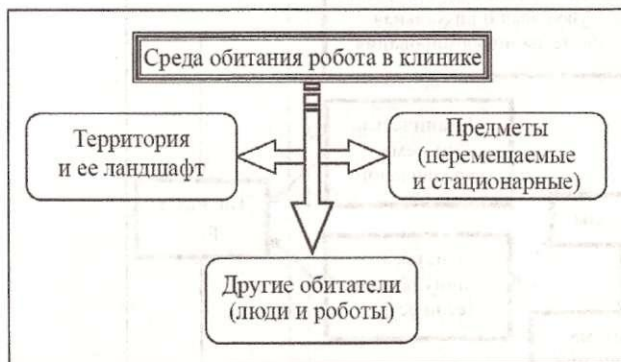


Рис. 2. Классификация среды обитания СМР

Какие же свойства надо в первую очередь формулировать и закладывать в ПО? Какая методология для этого может существовать? Очевидно, что «мыслить» робот об объектах мира и

принимать решение может, априори, лишь только в тех терминах и категориях, которые он умеет распознавать и классифицировать. Это определяет *основное правило* формирования набора переменных внешнего и внутреннего мира робота: набор существенных переменных должен определяться органами чувств робота и его системой распознавания образов, причем в широком смысле этого слова, т.е. как визуальных, так и любых других (звуковых и т.п.). Программное обеспечение робота должно оперировать только теми переменными, которые способен измерить (оценить) и классифицировать сам робот. Например, если робот снабжен всего лишь одним органом чувств в виде дальномера (лазерного или ультразвукового), то такой робот может только измерять геометрические размеры объектов и расстояния до них. Максимум, на что такой СМР может быть способен, так это по контурной карте расстояний до объектов вокруг себя и заложенной в память робота исходной карте помещения распознать наличие мебели в комнате, например, или контуры перемещающихся по комнате людей. Распознать самих людей между собой он сможет лишь в случае явного отличия их габаритных размеров друг от друга. Т.е. все его «представления» о внешнем мире и об объектах внешнего мира при таком варианте конструкции его органов чувств могут быть только метрическими. Одним словом, именно наличие у СМР конкретного набора органов чувств – сенсоров – и определяет те существенные свойства объектов мира, которые должны закладываться при проектировании в ПО робота в виде его модели мира. И именно от сенсорной системы робота и сопряженной с ней системы распознавания образов, от их совместной способности к вычленению и категоризации объектов внешнего и внутреннего мира робота и будет зависеть весь дальнейший облик всей «мыслительно-логической» начинки ПО СМР. Не исключено, что по сложности функционирования, трудоемкости создания и объему необходимых вычислительных ресурсов система распознавания образов для серьезных, профессиональных и многофункциональных СМР может превосходить центральную программу «логического интеллекта» робота, содержащую основные логические решающие правила и наборы алгоритмов. Во всяком случае, анализ известных данных по анатомии и физио-





логии работы головного мозга человека косвенно подтверждают эту мысль: более половины объема коры головного мозга занято выполнением функций анализа данных органов чувств человека (зрения, слуха, осязания и т.д.) и лишь сравнительно небольшие по объему область Вернике, область Брока, гиппокамп, префронтальная ассоциативная области и т.п. ответственны за истинно «мыслительные» процессы [19].

Полученные результаты позволяют теперь обоснованно сформулировать и первые контуры подхода к методологии и этапам проектирования СМР, включая контуры этапов формулировки будущих МТТ. На первом этапе определяются и как можно более подробно описываются для МТТ все функции назначения СМР в клинике. После определения исчерпывающего набора функциональных обязанностей проектируемого СМР формулируются требования к системе сенсоров и распознавания образов для робота в увязке с параллельной разработкой набора существенных и вспомогательных переменных для всех объектов (и элементов этих объектов) внутренней и внешней среды СМР, которые в совокупности позволят роботу выполнять все заданные на первом этапе для него функции поиска и анализа состояния объектов, а также позволят ему в будущем эффективно взаимодействовать с этими объектами. Затем, имея исчерпывающий набор всех переменных, под эти переменные определяются (разраба-

тываются) все необходимые требования к массивам $\{A_e\}$ и $\{Q_e\}$. Формулируются приоритеты действий робота и разрабатываются требования к решающим правилам для выбора того или иного конкретного ситуационного алгоритма. Реализация этих алгоритмов во многом производится аппаратной частью робота. Поэтому следующий этап – требования к аппаратным узлам СМР. Поскольку основные функции СМР – информационные и поисково-транспортные, основные исполнительные органы такого робота – звуковая и визуальные системы информирования, а также механическая система передвижения. Робот может также обладать различными манипуляторами, например, для целей погрузки/разгрузки грузов, но это не является обязательным. Робот может иметь, скажем, лишь лоток, куда люди сами будут класть и откуда сами будут забирать перевозимые СМР предметы. Т.е. отсутствие манипуляторов, в целом, не нарушает общности приведенных выше рассуждений и не умаляет эксплуатационные качества СМР для его применения в клинике. Но в общем случае у него могут быть еще приводы управления сенсорами (например, поворотом глаз).

Все сказанное позволяет в заключение легко обосновать обобщенную структурно-функциональную схему рассматриваемых СМР, представленную на рис.3. Надеемся, она теперь уже не требует особых пояснений. Специализированные МТТ к каждому отдельному элементу этой



Рис. 3. Обобщенная структурная схема рассматриваемых СМР

схемы и являются предметом рассмотрения на следующих этапах формулировки МТТ.

Заключение

В работе представлен формализованный инженерно-теоретический подход к задаче описания функционирования СМР в клинике. Показано, что современный СМР действует алгоритмически, т.е. в этом смысле он является конечным автоматом по Тьюрингу. Любая поставленная роботу обобщенная задача T_i представляет собой сумму из M более простых ситуационных подзадач. Глубина «вложения» подзадач одна в другую определяется существованием некоторого множества элементарных подзадач $\{T_e\}$, которому соответствуют множества элементарных алгоритмов $\{A_e\}$ и целевых функций $\{Q_e\}$, дальнейшее дробление которых на более мелкие подзадачи, алгоритмы и подпрограммы невозможно или нецелесообразно. Среда обитания СМР в клинике и внутренняя среда СМР должны описываться с присвоением всем объектам среды только тех их уникальных индивидуальных свойств (параметров, переменных), которые способны «видеть» и классифицировать органы чувств робота совместно со встроенной системой

распознавания образов, причем инвариантно по отношению к меняющимся условиям наблюдения объекта. А целевые функции СМР могут быть тогда формально представлены на языках программирования высокого уровня как условия продолжения/прекращения выполнения циклических алгоритмических процедур на основе оценки (сравнения) этих параметров в виде текущих их ситуационных и заданных целевых значений.

На наш взгляд, данный подход, не обладая какой-либо революционной научной новизной, тем не менее, в приложении к задачам создания СМР, позволяет абстрактно обрисовать обобщенную концепцию функционирования СМР в клинике, научно обосновать структурно-функциональную схему рассматриваемых СМР и впервые обоснованно наметить контуры подхода к методологии и этапам формулировки специализированных МТТ к данному классу медицинских автоматизированных систем.

Авторы благодарят проф. Селищева С.В. за ряд любезно предоставленных первоисточников.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 12-08-00415а.

Литература

1. Краевский С.В., Рогаткин Д.А. Медицинская робототехника: первые шаги медицинских роботов // Технологии живых систем. 2010. Т.7. № 4. С. 3 – 14.
2. Саврасов Г.В. Тенденции развития медицинской робототехники // Биомедицинская радиоэлектроника. 2007. № 10. С. 42 – 46.
3. Taylor R. H. A perspective on medical robotics // Proc. IEEE, Special issue «Medical Robotics», Ed. By T. Kanade, B. Davis, and C.N.Riviere. 2006. V.94. № 9. P. 1652 – 1664.
4. Wang Y., Butner S.E., and Darzi The developing market for medical robotics // Proc. IEEE, Special issue «Medical Robotics», Ed. By T. Kanade, B. Davis, and C.N. Riviere. 2006. V. 94. № 9. P. 1763 – 1770.
5. Somby M. Software platforms for service robots // Servo. 2009. № 1. P. 50 – 60.
6. Butter M., Rensma A., Boxel J. et al. Robotics for Healthcare // Final report of the study within framework of the eHealth activities of the EU Commission. Brussel: EU Commission. DG Information Society. 2008. 179 p.
7. Накано Э. Введение в робототехнику. / Пер. с японского под ред. А.М. Филатова. М.: Мир. 1988. 334 с.
8. Интегральные роботы: Сб. статей / пер. с англ. под ред. Г.Е. Поздняка. М.: Мир. 1973. 624 с.
9. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника / Пер. с англ. М.: Мир. 1989. 624 с.
10. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой / Пер. с франц. М.: Мир. 1985. 285 с.
11. Янг Дж. Ф. Робототехника / Пер. с англ. Л.: Машиностроение. 1979. 300 с.
12. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 416 с.
13. Iborra A., Caceres D.A., Ortiz F. J. et al. Design of service robots // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2009. №3. P. 24 – 33.
14. Вишиков И.А., Попов В.Ю., Пчелинцев С.В. Линейная алгебра. Ч. 4: Линейное программирование: Учебное пособие для подготовки бакалавров / под ред. В.Б. Гусина и С.В. Пчелинцева. М.: Финакадемия. 2009. 112 с.
15. Кузнецов А.В., Сакович В.А., Холод Н.И. Высшая математика. Математическое программирование. Минск: Вышэйшая школа. 1994. 288 с.
16. Калабухов С.Ю. Дискретная математика. Шахты: ЮргУС. 2006. 150 с.
17. Church A. The calculi of lambda-conversion // Annals of Mathematics Studies. Princeton University Press. 1941. № 6.
18. Лаптан Д.Г., Рогаткин Д.А., Куликов Д.А., Рогаткин А.Д. Целевые функции сервисных медицинских роботов в клинике // Сб. материалов X Междунар. науч. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2012). г. Владимир: ВГУ. С. 228 – 230.
19. Гайтон А.К., Холл Дж. Э. Медицинская физиология / пер. с англ. под ред. В.И. Корбина. М.: Логосфера. 2008. 1256 с.

Поступила 22 февраля 2013 г.



Conception of the mobile autonomous service medical robots

© Authors, 2013

D.A. Rogatkin, D.G. Lapitan, L.G. Lapaeva

World over the explosive interest to medical robotic systems including mobile service medical robots (SMR) is observed. However there is a certain gap in scientific, engineering and technical theoretical foundations of creation of SMR and their functioning in clinics. Therefore, this article presents the formalized theoretical engineering approach to the task of engineering and technical description of SMR functioning in clinics.

The expert assessment of perspective purpose functions of SMR was received and on the basis of which the generalized concept of SMR functioning in clinics was formulated using engineering and technical language. It is shown that the modern SMR operates algorithmically i.e. in this sense it is a finite automaton of Turing. The thesis about the existence of a limited and exhaustive set of elementary behavior algorithms of the robot which is a basis of any situational behavior of the SMR at the performing of any task was formulated and justified. In the case, a generalized problem for the robot can be divided into a series of simple subtasks. Depth of "embedding" of subtasks to each other is determined by the existence of some set of elementary subtasks which correspond to the sets of elementary algorithms and objective functions which further fragmentation into smaller algorithms is impossible or impractical.

Formal engineering and technical description as well as analysis of the objective functions for SMR were performed. Their hierarchy was defined and priorities in conditions of conflicting objectives were set. The thesis about the defining role of sensitive organs of the robot in formation of a set of habitat variables as well as a set of variables of the internal environment of the robot was formulated. The habitat and the internal environment of SMR in clinics must be described on the basis of object-oriented paradigm with assignment for all objects of environment only those of their unique individual properties (parameters, variables) which sensitive organs of the robot together with the built-in system of pattern recognition are capable to "see" and classify. The objective functions of SMR can to be then formally presented on the high level programming languages as conditions for the continuation/termination of execution of cyclic algorithmic procedures based on a comparison of these parameters in the form their current situational and set target values.

From the combination of solutions obtained, the scientific-proved and generalized block diagram of the considered SMR was developed. The first contours of approach to the methodology and to stages of formulation of specialized medical and technical requirements to this class of medical automated systems were formulated.

Уважаемые читатели!

В Издательстве «САЙНС-ПРЕСС» вышла в свет книга

из серии

«ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ»

ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСФУЗИОЛОГИИ

Под редакцией докт. техн. наук А. Г. Гудкова

Книга посвящена технологическим аспектам в трансфузиологии. Рассмотрены вопросы организации Службы крови как производственной составляющей трансфузиологии, вопросы конструкторско-технологического проектирования изделий медицинской техники. Показано, что для полноценного обеспечения и развития технологической составляющей в обеспечении пациентов гемокомпонентами необходимы систематизация, всестороннее внедрение новых принципов и инновационных подходов в процессе создания специализированного оборудования. Предложен комплексный подход к решению проблемы взаимосвязи показателей качества, стоимости изделий и эффективности процессов заготовки компонентов крови.

Для специалистов в области трансфузиологии, научных работников, инженеров, занимающихся проектированием и производством медицинской техники. Может быть полезна аспирантам и студентам старших курсов медико-технических специальностей вузов.

Заказать и приобрести книгу можно по адресу:

107031, г.Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6, тел./факс: (495) 625-78-72,
621-48-37, 625-92-41, <http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru