

УДК 007.52; 004.896

doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-46-58

Мобильный спелеологический параллельный робот с пространственной тактильной системой распознавания контактной поверхности

С.Н. Саяпин

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Mobile Speleological Parallel Robot with a Spatial Tactile System for Identification of the Contact Surface

S.N. Sayapin

IMASH RAN

Рассмотрена проблема проведения спелеологических исследований естественных и искусственных пещер, включая русла подземных рек, а также разнообразные горные выработки в опасных или недоступных для спелеолога условиях. При этом внешняя среда исследуемых объектов может оказаться непрозрачной для оптических, радиоволновых, ультразвуковых и других физических методов контроля внутренней поверхности, например вследствие частичного или полного затопления объекта водой с неоднородными взвесями. Предложено решение проблемы путем роботизации исследований с помощью мобильного спелеологического параллельного робота (МСПР) с пространственной тактильной системой распознавания контактной поверхности. МСПР выполнен в виде активной октаэдральной структуры, ребра которой представляют собой стержни с линейными приводами. Концы стержней шарнирно соединены с соответствующими вершинами активной октаэдральной структуры, что обеспечивает ее геометрическую неизменяемость при выключенных линейных приводах. Такой МСПР способен выполнять контактное (тактильное) картографирование исследуемой внутренней поверхности независимо от прозрачности внешней среды и ее геодезическую привязку к базовой системе координат с визуализацией в виде гистограмм. При этом МСПР может самоперемещаться по внутренним поверхностям независимо от их пространственной ориентации. Описаны МСПР и его функциональные возможности, одной из которых является способность через механический контакт осуществлять построение 3D-гистограмм окружающего пространства с привязкой к базовой (инерциальной) системе координат. Тактильная система распознавания контактной поверхности позволяет не только перемещаться МСПР, но и осуществлять тактильный мониторинг во внешней среде, непрозрачной для оптических, радиоволновых, ультразвуковых и других физических методов контроля. МСПР позволяет роботизировать спелеологические исследования в местах опасных, труднодоступных и недоступных для спелеолога, а также проводить спасательные работы и обеспечивать доставку необходимого груза.

Ключевые слова: мобильный спелеологический параллельный робот, пространственная система тактильного мониторинга, 3D-гистограммы окружающего пространства

The paper considers the problem of conducting speleological studies of natural and artificial caves, including channels of the underground rivers, as well as various mine workings in dangerous or inaccessible conditions for a speleologist. In this case, external environment of

the objects under study could turn out to be opaque for optical, radio, ultrasonic and other physical methods of monitoring the inner surface, for example, due to partial or complete flooding of the object with water with inhomogeneous suspensions. A solution to the problem is proposed by robotizing the research using a mobile speleological parallel robot (MSPR) with a spatial tactile system for identification of the contact surface. MSPR is created in the form of an active octahedral structure, which edges are rods with linear drives. The rod ends are pivotally connected to the corresponding vertices of the active octahedral structure ensuring its geometric invariability when the linear drives are turned off. As a result, MSPR is able to carry out contact (tactile) mapping of the inner surface under study regardless of the external environment transparency and its geodetic binding to the base coordinate system with visualization in the form of histograms. At the same time, MSPR is able to self-move along the internal surfaces regardless of their spatial orientation. MSPR and its functionalities are described, one of which is the ability to build the 3D histograms of the surrounding space bind to the base (inertial) coordinate system through the mechanical contact. The tactile system of identifying the contact surface makes it possible not only to move the MSPR, but also to tactily monitor in the external environment that is opaque for optical, radio, ultrasonic and other physical control methods. MSPR allows robotizing speleological research in dangerous, hard-to-reach and inaccessible places for a speleologist, as well as to carry out rescue operations and ensure delivery of the required cargo.

Keywords: mobile speleological parallel robot, spatial system of tactile monitoring, 3D histograms of the surrounding space

Спелеология — комплексная наука, занимающаяся исследованием и современным использованием пещер. Спелеология находится на стыке физической географии, гидрогеологии и минералогии, а также изучает природные подземные пространства, включая их происхождение, эволюцию, возраст, морфологию, минералы, состав и миграцию подземных вод, вмещающие породы, подземные экосистемы и остатки древней материальной культуры. Спелеолог — это геолог, комплексно изучающий

как естественные, так и искусственные подземные пещеры и пространства.

Одним из важных разделов спелеологии является техническая спелеология, которая занимается разработкой видов оборудования и методов исследований, картографированием, а также проведением спасательных операций [1–3].

Примеры естественных [4–6], искусственных [7–9], подземных и подводных [10] пещер показаны на рис. 1. Видно, что работа спелеолога (особенно подводного) является сложной и

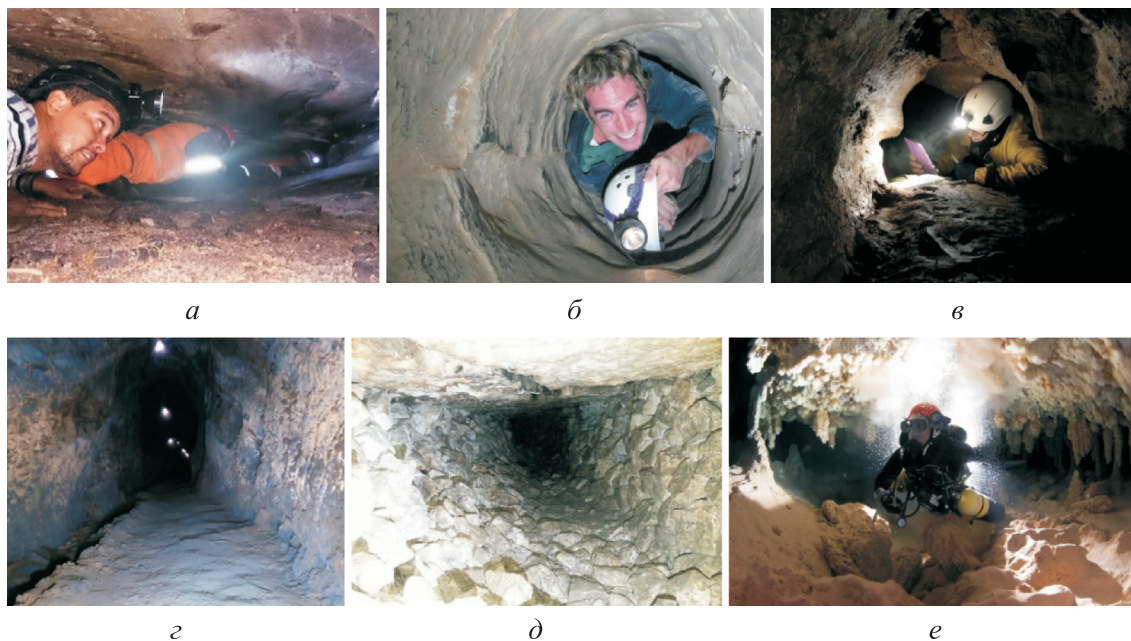


Рис. 1. Примеры естественных (а, б, в) и искусственных (з, д) подземных и подводных (е) пещер

опасной профессией, требующей самообладания, физической выносливости, высокого профессионализма и мужества.

Сравнительный анализ современных спелеологических роботов. В статье [7] дан обзор современных технологий и ключевых тенденций будущего развития робототехнических систем, предназначенных для работы в суровых условиях внешней среды (мониторинг априори неизвестных опасных объектов, поиск и спасение людей, отбор проб и картографирование труднодоступных мест и т. д.). Одним из таких направлений является роботизация спелеологических исследований. С этой целью в ряде стран ведутся работы по разработке и исследованию мобильных спелеологических роботов, способных перемещаться в труднодоступных местах.

В настоящее время для спелеологических исследований наиболее широко используют мобильных спелеологических роботов с колесными, гусеничными или комбинированными движителями (рис. 2). Такие роботы могут быть как автономными, так и с дистанционным управлением с помощью кабеля [4, 7, 8].

Спелеологический робот EspeleoRobo. Исследователи из Федерального университета Ми-

нас-Жерайса (Бразилия) и Технологического института Вале (Бразилия) разработали спелеологического робота EspeleoRobo [8]. Он способен выполнять такие функции, как фотореалистичное картографирование, локализация и картографирование с использованием лидара, планирование маршрутов на основе оптимизации мобильности и управления навигацией.

Спелеологический робот EspeleoRobo (рис. 3) первоначально разработан для исследования природных пещер во время миссий с дистанционным управлением. В настоящее время его применяют для мониторинга закрытых помещений другого типа, таких как галереи плотин и другие ограниченные или опасные зоны. Бразильская горнодобывающая компания Vale S.A. использовала его для доступа в ограниченные и опасные зоны для рабочих.

Предложенная концепция проверена в ходе моделирования с помощью реалистичной системы подземных туннелей и в репрезентативных сценариях реального мира. Результаты модельных и полевых экспериментов подтвердили возможность применения этой концепции для различных областей использования спелеологического робота.

Спелеологический робот показал способность работать под водой на глубине до одного метра в течение получаса. В зависимости от

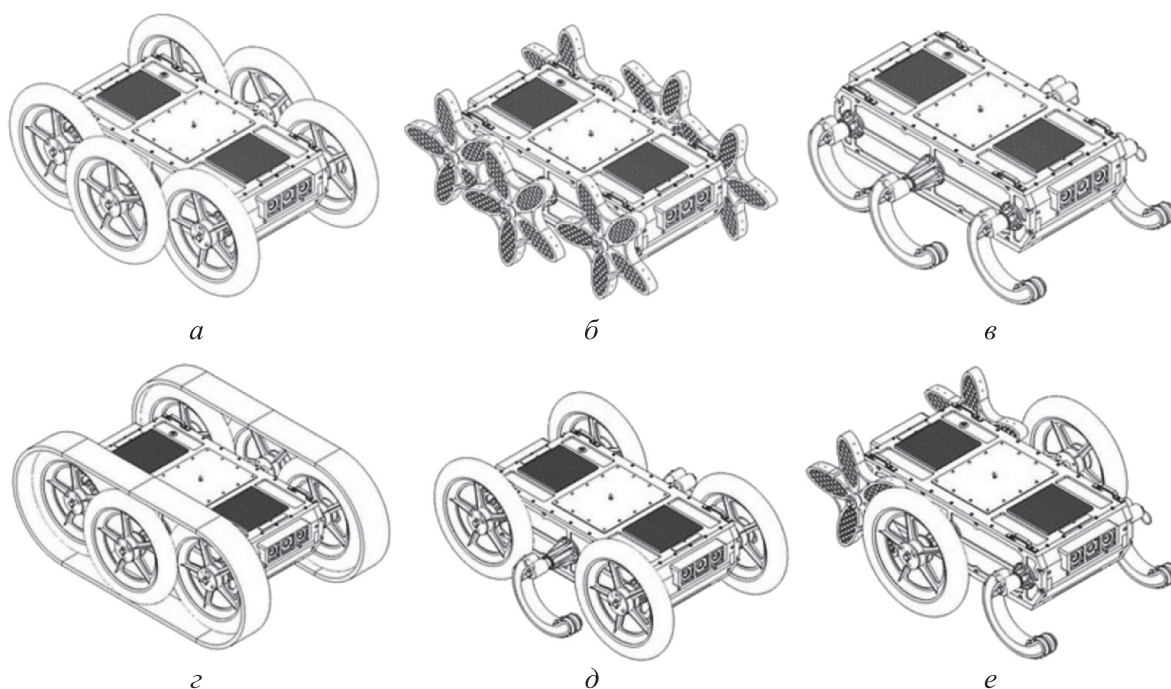


Рис. 2. Схемы систем передвижения спелеологических роботов с круглыми (а) и звездообразными (б) колесами, серповидным (в), гусеничным (г) и гибридными движителями (д, е)

области применения он может быть выполнен на основе любой из систем передвижения, показанных на рис. 2. Примеры спелеологиче-

ских роботов EspeleoRobo, оснащенных такими системами передвижения, приведены на рис. 4 [11].

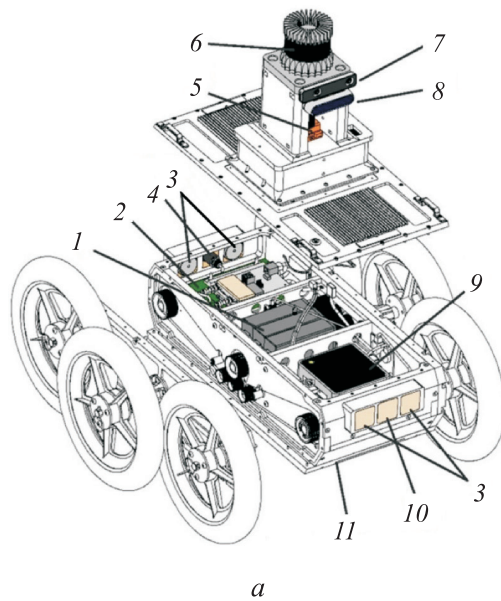


Рис. 3. Схема (а) робота EspeleoRobo и фрагмент осмотра подземного золотого рудника с его помощью (б):
 1 — двигатели (6 шт.); 2 — радиоканал; 3 — светодиодная подсветка; 4 и 10 — задняя и передняя видеокамеры;
 5 — инерционный модуль MTi-G-710; 6 — лидар Ouster OS1; 7 — интеллектуальная камера T265;
 8 — Web-камера D435i; 9 — Mini PC Intel NUC; 11 — аккумуляторы высокой емкости



а



б



в



г



д

Рис. 4. Примеры спелеологических роботов EspeleoRobo, оснащенных круглыми (а) и звездообразными (б) колесами, серповидным (в) и гибридными (г, д) движителями

К недостаткам EspeleoRobo можно отнести невозможность передвижения по вертикальным проходам и проходам с крутым подъемом/спуском, а также при наличии сильных потоков воды в них. Кроме того, оптические и акустические средства распознавания геометрических характеристик поверхности прохода не работают в мутной подводной среде со взвешенными твердыми частицами.

Робот-амфибия. В статье [12] рассмотрен робот-амфибия, выполненный на базе подвески показанной на рис. 2, в. Он способен не только перемещаться по неровной поверхности, но и маневрировать в воде и под водой. Здесь серповидные движители работают подобно лапам утки. Недостатки робота-амфибии аналогичны таковым для спелеологического робота EspeleoRobo.

Альпинистский робот Djedi. Робот Djedi создан для исследования шахт погребальной камеры в Великой пирамиде Египта [13]. Робот, оснащенный червячным движителем, способен переносить внутри шахты дрель с дальнобойной камерой или камерой-змеей.

В отличие от предыдущих спелеологических роботов, Djedi продемонстрировал способность подниматься по шахтам с крутым подъемом. Схема, внешний вид альпинистского робота Djedi и принцип работы при движении по желобу приведены на рис. 5. Недостатки альпинистского робота Djedi аналогичны таковым для предыдущих моделей.

Воздушный робот. В Университете Карнеги-Меллон (Питтсбург, Пенсильвания, США) группа исследователей разработала метод картирования пещер в полной темноте с использованием автономного воздушного робота, оснащенного камерами для картирования поверхностей пещер (рис. 6) [6]. Априори топография пещер может быть неизвестна, что увеличивает риски проведения спелеологических исследований.

Авторы разработки продемонстрировали возможность организации картирования пещеры с помощью автономного воздушного робота и передачи топографических данных о ее рельефе оператору в реальном времени, что позволит снизить уровень будущих рисков для спелеологов.

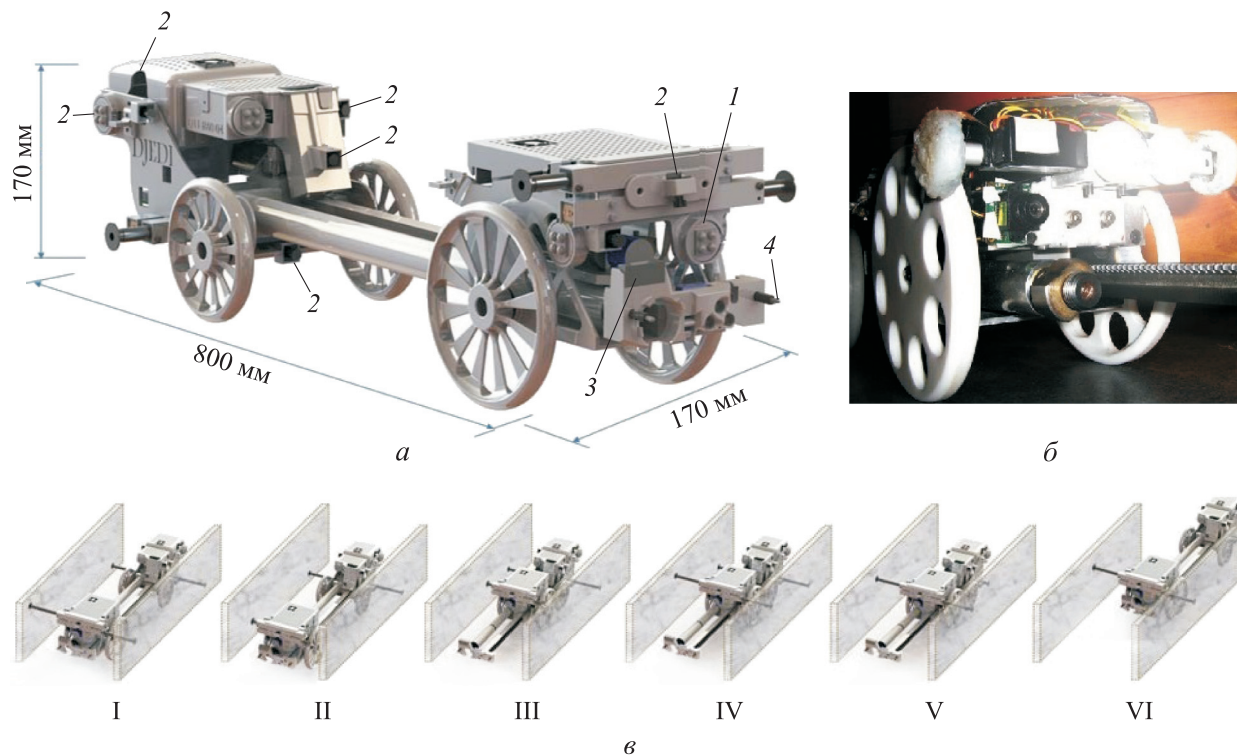


Рис. 5. Схема (а), внешний вид (б) и принцип работы при движении по желобу (в) альпинистского робота Djedi:

1 — подсветка; 2 — видеокамера; 3 — инфракрасный датчик; 4 — датчик контакта со стеной;
I–VI — циклы передвижения



Рис. 6. Автономная фотосъемка пещеры с помощью воздушного робота

В отличие от аналогов, аэроробот способен осуществлять вертикальные перемещения, но ему требуется дополнительное пространство для маневрирования. Его недостатки аналогичны таковым для предыдущих спелеологических роботов.

Для роботизации мониторинга и картографирования поверхности подземных и подводных пещер и проходов, включая их трассировку, применяют спелеологических роботов, использующих оптические, радиоволновые, ультразвуковые и другие физические методы контроля.

Однако в некоторых случаях, например, когда подземные проходы и шахты сильно запы-

лены, либо частично или полностью затоплены стоячей водой или водными потоками, содержащими большое количество взвесей твердых частиц, эти методы становятся непригодными для решения указанных задач.

Цель статьи — разработка концепции спелеологического робота, способного роботизировать процесс спелеологических исследований, включая проведение спасательных операций.

Для достижения поставленной цели в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН разработана концепция мобильного спелеологического параллельного робота (МСПР) с пространственной тактильной системой распознавания контактной поверхности. При этом

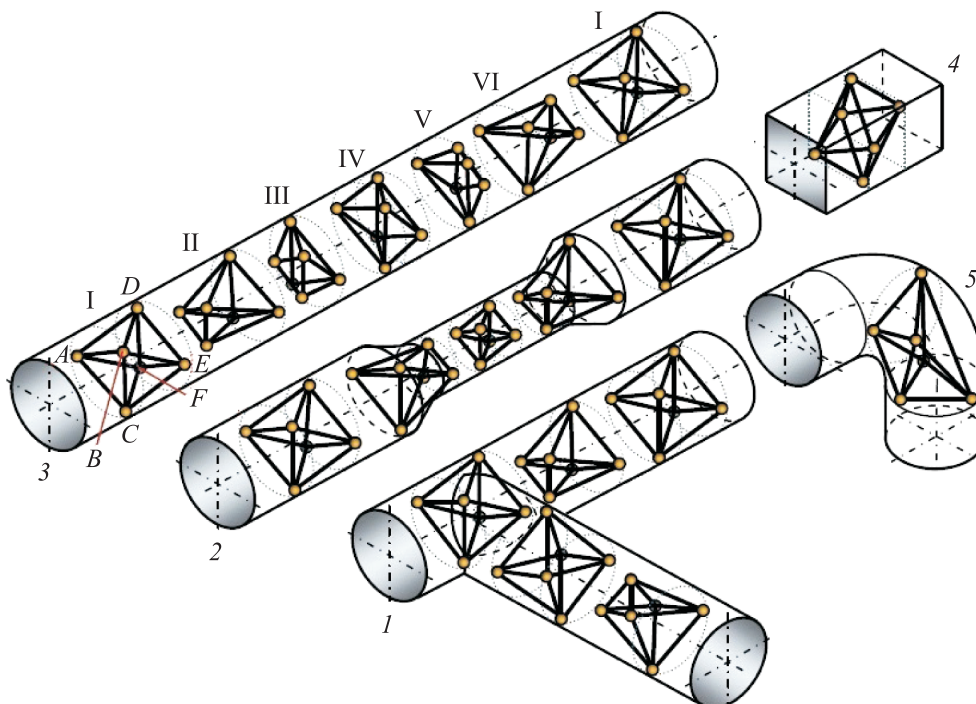


Рис. 7. Схемы движения робота «Додекапод» внутри труб разного типа: 1 — тройник; 2 — труба переменного сечения; 3 — круглая или овальная труба; 4 — квадратная труба; 5 — отвод; I — начальное положение; II-VI — первый-пятый шаги

МСПР способен перемещаться внутри проход и шахт независимо от их пространственной ориентации, позволяя в условиях неопределенности и непрозрачности внешней среды роботизировать не только процессы картографирования и трассировки, но и проводить спасательные операции.

Описание МСПР с пространственной тактильной системой распознавания контактной поверхности. Для проведения внутритрубных инспекционных и ремонтных работ в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН разработан мобильный пространственный параллельный робот «Додекаподом» с двенадцатью степенями свободы.

В работах [14–16] описана возможность самоперемещения этого робота внутри труб различных типов постоянного и переменного сечений независимо от их пространственной ориентации (рис. 7), а также тактильного контроля геометрической формы внутренней поверхности труб. Такая способность робота «Додекапод» позволила использовать его в качестве базовой основы для создания МСПР.

Кинематическая и структурная схемы МСПР для роботизации спелеологических исследований в сложной внешней среде приведены на рис. 8. Исполнительная часть МСПР выполнена в виде активной октаэдральной структуры (АОС) 1, которая в исходном положении представляет собой октаэдр $ABCDEF$. В вершинах 2 АОС шарнирно соединены концы смежных стержней-ребер октаэдра $ABCDEF$, каждый из которых снабжен линейным приводом (ЛП) 3,

осевым датчиком относительной скорости (ОДОС) 5, осевым датчиком силы (ОДС) 6 и осевым датчиком относительного перемещения (ОДОП) 7. В каждой из вершин установлен трехосный блок совмещенных гироскопов-акселерометров (на рис. 8 не показаны).

Управление ЛП осуществляет система управления (СУ) 14. Две из восьми противоположных граней октаэдра $ABCDEF$ поделены на фронтальную грань ABC (переднюю по ходу перемещения АОС) и тыльную DEF (заднюю по ходу перемещения АОС). Между фронтальной и тыльной гранями расположены боковые грани $ACD, ADE, ABE, FBC, FBE, FCD$. В отличие от робота «Додекапод», концы ЛП фронтальной и тыльной граней шарнирно соединены с упругими схватами 4.

СУ состоит из нейрокомпьютера 11, программно-алгоритмического обеспечения 13 и цифроаналогового преобразователя 12. Аналого-цифровые преобразователи 8–10 соответственно ОДС, ОДОП и ОДОС через соответствующие выходы подключены к входам нейрокомпьютера. Выходы нейрокомпьютера СУ через цифроаналоговый преобразователь и усилители мощности 15 соединены с соответствующими ЛП.

С помощью ЛП, образующих фронтальную и тыльную грани, упругие схваты способны захватывать предмет произвольной формы. При этом питание СУ и ЛП может быть выполнено автономным, например, в виде подвесного оборудования, или дистанционным.

Принцип самоперемещения и манипуляций МСПР заключается в следующем. После уста-

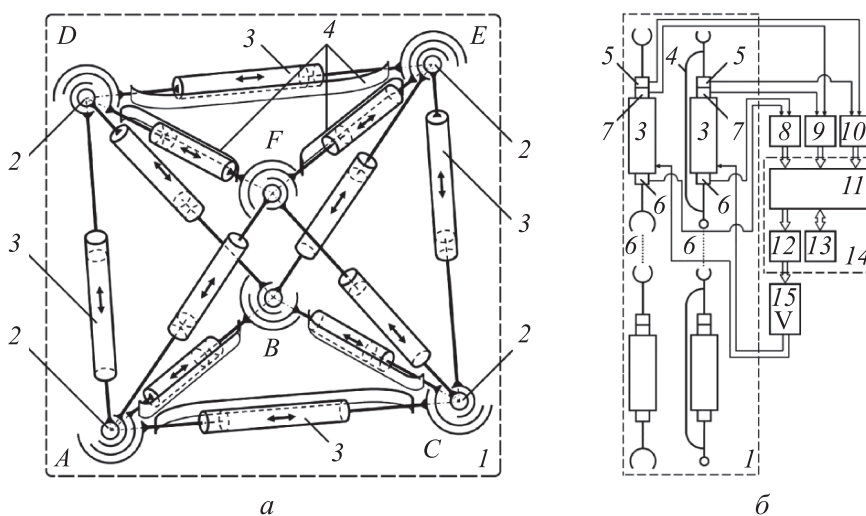


Рис. 8. Кинематическая (а) и структурная (б) схемы МСПР

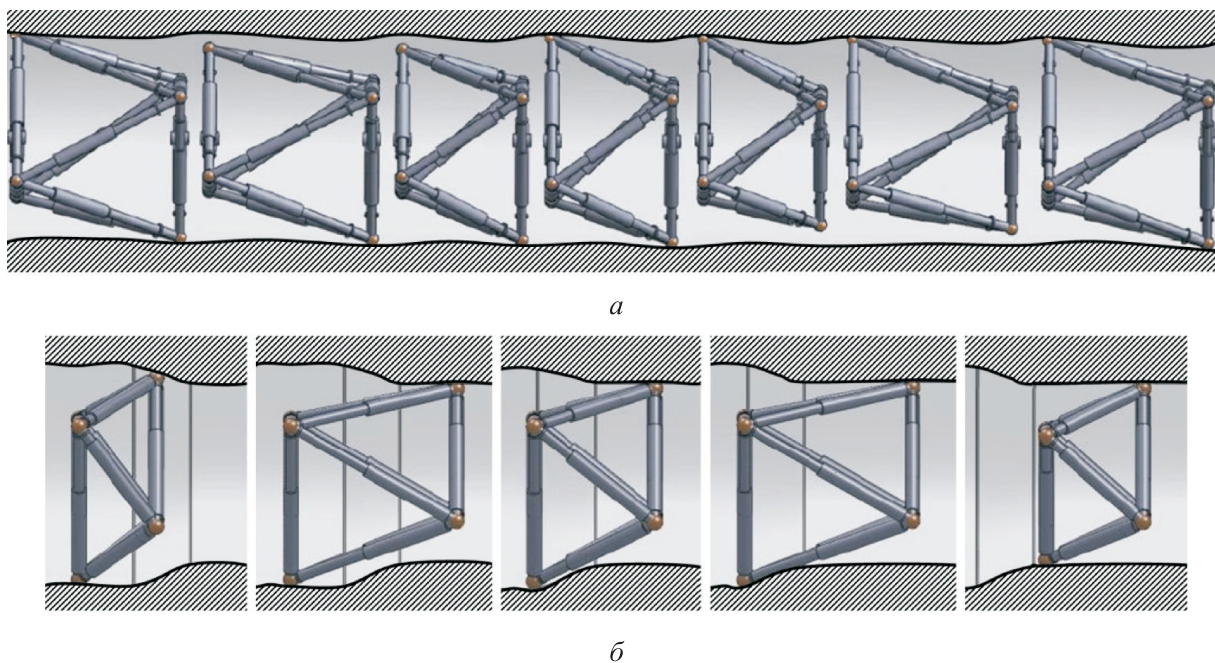


Рис. 9. Алгоритмы перемещения АОС внутри прямых (а) и сужающихся (б) участков прохода

новки АОС в проходе (рис. 9) с помощью ЛП и СУ осуществляют согласованное изменение длин его ребер (l_1, l_2, \dots, l_{12}). При этом вершины МСПР перемещаются в пространстве относительно базовой системы координат, а МСПР — внутри прохода. Робот способен перемещаться в проходе при его сужении (рис. 9, б) или расширении, а также при боковых и вертикальных поворотах прохода (рис. 9, а).

Контроль длин всех указанных ребер осуществляют по показаниям ОДОП, выполненных, например, в виде линейных позиционеров. О пространственных угловых перемещениях вершин судят по показаниям датчиков пространственного положения (ДПП), изготовленных в виде миниатюрных трехосных блоков гироскопов-акселерометров, показания которых позволяют повысить точность измерений. Благодаря геометрической неизменяемости АОС совокупность текущих значений l_1, l_2, \dots, l_{12} характеризует пространственное положение его вершин относительно базовой системы координат.

Принцип управления движением АОС аналогичен управлению l -координатным манипулятором на основе гексапода [17]. В отличие от гексапода, АОС содержит не шесть, а двенадцать уравнений движения в l -координатах, которые имеют аналогичный вид:

$$l_1 = f_1(t); \quad l_2 = f_2(t); \quad l_3 = f_3(t);$$

$$l_4 = f_4(t); \quad l_5 = f_5(t); \quad l_6 = f_6(t);$$

$$l_7 = f_7(t); \quad l_8 = f_8(t); \quad l_9 = f_9(t);$$

$$l_{10} = f_{10}(t); \quad l_{11} = f_{11}(t); \quad l_{12} = f_{12}(t),$$

где t — текущее время.

Управление ЛП осуществляется по управляющим командам от СУ, формируемым по показаниям ОДС, ОДОП и ОДОС, а также совмещенных датчиков пространственного положения и ускорений. Сигналы от датчиков поступают на входы соответствующих аналого-цифровых преобразователей и через шину данных в нейрокомпьютер СУ (см. рис. 8).

После обработки в реальном масштабе времени данных с использованием соответствующего программно-алгоритмического обеспечения формируют управляющие команды, которые через цифроаналоговый преобразователь и усилители мощности поступают на ЛП, и АОС изменяет геометрическую форму, т. е. трансформируется и перемещается (см. рис. 9).

Траектория перемещения АОС внутри прохода может быть прямолинейной, винтовой или комбинированной. При этом запоминаются пространственные координаты точек контакта вершин тыльной и фронтальной граней МСПР относительно базовой системы координат и время моментов их фиксации с контактируемой поверхностью, и по их значениям судят о траектории и скорости перемещения МСПР.

Пространственная тактильная система распознавания контактной поверхности на основе МСПР. При выключенных ЛП робот является пространственной геометрической неизменяемой структурой (см. рис. 8). Поэтому, зная длины стержней АОС при механическом контакте его вершин с внутренней поверхностью подземного/подводного прохода, можно осуществлять тактильный контроль его геометрической формы.

При этом в СУ запоминаются координаты всех измеренных точек контакта вершин АОС с внутренней поверхностью прохода, и после их обработки строится гистограмма внутренней поверхности прохода, привязанная к выбранной базовой системе координат.

В случае прямолинейного перемещения фронтальной и тыльной граней АОС внутри прохода (см. рис. 9) контроль точек контакта его вершин с внутренней поверхностью прохода осуществляется по шести образующим, представляющим собой траектории движения каждой из шести вершин АОС. При необходимости организации большего количества контролируемых точек дополнительно выполняют относительные повороты фронтальной ABC и тыльной DEF граней на величину заданного шага против хода часовой стрелки в положения $A1B1C1$ и $D1E1F1$ и по ходу часовой стрелки в

положения $A-1B-1C-1$ и $D-1E-1F-1$ соответственно с контролем геометрической формы внутренней поверхности прохода (рис. 10).

ДПП, расположенные в его вершинах, позволяют в процессе перемещения АОС судить об изменении их пространственного положения относительно базовой системы координат.

Благодаря этим функциональным возможностям АОС может осуществлять тактильный мониторинг геометрической формы внутренней поверхности подземного/подводного прохода в случаях, когда внешняя среда является непрозрачной для оптических, радиоволновых, ультразвуковых и других физических методов контроля.

С помощью АОС также можно выполнять контроль физико-механических свойств поверхностного слоя грунта прохода. Для этого радиальные упоры вершин (см. рис. 8) граней доводят до механического контакта с внутренней поверхностью с заданным усилием, которое определяют по показаниям ОДС. По показаниям ОДОП и ДПП находят их пространственное положение относительно базовой системы координат. Затем увеличивают усилие прижима вершин фронтальной и тыльной граней до заданного значения и определяют их пространственное положение относительно базовой системы координат.

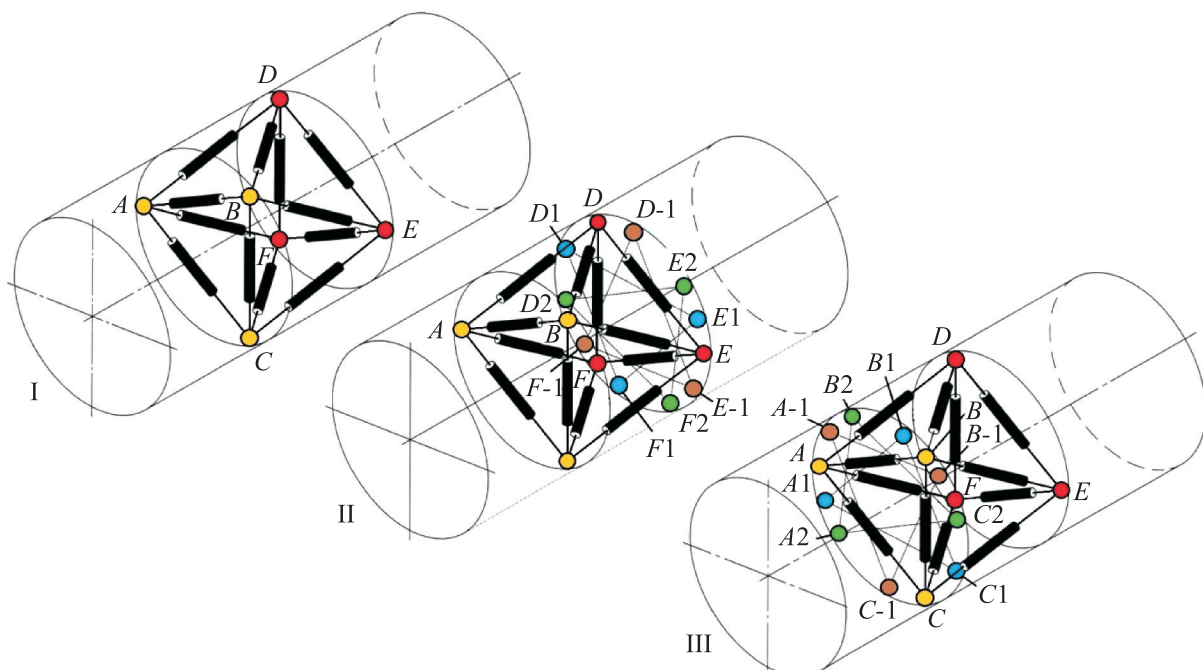


Рис. 10. Схема тактильного контроля геометрической формы внутренней поверхности цилиндрического участка прохода:

I — начальное положение; II и III — первый и второй шаги

Процедуру повторяют с первоначальным усилием и по различиям в значениях пространственных координат вершин судят об упруго-пластических свойствах поверхностного слоя грунта прохода.

Проведение спасательных работ с помощью МСПР. Работа спелеолога осуществляется в экстремальных условиях и является не только трудной, но и опасной для его здоровья и жизни. При этом нередко возникают случаи, когда спелеолог застревает в проходе и не имеет возможности самостоятельно вернуться назад. Тогда другие спелеологи и команды спасателей проводят операции по извлечению застрявшего спелеолога из узкого прохода.

К сожалению, из-за сложного рельефа прохода не всегда удается своевременно добраться до пострадавшего и спасти ему жизнь. Чтобы вытащить застрявшего в проходе спелеолога, спасатели, как правило, крепят один конец веревки в области голеностопа пострадавшего и вытягивают его за свободный конец веревки [18, 19].

Пример использования МСПР для роботизированного вытаскивания за ноги спелеолога, застрявшего в узком проходе, приведен рис. 11. Для проведения подобной спасательной операции МСПР перемещается к пострадавшему внутри прохода подобно тому, как показано на рис. 9. Перед ступнями ног МСПР останавливается и увеличивает длины ЛП тыльной грани DEF до момента надежной фиксации ее вершин с внутренней поверхностью прохода (см. рис. 8).

После достижения требуемого усилия прижатия вершин к внутренней поверхности прохода, контролируемого по показаниям ОДС, ЛП тыльной грани останавливаются, включаются ЛП боковых граней, и увеличивается их длина. В результате происходит перемещение фронтальной грани ABC относительно зафиксированной тыльной грани DEF . После совмещения плоскости фронтальной грани ABC с областью голеностопа пострадавшего ЛП боковых граней выключаются.

Затем включаются на реверс ЛП фронтальной грани, и их длина уменьшается до тех пор, пока не произойдет надежное обхватывание ног пострадавшего в области голеностопа упругими схватами (на рис. 11 условно не показаны). После достижения требуемого усилия схватывания ЛП выключаются по показаниям ОДС фронтальной грани ABC . Далее включаются на реверс ЛП боковых граней, и их длина уменьшается.

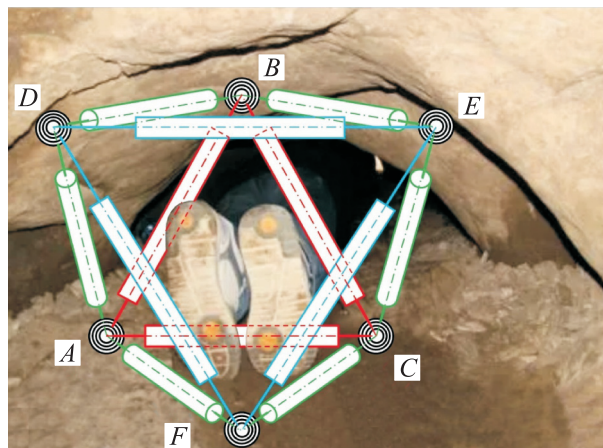


Рис. 11. Пример использования МСПР для роботизированного вытаскивания за ноги спелеолога, застрявшего в узком проходе

Возникает тяговое усилие, способствующее перемещению пострадавшего из узкой части прохода. Значение тягового усилия устанавливается из условия исключения повреждения тела пострадавшего и контролируется по показаниям ОДС ЛП боковых граней.

В случае неполного освобождения пострадавшего операцию по его перемещению повторяют. Дополнительно на конструкции МСПР могут быть установлены видеокамеры и устройства для громкоговорящей связи спасателей с пострадавшим.

Выводы

1. Предложена концепция МСПР, выполненная на основе пространственного параллельного робота «Додекапод» с двенадцатью степенями свободы, способного перемещаться внутри подземных/подводных проходов переменного профиля и при наличии боковых и вертикальных поворотов.

2. Показана возможность роботизированного тактильного спелеологического изучения подземных/подводных проходов естественного и искусственного происхождения в экстремальных условиях внешней среды, когда оптические, радиоволновые и ультразвуковые методы контроля их внутренней поверхности, а также методы, основанные на других физических принципах, непригодны для практического использования.

3. Установлена возможность проведения с помощью МСПР роботизированных спасательных операций по извлечению спелеологов, застрявших в узких участках прохода.

4. Применение МСПР в спелеологии позволит облегчить и сделать более безопасным труд спелеологов, включая проведение роботизированных спасательных операций в экстремальных условиях внешней среды.

5. Дальнейшие работы планируется вести в направлении повышения автономности МСПР, а также расширения его функциональных возможностей.

Литература

- [1] Дублянский В.Н., Илюхин В.В. *Путешествия под землей*. Москва, Физкультура и спорт. 1981. 192 с.
- [2] Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н. *Спелеология. Терминология, связи с другими науками, классификация полостей*. Свердловск, УрО РАН СССР. 1989. 33 с.
- [3] Дублянский В.Н. *Занимательная спелеология*. Челябинск, Урал LTD. 2000. 525 с.
- [4] Santos A.S., Azpurua H.I., Pessin G. et al. Path planning for mobile robots on rough terrain. *Proc. 2018 Latin American Robotic Symp., SBR and WRE*, 2018, pp. 265–270, doi: <https://doi.org/10.1109/LARS/SBR/WRE.2018.00056>
- [5] Почему пещера Nutty Putty в штате Юта запечатана одним спелеологом внутри. *sigma-z.ru: веб-сайт*. <https://sigma-z.ru/pochemu-peshhera-nutty-putty-v-shtate-yuta-zapechatana-odnim-speleologom-vnutri/> (дата обращения: 01.03.2022).
- [6] Tabib W., Goel K., Yao J. et al. Autonomous cave surveying with an aerial robot. *IEEE Trans. Robot.*, 2022, vol. 38, no. 2, pp. 1016–1032, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3104459>
- [7] Wong C., Yang E., Yan X.T. et al. An overview of robotics and autonomous systems for harsh environments. *Proc. 23rd ICAC*, 2017, doi: <https://doi.org/10.23919/ICAC.2017.8082020>
- [8] Azpurua H., Rezende A., Potje G. et al. Towards semi-autonomous robotic inspection and mapping in confined spaces with the EspeleoRobo. *J. Intell. Robot. Syst.*, 2021, vol. 101, no. 4, art. 69, doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01321-5>
- [9] Каменоломня «Володары» («Курья»). *places.moscow: веб-сайт*. https://places.moscow/places/kamenolomnya_volodary_kurya/kamenolomnya_volodary_kurya.html (дата обращения: 01.03.2022).
- [10] Two days in an underwater cave running out of oxygen. *japict.com: веб-сайт*. <https://japict.com/Nature/Two-Days-In-An-Underwater-Cave-Running-Out-Of-Oxygen-Bbc-News-2325292/> (дата обращения: 01.03.2022).
- [11] Azpurua H., Rocha F., Garcia G. et al. EspeleoRobo — a robotic device to inspect confined environments. *Proc. 19th ICAR*, 2019, pp. 17–23, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAR46387.2019.8981627>
- [12] Kashem S., Sufyan H. A novel design of an aquatic walking robot having webbed feet. *Int. J. Autom. Comput.*, 2017, vol. 14, no. 5, pp. 576–588, doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-017-1075-x>
- [13] Richardson R., Whitehead S., Ng T.C. et al. The “Djedi” robot exploration of the southern shaft of the Queen's chamber in the great Pyramid of Giza, Egypt. *J. Field Robot.*, 2013, vol. 30, no. 3, pp. 323–348, <https://doi.org/10.1002/rob.21451>
- [14] Саяпин С.Н., Синев А.В. *Адаптивный мобильный пространственный робот-манипулятор и способ организации движений и контроля физико-механических свойств и геометрической формы контактирующей поверхности и траектории перемещения с его помощью*. Патент РФ 2424893. Заявл. 11.01.2009, опубл. 20.07.2011.
- [15] Sayarin S.N. Parallel spatial robots of dodecapod type. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 457–466, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618812060143>
- [16] Sayarin S.N. Features of individual and collective operation of mobile sems modular type on basis of octahedral dodecapod in conditions of incomplete certainty. In: *Smart electromechanical systems*. Springer, 2020, pp. 35–55.
- [17] Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. *Пространственные механизмы параллельной структуры*. Москва, Наука. 1991. 95 с.
- [18] Lloyd O.C. Cave rescue: Edward Long Fox memorial lecture 1960. *The Medical Journal of the South-West*, 1961, vol. 76, no. 2, pp. 37–49.
- [19] Mirza A., Amundson C. *Manual of U.S. Cave rescue techniques*. National Speleological Society. 2015. 364 p.

References

- [1] Dublyanskiy V.N., Ilyukhin V.V. *Puteshestviya pod zemley* [Travelling underground]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 1981. 192 p. (In Russ.).
- [2] Dublyanskiy V.N., Andreychuk V.N. *Speleologiya. Terminologiya, svyazi s drugimi naukami, klassifikatsiya polostey* [Speleology. Terminology, connection with other sciences, classification of cavities]. Sverdlovsk, UrO RAN SSSR, 1989. 33 p. (In Russ.).
- [3] Dublyanskiy V.N. *Zanimatel'naya speleologiya* [Engaging speleology]. Chelyabinsk, Ural LTD, 2000. 525 p. (In Russ.).
- [4] Santos A.S., Azpurua H.I., Pessin G. et al. Path planning for mobile robots on rough terrain. *Proc. 2018 Latin American Robotic Symp., SBR and WRE*, 2018, pp. 265–270, doi: <https://doi.org/10.1109/LARS/SBR/WRE.2018.00056>
- [5] Pochemu peshchera Nutty Putty v shtate Yuta zapechatana odnim speleologom vnutri [Why Utah's Nutty Putty cave is sealed up with one spelunker inside]. *sigma-z.ru: website*. <https://sigma-z.ru/pochemu-peshchera-nutty-putty-v-shtate-yuta-zapechatana-odnim-speleologom-vnutri/> (accessed: 01.03.2022).
- [6] Tabib W., Goel K., Yao J. et al. Autonomous cave surveying with an aerial robot. *IEEE Trans. Robot.*, 2022, vol. 38, no. 2, pp. 1016–1032, doi: <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3104459>
- [7] Wong C., Yang E., Yan X.T. et al. An overview of robotics and autonomous systems for harsh environments. *Proc. 23rd ICAC*, 2017, doi: <https://doi.org/10.23919/ICAC.2017.8082020>
- [8] Azpurua H., Rezende A., Potje G. et al. Towards semi-autonomous robotic inspection and mapping in confined spaces with the EspeleoRobo. *J. Intell. Robot. Syst.*, 2021, vol. 101, no. 4, art. 69, doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01321-5>
- [9] Kamenolomnaya «Volodary» («Kur'ya») [«Volodary» («Kur'ya») quarry]. *places.moscow: website*. https://places.moscow/places/kamenolomnaya_volodary_kurya/kamenolomnaya_volodary_kurya.html (accessed: 01.03.2022). (In Russ.).
- [10] Two days in an underwater cave running out of oxygen. *japict.com: website*. <https://japict.com/Nature/Two-Days-In-An-Underwater-Cave-Running-Out-Of-Oxygen-Bbc-News-2325292/> (accessed: 01.03.2022).
- [11] Azpurua H., Rocha F., Garcia G. et al. EspeleoRobo — a robotic device to inspect confined environments. *Proc. 19th ICAR*, 2019, pp. 17–23, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAR46387.2019.8981627>
- [12] Kashem S., Sufyan H. A novel design of an aquatic walking robot having webbed feet. *Int. J. Autom. Comput.*, 2017, vol. 14, no. 5, pp. 576–588, doi: <https://doi.org/10.1007/s11633-017-1075-x>
- [13] Richardson R., Whitehead S., Ng T.C. et al. The “Djedi” robot exploration of the southern shaft of the Queen's chamber in the great Pyramid of Giza, Egypt. *J. Field Robot.*, 2013, vol. 30, no. 3, pp. 323–348, <https://doi.org/10.1002/rob.21451>
- [14] Sayapin S.N., Sinev A.V. *Adaptivnyy mobil'nyy prostranstvennyy robot-manipulyator i sposob organizatsii dvizheniy i kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv i geometricheskoy formy kontaktiruyushchey poverkhnosti i traektorii peremeshcheniya s ego pomoshch'yu* [Adaptive mobile 3d manipulator robot and method of organising displacements and control over physical-mechanical properties, geometrical shape of contact surface and displacement trajectory hereby]. Patent RU 2424893. Appl. 11.01.2009, publ. 20.07.2011. (In Russ.).
- [15] Sayapin S.N. Parallel spatial robots of dodecapod type. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 457–466, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618812060143>
- [16] Sayapin S.N. Features of individual and collective operation of mobile sems modular type on basis of octahedral dodekapod in conditions of incomplete certainty. In: *Smart electro-mechanical systems*. Springer, 2020, pp. 35–55.
- [17] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. *Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury* [Spatial parallel mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 95 p. (In Russ.).
- [18] Lloyd O.C. Cave rescue: Edward Long Fox memorial lecture 1960. *The Medical Journal of the South-West*, 1961, vol. 76, no. 2, pp. 37–49.
- [19] Mirza A., Amundson C. *Manual of U.S. Cave rescue techniques*. National Speleological Society, 2015. 364 p.

Информация об авторе

САЯПИН Сергей Николаевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник. ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН» (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Information about the author

SAYAPIN Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Chief Research Worker. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute FSBIS of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonyevskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: S.Sayapin@rambler.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Саяпин С.Н. Мобильный спелеологический параллельный робот с пространственной тактильной системой распознавания контактной поверхности. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 12, с. 46–58, doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-46-58

Please cite this article in English as:

Sayapin S.N. Mobile Speleological Parallel Robot with a Spatial Tactile System for Identification of the Contact Surface. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 12, pp. 46–58, doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-46-58



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Инновационное развитие территорий. Модуль 1. Формирование инновационных территориальных образований»

Авторы: С.Н. Ефимушкин, И.Н. Омельченко

Учебное пособие содержит материалы для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Инновационное развитие территорий» с целью ознакомления обучающихся с теоретическим материалом курса лекций по формированию инновационных территориальных образований. Содержание учебного пособия соответствует требованиям СУОС ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов бакалавриата кафедры «Промышленная логистика» факультета «Инженерный бизнес и менеджмент» МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по направлению подготовки «Инноватика» (направленность «Управление инновациями в наукоемких производствах»).

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>