

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-85-94

¹Посыпкин М.А., ²Халапян С.Ю., ³Маслова И.В., ³Мамаев В.А., ^{3,*}Вирабян Л.Г.¹Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН²Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова НИТУ МИСиС³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Аннотация. Одна из самых актуальных и сложных проблем медицины и неврологии – реабилитация больных. Роботизированные системы в настоящее время занимают важное место в комплексной реабилитации неврологических больных с тяжелыми двигательными нарушениями различной этиологии, а также наиболее социально значимых и распространенных неврологических заболеваний. В статье рассмотрены различные архитектуры роботизированных систем для реабилитации нижних конечностей. Также в статье проанализированы работы зарубежных ученых, которые занимаются этими вопросами. В результате чего составлена и рассмотрена классификация реабилитационных систем. Предложена структура системы реабилитации, основанная на пассивном ортезе и активном параллельном 3-PRRR роботе. Разработан численный алгоритм для определения рабочего пространства 3-PRRR робота с учетом конструктивных ограничений. Алгоритм основан на базе концепции неравномерных покрытий с использованием методов интервального анализа и реализован на языке программирования C++. Представлены результаты вычислительных экспериментов. Визуализация результатов моделирования осуществлена путем преобразования множества трехмерных параллелепипедов в файл STL. Однако остается много областей, открытых для теоретических исследований. Дальнейшим направлением исследований является оптимизация геометрических параметров системы для проведения реабилитационных процедур.

Ключевые слова: параллельный робот, роботизированная система, реабилитация, рабочая область.

Введение. Одна из самых актуальных и сложных проблем медицины и неврологии – реабилитация больных. Количество людей, которые нуждаются в реабилитации растет с каждым днем. Одной из основных причин является инсульт, который происходит из-за поражения головного мозга, травмы спинного мозга (SCI), повреждения позвоночника, инвалидности, вызванной развитием острого вялого паралича и т. д. Кроме того, инсульт является одним из причин смерти вследствие болезни коронарной артерии, и является самой распространенной причиной появления хронической инвалидности у взрослых. Риск инсульта после 55 лет составляет 1 из 5 для женщин и 1 из 6 для мужчин [1]. Более 80 % инсультов происходят в развивающихся странах. Каждый год в мире эта патология поражает около 16 млн человек, из них 5,7 млн умирают, и столько же становятся инвалидами. В Российской Федерации (40–50 %) 1-е место в структуре патологии занимает инсульт, являющийся причиной инвалидности. К сожалению, только 20 % лиц, перенесших инсульт,

возвращаются к труду. При этом потери государства от одного больного, получившего инвалидность, составляют порядка 1247000 рублей в год. Это обуславливает важность проблемы профилактики данного заболевания и реабилитации больных, перенесших инсульт. В результате различных факторов, приводящих к нарушению функционирования конечностей, должен быть обеспечен реабилитационный процесс с целью восстановления нормального функционирования деятельности конечностей. Реабилитационные терапевтические методы лечения имеют свою специфику в лечении верхних и нижних конечностей. Лечение верхних конечностей фокусируется на восстановлении ручного нерва, мышечного действия и развиваемой силы, в то время как лечение нижних конечностей фокусируется на различных движениях суставов ног и их синхронных движениях. Следует учитывать ряд социальных аспектов при реабилитации: особенности личности пациента, его окружающей среды, психологические проблемы в семье из-за болезни, оснащение средствами для самостоятельного ориентирования

пациента, финансовые затраты, взаимодействие в системе человек-машина [2].

Для решения этой проблемы роботизированные технологии в области реабилитации значительно продвинулись. За последние годы роботизированные системы для реабилитации были постепенно исследованы и разработаны. Основной задачей которых является помощь физиотерапевтам в ходе терапии, повысить качество и эффективность процесса. Эффективность использования роботов в реабилитации была показана с клиническими результатами [3-

5]. В целом существует две основные классификации программ реабилитации: терапевтические методы и терапевтические упражнения. В то время как цель терапевтических методов заключается в устранении последствий боли, спазма и отеков, конечная цель терапевтических упражнений состоит в том, чтобы вернуть пострадавшего пациента в состояние здоровья и способности к движению.

Реабилитационные роботы можно разделить на три группы (рис. 1).

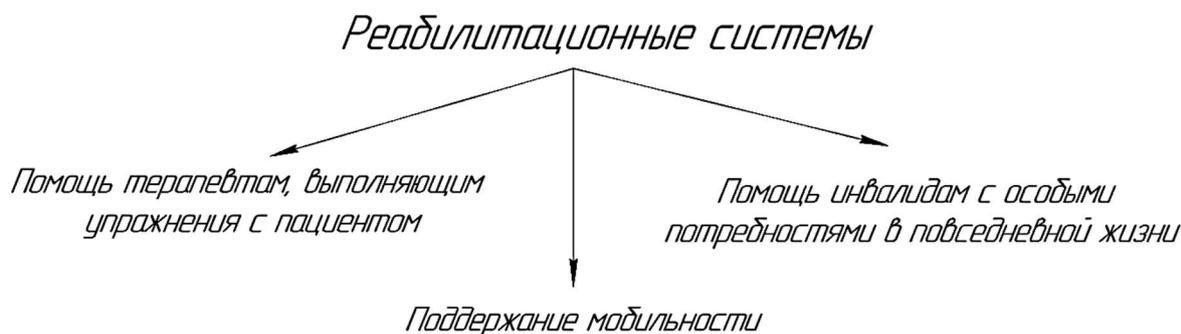


Рис. 1. Классификация реабилитационных систем

За последние десятилетия было разработано большое количество механизмов, которые направлены на реабилитационное лечение, восстановление способности ходить у пациентов, перенесших инсульт. К таким механизмам относятся серийно выпускаемые устройства для реабилитации Motion maker (Швейцария), и находящиеся на стадии разработки механизмы Lambda, профессиональный тренажер Supine, NEUROBike, AIST-Tsukuba [10], HapticWalker.

Стационарная программируемая тестовая и тренировочная система для нижних конечностей была представлена швейцарскими учеными К. Шмитт, П. Метрейлер и др. и производится компанией Swortec S.A., Швейцария [6]. Это устройство называется «MotionMaker™» (рис. 2). Оно состоит из двух ортезов с 3-мя степенями свободы, состоящих из двигателей и датчиков, блока управления, управляющего электростимуляцией, и двигателей с регулированием в реальном времени, многоканального электростимулятора и рабочего стола. Ортез представляет собой экзоскелет, расположенный на внешней стороне ноги. В него входят три сустава: бедро, колено и лодыжка. Кривошипно-шатунные системы, приводимые в действие винтовым домкратом, управляемым двигателем постоянного тока, приводят в движение каждое совместное движение. Это позволяет людям SCI поддерживать или совершать движения ног с желаемыми характеристиками положения, скорости и крутящего момента. Целью является эф-

фективное укрепление мышц, развитие выносливости, а также подвижность суставов и координация движений.

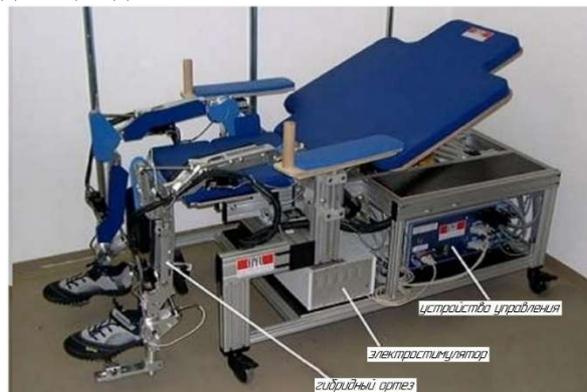


Рис. 2. MotionMaker™ прототип

Предложена [7] новая концепция ортеза на основе Lambda. Эта структура представляет собой параллельную кинематику, которая основана на двух поступательных сочленениях и одном вращательном для мобилизации голеностопного сустава. Кинематика Lambda полностью обеспечивает движение нижних конечностей. Это означает, что бедро, колено и лодыжка могут быть удобно мобилизованы для проведения реабилитации, фитнеса или спортивных тренировок. Эта новая концепция основана на параллельной кинематической конструкции, которая имеет два основных преимущества: простота конструкции и жесткость (рис. 3).

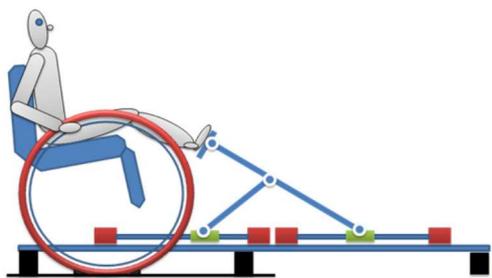


Рис. 3. Структура робота Lambda



Рис. 4. Механическая структура тренажера Supine:

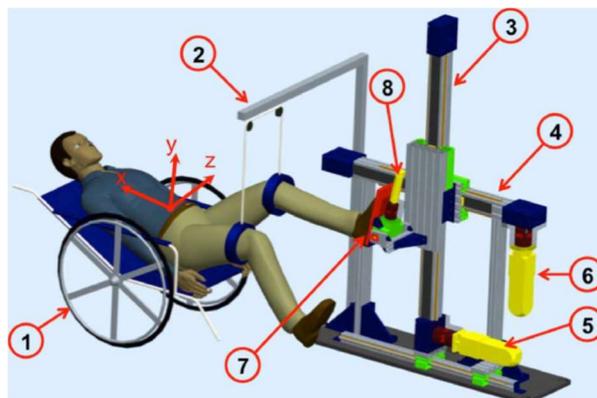
- 1 – звено бедра; 2 – тазобедренный привод;
- 3 – коленный привод; 4 – звено голени; 5 – ТВТ привод;
- 6 – МТР привод; 7 – платформа для ступни

Тренировочное устройство *Supine Gait* [8] (рис. 4) – это устройство, позволяющее пациентам с ранним состоянием начать раннее и безопасное восстановление, для более быстрого выздоровления и улучшения функциональных результатов. Устройство состоит из нескольких компонентов; механическая система, которая обеспечивает основную структуру, исполнительные механизмы, которые перемещают структуру, датчики, которые обеспечивают обратную связь, поверхностные датчики EMG, которые обеспечивают биологическую обратную связь, и контроллер операционной системы реального времени (RTOS), который координирует все компоненты.

На рис. 5 представлена роботизированная платформа *NEUROBike* [9], разработанная для обеспечения нейрореабилитации и восстановления способности ходить у лежачих пациентов после инсульта. *NEUROBike* может позволить им начать выполнять упражнения на ранней стадии в зависимости от тяжести патологии. С другой стороны, *NEUROBike* предлагает интенсивные методы лечения, которые могут выявить функциональные двигательные схемы, сравнимые с теми, которые задействованы во время повседневной деятельности (например, ходьба, сидение).

Универсальный роботизированный тренажер для ходьбы *HapticWalker* [11], основанный на принципе программируемых опорных плит, который позволяет тренировать произвольные

ситуации ходьбы и траектории движения ног (например, даже по земле, подъему / спуску по лестнице, возмущениям, таким как спотыкание / спотыкание, скольжения). *HapticWalker* (рис. 6) разработан для того, чтобы терапевты имели доступ к пациенту для физического контакта во время тренировки со всех сторон, а также для удобства перемещения пациента в машину, поскольку они обычно привязаны к инвалидному креслу. Полностью рабочий прототип был успешно разработан и построен, и в настоящее время он проходит клинические испытания.

Рис. 5. 3-D модель *NEUROBike*:

- 1 – сиденье; 2 – рама для шкивов, 3 и 4 – линейные направляющие, обеспечивающие соответственно вертикальные и горизонтальные движения стопы, имеющие соответствующие им вентильными двигателями (5 и 6), 7 – выходное звено, имеющее двигатель для вращательного движения ступни (8)

Рис. 6. Робот-симулятор ходьбы для реабилитации походки *Haptic Walker*

В статье предложена новая архитектура роботизированной системы для реабилитации нижних конечностей (рис. 7). Устройство состоит из двух механизмов, в том числе пассивного ортеза и активного параллельного робота [12, 13].

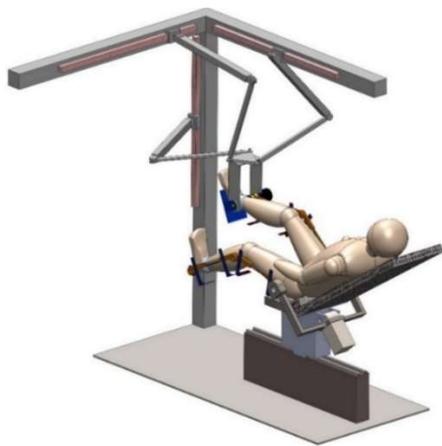


Рис. 7. Концептуальный проект системы реабилитации нижних конечностей

На рис. 8 представлен параллельный робот, предложенный Конгом и Гуссленом [14] известный как «Изогляйд». Он имеет три степени свободы – поступательные движение вдоль каждой из осей. Механизм состоит из трёх кинематических цепей $A_i B_i C_i D_i$. Положение реабилитационной платформы, представляющей собой равносторонний треугольник $D_1 D_2 D_3$ с центром в точке P и радиусом описанной окружности R определяется линейными перемещениями $\mathbf{q} = (q_1 q_2 q_3)$. Введём следующие обозначения: a_i – расстояние между точками A_i и B_i , b_i – между B_i и C_i , c_i – между C_i и D_i , d_i – между B_i и D_i .

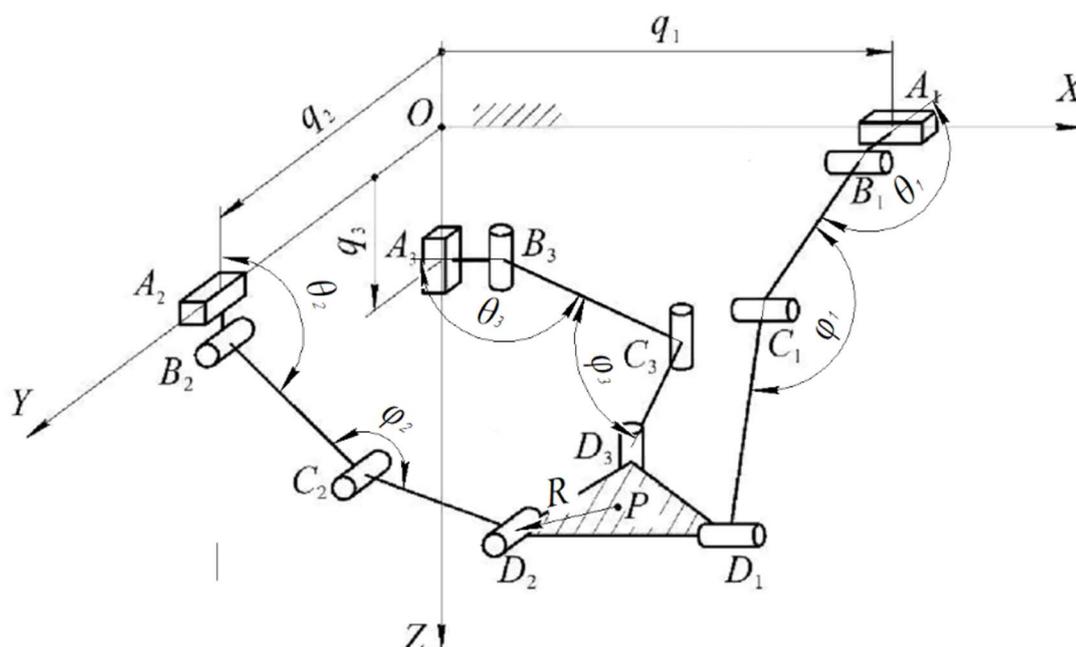


Рис. 8. Расчётная схема реабилитационного механизма

В процессе реабилитации нужно обеспечить следующие углы в тазобедренном, коленном и голеностопном суставе при имитации ходьбы: 1 фаза шага – сгибание в тазобедренном суставе от 0° до 20° , сгибание в коленном суставе от 0° до 60° , разгибание в голеностопном суставе от 0° до 10° ; 2 фаза – 0° , 0° и 90° соответственно; 3 фаза – разгибание в тазобедренном суставе от 0° до 10° , в коленном суставе 0° , сгибание в голеностопном суставе от 0° до 20° . Определим рабочую зону параллельного механизма типа «Изогляйд» для обеспечения движения пассивного ортеза в пределах рабочей зоны в соответствии с клиническими данными при имитации ходьбы

Для определения рабочей области будем использовать концепцию неравномерных покрытий с использованием методов интервального анализа. При анализе рабочей зоны необходимо учитывать конструктивные ограничения. Для

рассматриваемого механизма можно выделить следующие:

- ограничения на приводные координаты \mathbf{q} : $q_i \in [q_{min}; q_{max}]$;
- ограничения на углы поворота в шарнирах B_i и C_i : $\varphi_i \in [\varphi_{min}; \varphi_{max}]$, $\theta_i \in [\theta_{min}; \theta_{max}]$.

Определим приводные координаты и углы поворота в шарнирах B_i и C_i для определённых координат точки центра P платформы $D_1 D_2 D_3$.

Запишем интервалы, которые описывают диапазоны изменения координат точки P :

$$X_P := [\underline{X}_P, \overline{X}_P] = \{ \underline{X}_P \leq x_P \leq \overline{X}_P \}$$

$$Y_P := [\underline{Y}_P, \overline{Y}_P] = \{ \underline{Y}_P \leq y_P \leq \overline{Y}_P \}$$

$$Z_P := [\underline{Z}_P, \overline{Z}_P] = \{ \underline{Z}_P \leq z_P \leq \overline{Z}_P \}$$

Определим значения координат точек D_i и приводных координат q_i :

$$D_1 = \begin{bmatrix} x_P + \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ y_P + \frac{R}{2} \\ z_P \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} x_P - \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ y_P + \frac{R}{2} \\ z_P \end{bmatrix}, D_3 = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P - R \\ z_P \end{bmatrix}$$

Запишем интервалы, которые описывают диапазоны изменения приводных координат:

$$Q_i := [Q_i, \overline{Q}_i] = \{Q_i \leq q_i \leq \overline{Q}_i\}$$

Приводные координаты q_i определяются как

$$q_1 = x_{D1} = x_P + \frac{\sqrt{3}}{2}R, \quad (1)$$

$$q_2 = y_{D2} = y_P + \frac{R}{2}, \quad (2)$$

$$q_3 = z_{D3} = z_P. \quad (3)$$

Запишем интервалы, которые описывают диапазоны изменения углов φ_i :

$$\Phi_i := [\Phi_i, \overline{\Phi}_i] = \{\Phi_i \leq \varphi_i \leq \overline{\Phi}_i\}$$

Углы φ_i согласно теореме косинусов вычислим как

$$\varphi_i = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + c^2 - d_i^2}{2bc} \right), \varphi_i \in [0; \pi]. \quad (4)$$

Где d_i определяются как

$$d_1 = \sqrt{\left(y_P + \frac{R}{2} - a\right)^2 + (z_P)^2},$$

$$d_2 = \sqrt{\left(x_P - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 + (z_P - a)^2},$$

$$d_3 = \sqrt{(x_P - a)^2 + (y_P - R)^2}$$

Запишем интервалы, которые описывают диапазоны изменения углов θ_i :

$$\Theta_i := [\Theta_i, \overline{\Theta}_i] = \{\Theta_i \leq \theta_i \leq \overline{\Theta}_i\}$$

Учитывая, что точки C_i являются точками пересечения окружностей с радиусами b и c и центрами в точках B и D соответственно, косинусы углов определим как

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{z_P \sqrt{b^2 - s_1^2} - s_1 (y_{D1} - a)}{d_1 b} \right), \theta_1 \in [0; 2\pi] \quad (5)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{-x_{D2} \sqrt{b^2 - s_2^2} - s_2 (z_P - a)}{d_2 b} \right), \theta_2 \in [0; 2\pi] \quad (6)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{-y_{D3} \sqrt{b^2 - s_3^2} - s_3 (x_{D3} - a)}{d_3 b} \right), \theta_3 \in [0; 2\pi] \quad (7)$$

где $s_i = \frac{b^2 - c^2 + d_i^2}{2d_i}$.

Уравнения (1–7) позволяют определить значения геометрических параметров, определяющих ограничения рабочей области.

Для решения задачи аппроксимации нелинейных неравенств с учётом формул (1–7) синтезирован алгоритм, который показан представлен на рис. 9. Он работает с двумя списками трёхмерных параллелепипедов \mathbb{P} и \mathbb{P}_I . Каждое из измерений параллелепипедов соответствует координатам x_P, y_P, z_P центра подвижной платформы P .

Алгоритм работает следующим образом:

1. Задать геометрические параметры робота и точность аппроксимации δ .

2. На первом шаге алгоритма список внутренней аппроксимации \mathbb{P}_I пуст, список \mathbb{P} состоит только из одного параллелепипеда Q , включающего интервалы X_P, Y_P и Z_P : $X_{P3} = Y_{P3} = Z_P = [q_{min} - 2R, q_{max} + 2R]$.

3. Извлечь из списка \mathbb{P} параллелепипед B .

4. Если $d(B) < \delta$, то B добавить к списку \mathbb{P}_I и перейти к шагу 13.

5. Вычислить $Q_i, i \in 1, 3$ по формулам (1-3).

6. Если $Q_i > q_{max}$ или $\overline{Q}_i < q_{min}$, то перейти к шагу 13.

7. Вычислить $\Phi_i, i \in 1, 3$ по формуле (4).

8. Если $\Phi_i > \varphi_{max}$ или $\overline{\Phi}_i < \varphi_{min}$, то перейти к шагу 13.

9. Вычислить $\theta_i, i \in 1, 3$ по формуле (5-7).

10. Если $\theta_i > \theta_{max}$ или $\overline{\theta}_i < \theta_{min}$, то перейти к шагу 13.

11. Если $Q_i \geq q_{min}, \overline{Q}_i \leq q_{max}, \Phi_i \geq \varphi_{min}, \overline{\Phi}_i \leq \varphi_{max}, \theta_i \geq \theta_{min}$ и $\overline{\theta}_i \leq \theta_{max}$, то B внести в конец списка \mathbb{P}_I и перейти к шагу 13

12. Разделить B на два равных параллелепипеда вдоль ребра с наибольшей длиной. Данные параллелепипеды внести в конец списка \mathbb{P} .

13. Если $\mathbb{P} \neq \emptyset$, то перейти к шагу 3.

Алгоритм реализован на языке программирования C++ с использованием библиотеки интервального анализа Snowgoose [15, 16]. В условиях однократного вхождения переменных в выражение для уравнений (1–4) интервальные оценки совпадают с экстремумами функции на параллелепипеде. Для уравнений (5–7) имеет место многократное вхождение переменных, поэтому для них интервалы определялись с использованием равномерной сетки. Визуализация результатов моделирования осуществляется посредством преобразования списка параллелепипедов \mathbb{P}_I в универсальный формат 3D-моделей - stl-файл.

Был проведён вычислительный эксперимент для следующих геометрических параметров механизма: $a = 50$ мм, $b = c = 500$ мм, $q_{mi} = 0$ мм, $q_{ma} = 100$ мм, $\varphi_{min} = \theta_{min} = 10^\circ$ мм,

$\varphi_{max} = \theta_{max} = 170^\circ$. Результаты моделирования представлены на рис. 10. Время вычисления для точности аппроксимации $\delta=1$ мм на персональном компьютере составило 1 минуту 24 секунды

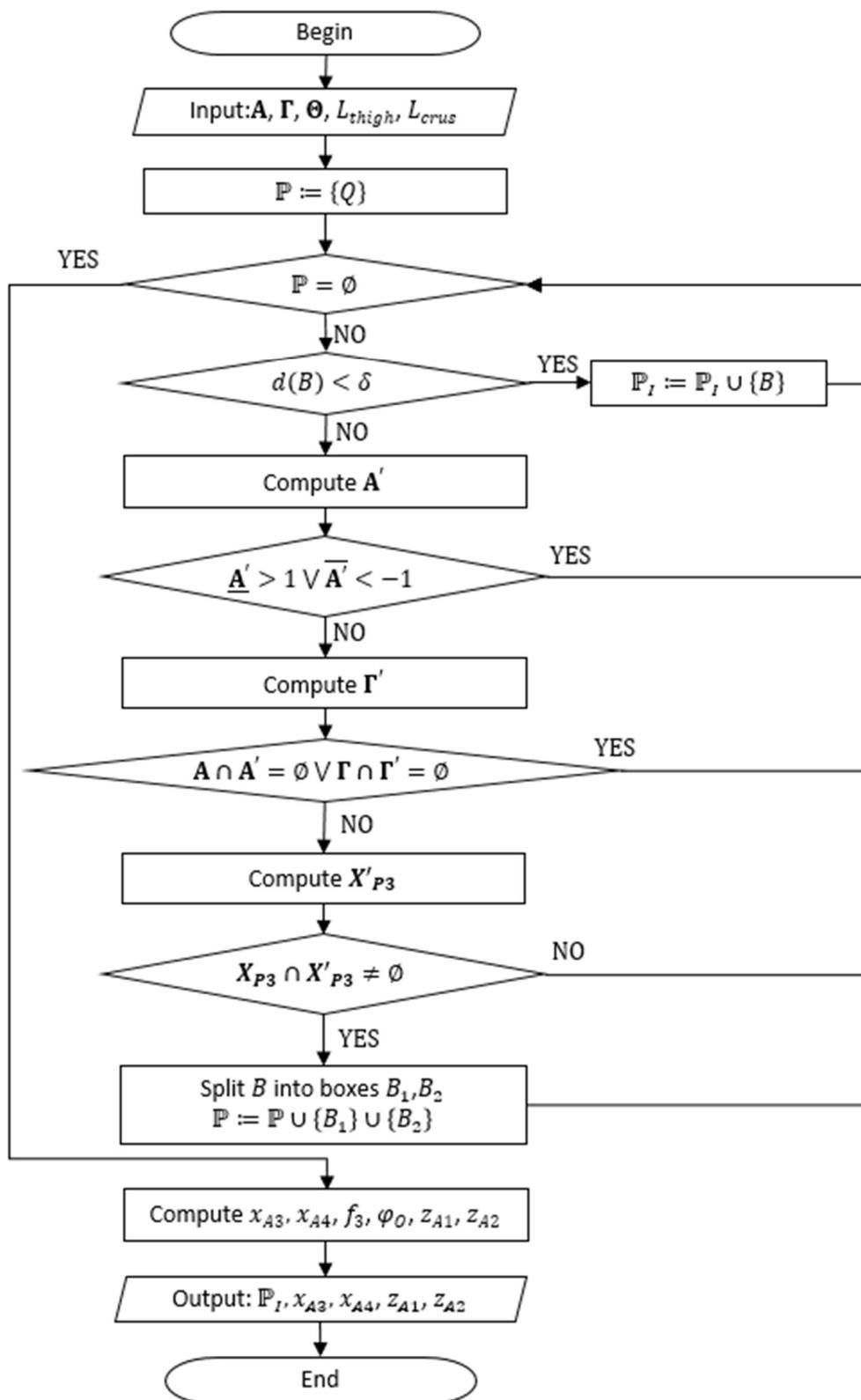


Рис. 9. Блок-схема алгоритма определения рабочей области и оптимизации геометрических параметров

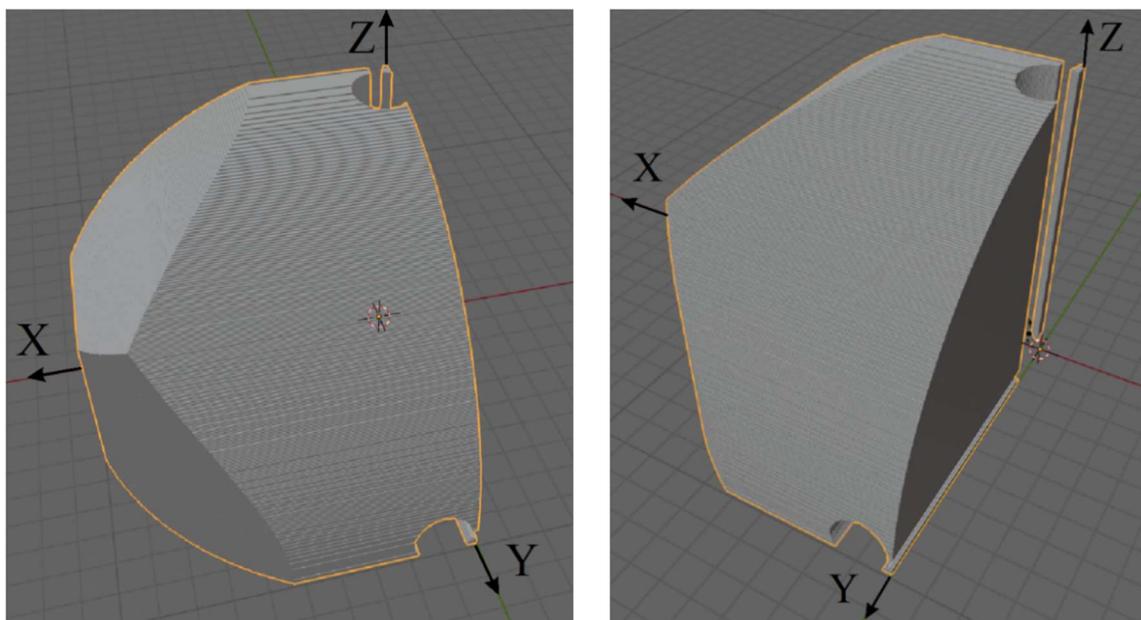


Рис. 10. Результаты моделирования

Выводы. Таким образом, роботизированные системы в настоящее время занимают важное место в комплексной реабилитации неврологических больных с тяжелыми двигательными нарушениями различной этиологии. Большинство авторов, применяющих роботизированную механизированную нейрореабилитацию, отмечают, что тренировки на этой системе ни в коем случае не заменяют традиционную лечебную гимнастику и должны применяться в комплексе с другими методами реабилитации. В статье рассмотрены различные архитектуры роботизированных систем для реабилитации нижних конечностей. Предложена структура системы реабилитации, основанная на пассивном ортезе и активном параллельном 3-PRRR роботе. Для предложенной системы реабилитации нижних конечностей разработаны и апробированы эффективные численные методы и алгоритмы, которые позволили определить рабочую зону. Время вычисления для точности аппроксимации $\delta=1$ мм на персональном компьютере составило 1 минуту 24 секунды. Дальнейшим направлением исследований является оптимизация геометрических параметров системы для проведения реабилитационных процедур.

Источник финансирования. РФФ, Соглашение № 19-19-00692

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Seshadri S., Beiser A., Kelly-Hayes M., Kase C.S., Au R., Kannel W.B. The lifetime risk of stroke: Estimates from the Framingham study // *Stroke*. 2006. Vol. 37. Pp. 345–350.
2. Carbone G. et al. (Eds.): *New Trends in Medical and Service Robotics*, MMS 65, Pp. 293–

302, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00329-6_33

3. Toth A., Fazekas G., Arz G., Jurak M., Horvath M. Passive robotic movement therapy of the spastic hemiparetic arm with REHAROB: report of the first clinical test and the follow-up system improvement, in *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on, 2005*, Pp. 127–130.

4. Bernhardt M., Frey M., Colombo G., Riener R. Hybrid force-position control yields cooperative behaviour of the rehabilitation robot LOKOMAT, in *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on, 2005*, Pp. 536–539.

5. Homma K., Fukuda O., Nagata Y., Usuba M. Study of a wire-driven leg rehabilitation system, in *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, 2004. Vol. 2. Pp. 1668-1673*.

6. Schmitt C., Metrailler P., Al-Khodairy A. The Motion Maker: A rehabilitation system combining an orthosis with closed-loop electrical muscle stimulation // *Proc. of the 8th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation, 2004*. Pp. 117–120.

7. Bouri M., Le Gall B., Clavel R. A new concept of parallel robot for rehabilitation and fitness: The Lambda // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009*. Pp. 2503-2508.

8. Lim F.M., Foong R., Yu H. A supine gait training device for stroke rehabilitation // *The 15th International Conference on Biomedical Engineering. IFMBE Proceedings, 2014. Vol. 43. Pp. 512–515*.

9. Monaco V., Galardi G., Coscia M., Martelli D., Micera S. Design and evaluation of NEU-

ROBike: A neurorehabilitative platform for bedridden post-stroke patients // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2012. Vol. 20. Pp. 845-852.

10. Homma K., Fukuda O., Sugawara J., Nagata Y., Usuba M. A wire-driven leg rehabilitation system: Development of a 4-dof experimental system // Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2003. Pp. 908–913.

11. Schmidt H., Werner C., Bernhardt R., Hesse S. and Krüger J. Gait rehabilitation machines based on programmable footplates // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2007.

12. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Malyshev D.I. Optimization of the trajectory of movement of a parallel robot based on a modified ACO algorithm // 13th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012036.

13. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Virabyan L.G. The algorithm for planning the

trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering // 30th International Conference of Young Scientists and Students - Topical Problems of Mechanical Engineering (TopME) IOP Conference Series-Materials Science and Engineering 2019. Vol. 489

14. Kong X., Gosselin C.M. Kinematics and singularity analysis of a novel type of 3-CRR 3 DOF translational parallel manipulator. The International Journal of Robotics Research 21(9), 2002, Pp. 791–798.

15. Posypkin Mikhail, Usov Alexander. Basic numerical routines, 2018 (accessed August 21, 2019). URL: <https://github.com/mposypkin/snowgoose>.

16. Рыбак Л.А., Бехера Л., Малышев Д.И., Виравян Л.Г. Аппроксимация рабочей области манипуляторов параллельной и последовательной структуры в составе мультироботизированной системы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 121–128.

Информация об авторах

Посыпкин Михаил Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой. E-mail: mposypkin@gmail.com. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук. 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11 корпус S кабинет S 803.

Халапян Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных и информационных систем управления. E-mail: khalapyan@yandex.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова НИТУ МИСиС. Россия, 309516, Старый Оскол, Белгородская обл., микрорайон им. Макаренко, д. 42.

Маслова Ирина Викторовна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: iren_mas@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мамаев Виталий Александрович, бакалавр. E-mail rl_bgtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Виравян Лусине Гарниковна, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: lvg181992@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2019 г.

© Посыпкин М.А., Халапян С.Ю., Маслова И.В., Мамаев В.А., Виравян Л.Г., 2020

¹Posypkin M.A., ²Khalapyan, S.Y., ³Maslova I.V., ³Mamaev V.A., ^{3,*}Virabyan L.G.

¹Federal Research Center «Computer Science & Control» of RAS

²Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov NUST MISiS

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF REHABILITATION ROBOTIC SYSTEMS BASED ON PARALLEL MANIPULATORS

Abstract. One of the most actual and complex problems of medicine and neurology is the rehabilitation of patients. Robotic systems currently occupy an important place in the comprehensive rehabilitation of neurological patients with severe motor impairment of various etiologies, as well as the most socially significant

and common neurological diseases. The article discusses various architectures of robotic systems for the rehabilitation of the lower limbs. The article also analyzes the work of foreign scientists who deal with these issues. As a result, a classification of rehabilitation systems has been compiled and reviewed. The structure of the rehabilitation system based on a passive orthosis and active parallel 3-PRRR robot is proposed. A numerical algorithm has been developed to determine the workspace of a 3-PRRR robot, taking into account design limitations. The algorithm is based on the concept of non-uniform coverings using interval analysis methods and is implemented in the C++ programming language. The results of computational experiments are presented. The simulation results are visualized by converting a set of three-dimensional parallelepipeds into an STL file. However, many areas remain open to theoretical research. A further area of research is the optimization of the geometric parameters of the system for carrying out rehabilitation procedures.

Keywords: parallel robot, robotic system, rehabilitation, workspace.

REFERENCES

1. Seshadri S., Beiser A., Kelly-Hayes M., Kase C.S., Au R., Kannel W.B. The lifetime risk of stroke: Estimates from the Framingham study *Stroke*. 2006. Vol. 37. Pp. 345–350.
2. Carbone G. et al. (Eds.) *New Trends in Medical and Service Robotics*, MMS 65, 2019. Pp. 293–302, https://doi.org/10.1007/978-3-030-00329-6_33
3. Toth A., Fazekas G., Arz G., Jurak M., Horvath M. Passive robotic movement therapy of the spastic hemiparetic arm with REHAROB: report of the first clinical test and the follow-up system improvement. *Rehabilitation Robotics*, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on, 2005, Pp. 127–130.
4. Bernhardt M., Frey M., Colombo G., Riener R. Hybrid force-position control yields cooperative behaviour of the rehabilitation robot LOKOMAT. *Rehabilitation Robotics*, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on, 2005. Pp. 536–539.
5. Homma K., Fukuda O., Nagata Y., Usuba M. Study of a wire-driven leg rehabilitation system. *Intelligent Robots and Systems*, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, 2004, Vol. 2. Pp. 1668–1673.
6. Schmitt C., Metrailler P., Al-Khodairy A. The Motion Maker: A rehabilitation system combining an orthosis with closed-loop electrical muscle stimulation. *Proc. of the 8th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation*. 2004. Pp. 117–120.
7. Bouri M., Le Gall B., Clavel R. A new concept of parallel robot for rehabilitation and fitness: The Lambda. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2009. Pp. 2503–2508.
8. Lim F.M., Foong R., Yu H. A supine gait training device for stroke rehabilitation. *The 15th International Conference on Biomedical Engineering. IFMBE Proceedings*. 2014. Vol. 43. Pp. 512–515.
9. Monaco V., Galardi G., Coscia M., Martelli D., Micera S. Design and evaluation of NEURO-Bike: A neurorehabilitative platform for bedridden post-stroke patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2012. Vol. 20. Pp. 845–852.
10. Homma K., Fukuda O., Sugawara J., Nagata Y., Usuba M. A wire-driven leg rehabilitation system: Development of a 4-dof experimental system. *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2003. Pp. 908–913.
11. Schmidt H., Werner C., Bernhardt R., Hesse S., Krüger J. Gait rehabilitation machines based on programmable footplates. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2007.
12. Rybak L.A., Khalapyan S.Y., Malyshev D. I.: Optimization of the trajectory of movement of a parallel robot based on a modified ACO algorithm. *13th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012036.
13. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev, D.I., Virabyan L.G. The algorithm for planning the trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering. *30th International Conference of Young Scientists and Students - Topical Problems of Mechanical Engineering (TopME) IOP Conference Series-Materials Science and Engineering 2019*. Vol. 489 DOI: 10.1088/1757-899X/489/1/012060.
14. Kong X., Gosselin C.M. Kinematics and singularity analysis of a novel type of 3-CRR 3 DOF translational parallel manipulator. *The International Journal of Robotics Research* 21(9), 2002, Pp. 791–798.
15. Posypkin Mikhail, Usov Alexander. Basic numerical routines, 2018 (accessed August 21, 2019). URL: <https://github.com/mposypkin/snowgoose>.
16. Rybak L.A., Behera L., Malyshev D.I., Virabyan L.G. Approximation of the workspace of parallel and serial structure manipulators as part of the multi-robot system. [Approksimatsiya rabochey oblasti manipulyatorov parallel'noy i posledovatel'noy struktur v sostave multirobotizirovannoy sistemy] *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No.8. Pp. 121–128. DOI:10.34031/article_5d4d6bfa2aa2a2.09768681 (rus)

Information about the authors

Posypkin, Mikhail A. DSc, Professor. E-mail: mposypkin@gmail.com. Federal Research Center «Computer Science & Control» of RAS, 109028, Moscow, Pokrovsky Boulevard, building 11, building S cabinet S 803.

Khalapyan, Sergey Y. PhD, Assistant professor. E-mail: khalapyan@yandex.ru. Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov NUST MISiS. Russia, 309516, Stary Oskol, Belgorod region, microdistrict them. Makarenko, d. 42.

Maslova, Irina V. PhD, Assistant professor. E-mail: iren_mas@list.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Mamaev, Vitaly A. Bachelor student. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Virabyan, Lusine G. Postgraduate student. E-mail: lvg181992@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in Desember 2019

Для цитирования:

Посыпкин М.А., Халапьян С.Ю., Маслова И.В., Мамаев В.А., Вирабян Л.Г. Анализ и классификация реабилитационных робототехнических систем на базе параллельных манипуляторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 85–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-85-94

For citation:

Posypkin M.A., Khalapyan S.Y., Maslova I.V., Mamaev V.A., Virabyan L.G. Analysis and classification of rehabilitation robotic systems based on parallel manipulators. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 1. Pp. 6–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-85-94