

**Ворощенко В. Д., Горькавый М. А.**  
**V. D. Voroshchenko, M. A. Gorkavyu**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В РОБОТИЗИРОВАННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ**

## **MODELING OF MOVING OBJECT COLLISIONS IN ROBOTIC TECHNOLOGICAL PROCESS**

**Ворощенко Василий Данилович** – студент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: v.voroshchenko@yandex.ru.

**Vasilii D. Voroshchenko** – Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: v.voroshchenko@yandex.ru.

**Горькавый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Mikhail A. Gorkavyu** – PhD in Engineering, Head of Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

**Аннотация.** В представленной работе ставится актуальный вопрос разработки имитационной модели роботизированного техпроцесса. Основным требованием к модели является имитация столкновений. Для реализации столкновений необходимо обеспечить идентификацию коллизий между движущимися объектами и формирование управляющих сигналов остановки имитации движений. Для решения первой задачи был выбран подход аппроксимации робота и человека набором примитивов. Были представлены визуализация положения в пространстве ключевых узлов человека и робота, а также применяемый подход наложения сфер между узлами для создания имитации физической оболочки. Был предложен алгоритм идентификации коллизий между звеньями, принадлежащими разным объектам, и формирования управляющих сигналов остановки. Управляющие сигналы осуществляют остановку имитации движений столкнувшихся звеньев. Работоспособность представленного подхода и алгоритмов также была продемонстрирована.

**Summary.** The presented work raises the actual question of developing a simulation model of a robotic process. The main requirement for the model is the simulation of collisions. For realization of collisions it is necessary to provide their identification between moving objects and formation of control signals for stopping simulation of movements. To solve the first problem we chose the approach of approximation of robot and human by a set of primitives. The visualization of the position in space of the key nodes of the human and robot was presented, as well as the approach of overlapping spheres between the nodes to create a simulation of the physical shell. An algorithm for identifying collisions between links belonging to different objects and generating stop control signals was proposed. The control signals stop the simulation of colliding links' movements. The performance of the presented approach and algorithms was also demonstrated.

**Ключевые слова:** идентификация коллизий, имитация столкновений, коллаборативная робототехника, автоматизация, имитационное моделирование.

**Key words:** collision identification, collision simulation, collaborative robotics, automation, simulation modeling.

*Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счёт средств Российского научного фонда (проект № 22-71-10093).*

УДК 681.5.017

**Введение.** Один из самых распространённых методов повышения эффективности предприятия – автоматизация посредством роботизации производства. Но для повышения эффективности контроля и регулирования производственных процессов следует внедрять коллаборативные робо-

тизированные ячейки, позволяющие человеку непосредственно влиять на выполняющиеся роботизированные процессы. Коллаборативные процессы предполагают под собой работу человека и робота в паре для того, чтобы использовать сильные стороны друг друга и нивелировать недостатки.

На существующий момент потенциал эффективного взаимодействия робота с человеком полностью не раскрыт [1]. Представляются актуальными вопросы разработки методов взаимодействия человека с роботом, способов непосредственного управления роботом для увеличения эффективности сотрудничества [2]. Современные решения коллаборативного взаимодействия включают технологии дополненной реальности [3; 4; 5], цифровых двойников для мониторинга параметров состояния субъектов управления и формирования управляющих воздействий [5; 6], оптимизацию и планирование траекторных перемещений [7; 8], мультимодальные системы управления [9; 10; 11], снижение времени исполнения технологических операций [12].

На данный момент научное сообщество занимается разработкой интеллектуальных алгоритмов управления коллаборативным роботом (коботом), основанных на физическом воздействии человека как при прямом контакте, так и при различных положениях (жестикуляции), тем не менее область полностью не раскрыта. Для исследования возможностей физического влияния предлагается прибегнуть к моделированию таких взаимодействий. В связи с этим появляется необходимость в разработке имитационной модели, которая обеспечит возможность проведения адекватного моделирования технологических процессов (техпроцессов) для принятия решений в реальном времени в рамках одновременного исполнения техпроцесса и непрерывной симуляции [12; 13].

Помимо функционала управления положениями моделируемых объектов с графическим отображением (см. рис. 1, а) и функционала математического расчёта кинематики и геометрии, модель должна регистрировать коллизии человека и робота. В связи с этим ставится цель: разработать функционал идентификации коллизий и моделирования столкновений.

**Задачи** для достижения цели:

- определить целесообразный подход идентификации коллизий между объектами;
- адаптировать алгоритмы идентификации коллизий;
- реализовать использование данных о наличии коллизий в сигналы остановки имитации движений.

**Методология.** В качестве метода расчёта кинематики человека был использован метод Денавита – Хартенберга (ДХ). Метод позволил рассчитать необходимые координаты положения сочленений в пространстве для реализации алгоритмов. Целесообразно использовать этот метод для унификации расчёта кинематики. Это упростит в дальнейшем вопросы интеграции алгоритмов поиска коллизий, расчёта динамики и т. д.

При проведении анализа подходов к определению коллизий в модели роботизированного техпроцесса был выявлен наиболее распространённый: подход представления человека и робота примитивами [14; 15; 16]. Подход заключается в аппроксимации сложных объектов (робот, человеческая рука) до набора точек с последовательно наложенными сферами. В результате формируется поверхность с низкой степенью кривизны, идентичная поверхности звеньев человека. Определение коллизии происходит за счёт сравнения положения в пространстве сфер одного объекта со сферами другого.

Поскольку текущие исследования в области моделирования роботизированных процессов для формирования интеллектуальных систем управления основаны на объектно-ориентированном подходе [12; 17], было принято решение использовать для реализации алгоритмов высокоуровневые языки программирования C++/Matlab/Python. Автоматизацию расчёта кинематики предлагается осуществлять на базе Matlab, предоставляющей возможность визуализации как результатов математических моделей в 2D- и 3D-формате, так и 3D-модели человека с помощью заданной структуры 3D-примитивов (Simscape Multibody).

Симуляция модели в статичном состоянии была выполнена с помощью дискретного решателя; в динамике, при имитации движений – с помощью решателя нежёстких систем дифференциальных уравнений (ДУ) среднего порядка точности. Полученная модель также пригодна и для решателя жёстких систем ДУ.

**Основная часть.** Для создания функционала идентификации коллизий необходимо в режиме реального времени отслеживать положение каждого сочленения человека и робота в пространстве. Под сочлением понимается соединение двух звеньев. Расположение в пространстве этого соединения и необходимо учитывать.

В данном случае положение определяется в декартовой системе координат. Совокупность положений таких соединений образует собой конструкцию, состоящую из суставов, применительно как к роботу, так и к человеку (см. рис. 1, б).

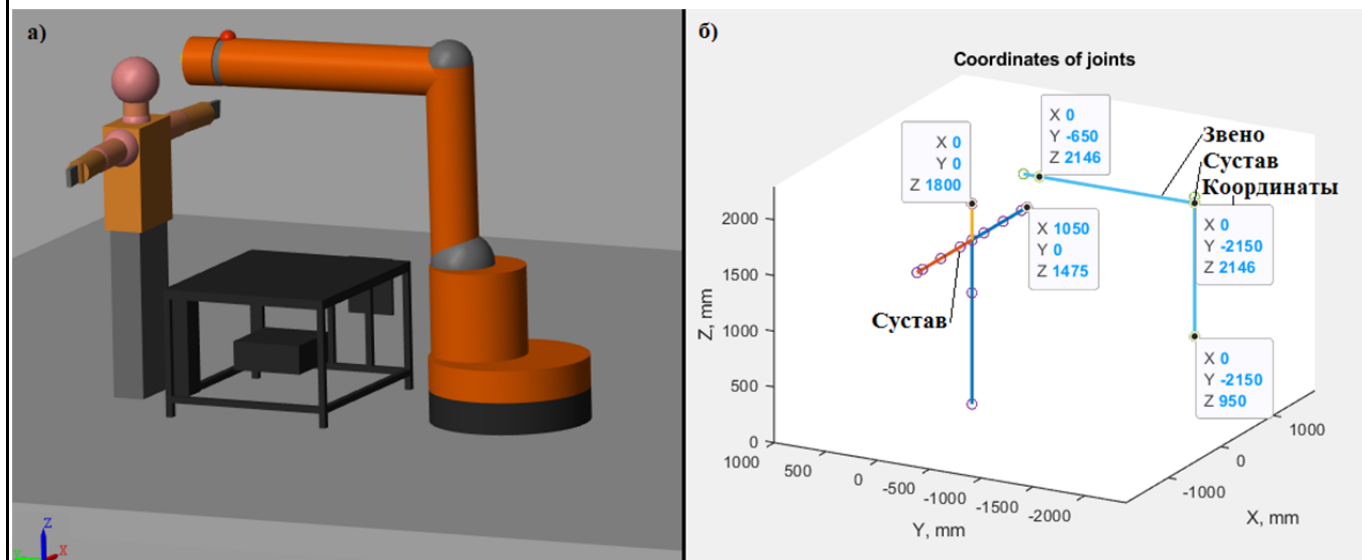


Рис. 1. Отображение модели: а – визуализация моделируемых объектов; б – отображение положения суставов модели человека и робота

Используя координаты этих суставов, необходимо отложить между смежными суставами промежуточные точки в пространстве, равномерно расположенные на линии соединения. Каждая линия соединения принадлежит отдельному звену. Таким образом, для каждого звена существует свой набор точек.

Эти точки являются центрами сфер, внутри которых осуществляется поиск сфер других звеньев, например, в радиусе сфер, принадлежащих звеньям модели человека, осуществляется поиск сфер, принадлежащих звеньям модели робота. Так создаётся имитация поверхности объектов сложной конфигурации (см. рис. 2). Поверхность из сфер имеют модель робота, руки, шея и голова модели человека, а тело аппроксимировано фигурой параллелепипеда.

Далее для определения коллизии одного объекта с другим необходимо проверить условие для центра каждой сферы:

$$r_{l,i}^o + r_{l',i}^o \geq \sqrt{(x_{l,i}^o - x_{l',i}^o)^2 + (y_{l,i}^o - y_{l',i}^o)^2 + (z_{l,i}^o - z_{l',i}^o)^2},$$

где  $r_{l,i}^o$  – радиус сферы, относительно которой определяется коллизия;  $r_{l',i}^o$  – радиус сферы другого звена, с которым осуществляется поиск коллизии;  $o$  – номер, определяющий объект (модель человека или робота);  $l$  – порядковый номер звена, относительно которого определяется коллизия;  $l'$  – порядковый номер звена, с которым осуществляется поиск коллизии;  $i$  – порядковый номер сферы;  $x, y, z$  – координаты центра первой сферы.

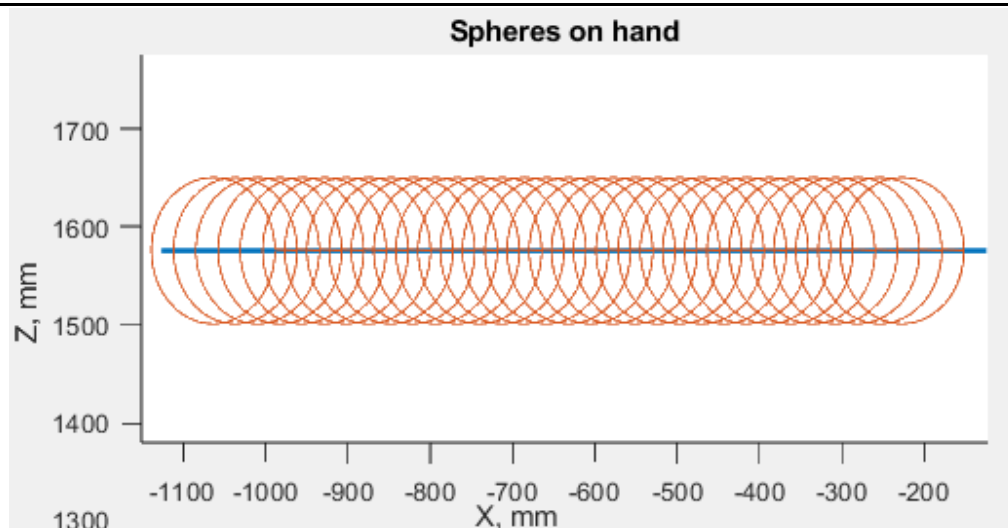


Рис. 2. Наложение сфер на руку модели человека

При выполнении условия считается, что между сферами существует коллизия.

Выражение основывается на утверждении: если расстояние между центрами сфер меньше, чем сумма радиусов, то они пересекаются.

Ниже представлен алгоритм определения коллизии между сферами разных звеньев (см. рис. 3, б).

В качестве входящих значений алгоритм получает:

- количество сфер каждого объекта (например, рука человека имеет 33 сферы, а робот – 119);
- массивы с координатами положения в пространстве каждого центра сферы;
- промежуточные переменные (*length, str*).

После этого с помощью цикла рассчитываются и записываются значения расстояния между сферами разной принадлежности. Поочерёдно цикл перебирает все возможные случаи. После происходит поиск значений расстояния меньших, чем сумма радиусов сфер разной принадлежности. Результат суммируется и выводится сигнал о наличии либо отсутствии коллизии. Таким образом происходит алгоритмическое определение коллизий между условными объектами.

Следующим этапом необходимо определить возможные объекты столкновения, которые стоит учитывать: левая рука человека, правая рука человека, тело, голова, робот.

Модель человека следует разделять на составные части для дифференциации сигналов остановки движимых звеньев. Так, при столкновении правой руки с роботом левая рука останется свободна для движений.

Для формирования алгоритма идентификации коллизий между обозначенными объектами следует уточнить, что необходимо осуществлять поиск коллизий между руками и роботом, между роботом и телом, между роботом и головой. Ноги не учитываются, поскольку не входят в рабочую зону робота. На рис. 3, а представлен алгоритм идентификации коллизий между роботом и звеньями человека.

На вход алгоритм получает координаты точек, равномерно распределённых вдоль линии соответствующих звеньев. Эти точки являются центрами сфер, используемых в рис. 2.

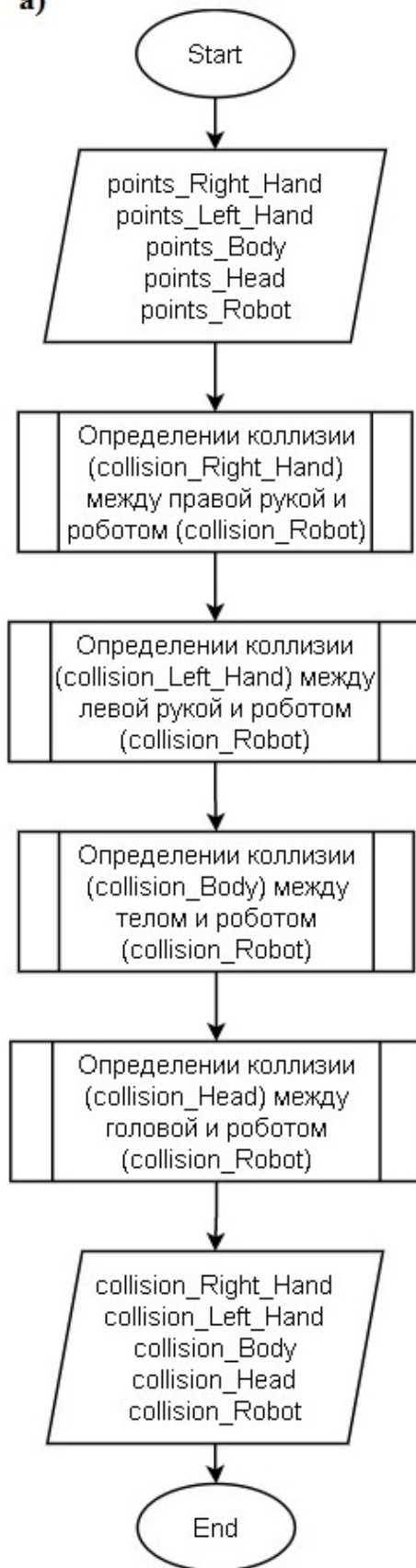
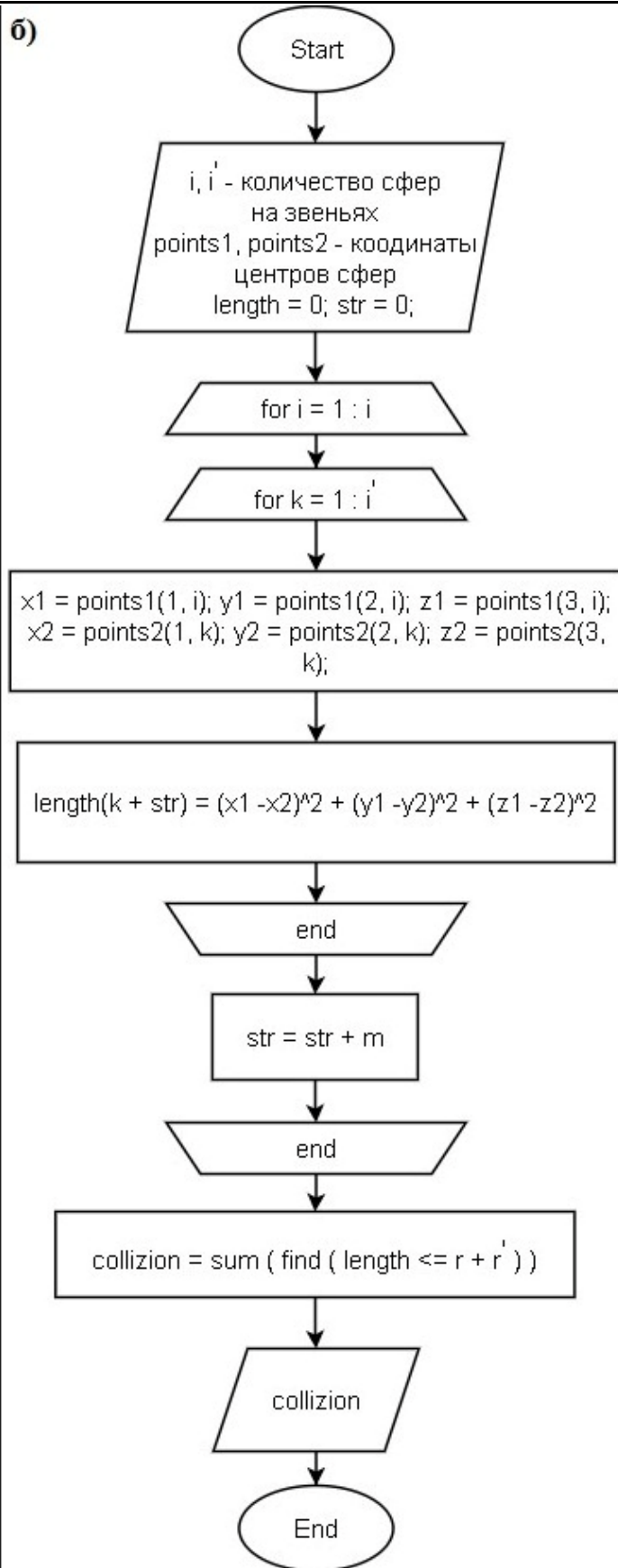
**а)****б)**

Рис. 3. Алгоритмы для идентификации коллизий между человеком и роботом:  
 а – алгоритм идентификации коллизий между роботом и звеньями человека;  
 б – алгоритм определения коллизии между набором сфер двух звеньев

Следующим шагом происходит поочерёдный расчёт коллизий между звеньями человека и робота. Полученные значения выводятся и используются функциональным блоком формирования сигналов остановки (см. рис. 4).

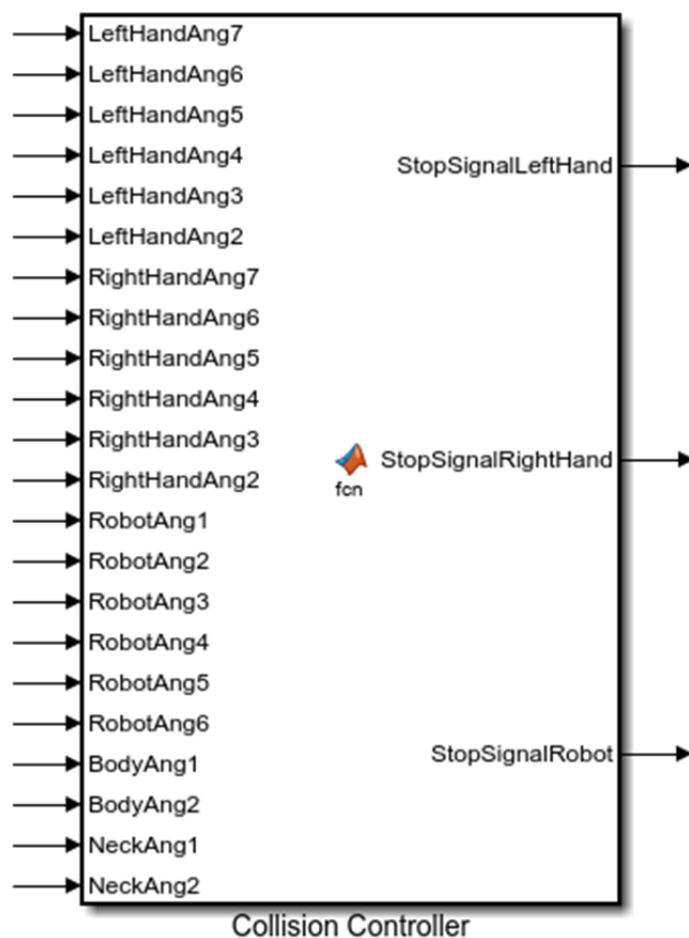


Рис. 4. Блок формирования сигналов остановки

Полученные сигналы могут иметь значения: 0 – выполнение движения не прерывается; 1 – движение необходимо остановить.

Эти сигналы поступают в блоки имитации движений соответствующих объектов. За счёт этого визуально отображается столкновение и остановка объектов (см. рис. 5). Представленные фрагменты симуляции модели демонстрируют её работоспособность.

Из этого следует, что главная цель по идентификации коллизий и имитации столкновений выполнена.

**Заключение.** В результате проведённой работы был адаптирован алгоритм определения коллизий в рамки моделирования роботизированного технологического процесса, а также был разработан алгоритм определения коллизий между звеньями моделей человека и робота. Результаты этих алгоритмов используются в управлении движениями, а именно для остановки столкнувшихся звеньев моделей. Полученный функционал идентификации коллизий в ходе демонстрации доказал свою работоспособность.

Представленные алгоритмы позволяют сохранить модульность модели и способны подстраиваться под изменения в составе моделируемых объектов. Поверхность, составленная из сфер, имеет возможность не только точно повторять рельеф и кривизну поверхности звеньев робота или рук человека, но и нарастить объём для создания дополнительного буфера, при котором коллизия может регистрироваться заранее, на некотором удалении. Это можно использовать для повышения

безопасности при внедрении решения в реальном комплексе, а также при разработке алгоритмов, предсказывающих коллизии. Кроме того, предложенный функционал позволит решить вопросы оптимизации планирования траектории перемещения коллаборативного робота.

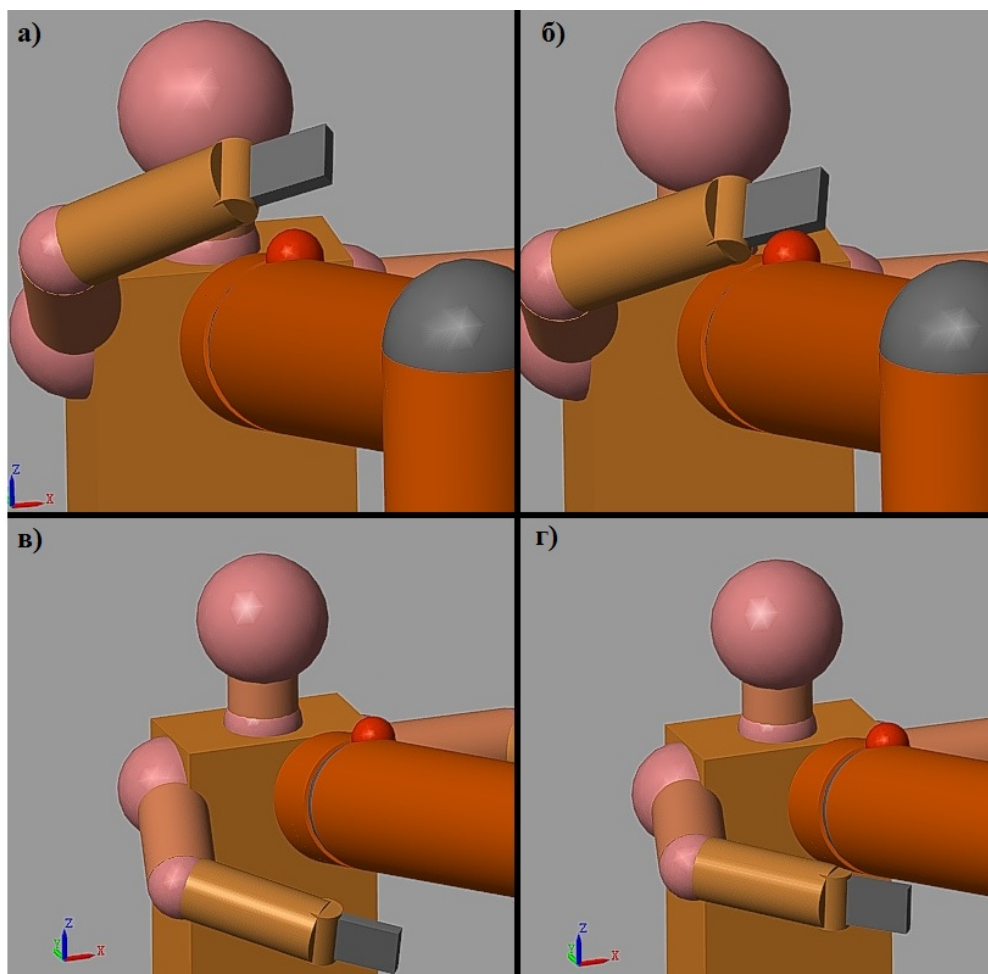


Рис. 5. Коллизия между рукой и роботом:

а – свободное перемещение руки модели человека; б – столкновение руки с роботом;  
в – свободное перемещение модели робота; г – столкновение модели робота с рукой

В будущем работа над имитационной моделью позволит создать платформу для тестирования и отладки интеллектуальных алгоритмов управления роботизированными процессами. Завершение данного этапа открывает возможность разработки методов оптимизации роботизированных процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shufei Li, Pai Zheng, Sichao Liu, Zuoxu Wang, Xi Vincent Wang, Lianyu Zheng, Lihui Wang, Proactive human-robot collaboration: Mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 81, 2023, 102510, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102510>.
2. Pandya, Ravi & Liu, Changliu. (2022). Safe and Efficient Exploration of Human Models During Human-Robot Interaction. 10.48550/arXiv.2208.01103.
3. Juan Heredia, Christian Schlette, Mikkel Baun Kjærgaard AR Training App for Energy Optimal Programming of Cobots, arXiv:2210.08015v1 [cs.RO] 14 Oct 2022 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.08015>.
4. K. Zieliński, K. Walas, J. Heredia and M. B. Kjærgaard, A Study of Cobot Practitioners Needs for Augmented Reality Interfaces in the Context of Current Technologies, 2021 30th IEEE International Conference on Robot &

- Human Interactive Communication (RO-MAN), Vancouver, BC, Canada, 2021, pp. 292-298, doi: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515406.”, 2022.
5. Chao Zhang, Guanghui Zhou, Dongxu Ma, Rui Wang, Jiacheng Xiao, Dan Zhao, A deep learning-enabled human-cyber-physical fusion method towards human-robot collaborative assembly, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 83, 2023, 102571, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102571>.
  6. Shenglin Wang, Jingqiong Zhang, Peng Wang, James Law, Radu Calinescu, Lyudmila Mihaylova, A deep learning-enhanced Digital Twin framework for improving safety and reliability in human-robot collaborative manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 85, 2024, 102608, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102608>.
  7. Zanchettin, A. M., Messeri, C., Crantielli, D. et al. Trajectory optimisation in collaborative robotics based on simulations and genetic algorithms. *Int J Intell Robot Appl* 6, 707-723 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41315-022-00240-4>.
  8. Mark Nicholas Finean, Wolfgang Merkt, Ioannis Havoutis, Predicted Composite Signed-Distance Fields for Real-Time Motion Planning in Dynamic Environments. *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, 2021. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.00969>.
  9. O. Vermesan, R. Bahr, M. Ottella, M. Serrano, T. Karlsen, T. Wahlstrøm, H.-E. Sand, M. Ashwathnarayan, M. T. Gamba, Internet of robotic things intelligent connectivity and plat-forms, *Frontiers in Robotics and AI* 7 (2020) 104.
  10. M. Yunus Seker, Alper Ahmetoglu, Yukie Nagai, Minoru Asada, Erhan Oztop, Emre Ugur, Imitation and mirror systems in robots through Deep Modality Blending Networks, *Neural Networks*, Volume 146, 2022, P. 22-35, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.11.004>.
  11. Alexandre Angleraud, Akif Ekrekli, Kulunu Samarawickrama, Gaurang Sharma, Roel Pieters, Sensor-based human-robot collaboration for industrial tasks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 86, 2024, 102663, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102663>.
  12. Asad, Usman & Khan, Madeeha & Khalid, Azfar & Lughmani, Waqas. (2023). Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. *Sensors*. 23. 10.3390/s23083938.
  13. Sun, Xuemin & Zhang, Rong & Liu, Shimin & Lv, Qibing & Jinsong, Bao & Li, Jie. (2021). A Digital Twin-driven Human-robot Collaborative Assembly-commissioning Method for Complex Products. 10.21203/rs.3.rs-506544/v1.
  14. Giovanni Boschetti, Maurizio Faccio, Irene Granata, Riccardo Minto, 3D collision avoidance strategy and performance evaluation for human-robot collaborative systems, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 179, 2023, 109225, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109225>.
  15. Xingxin Li, Shibo Song, Junfeng Yao, Hanyin Zhang, Rongzhou Zhou, Qingqi Hong, Efficient collision detection using hybrid medial axis transform and BVH for rigid body simulation, *Graphical Models*, Volume 128, 2023, 101180, ISSN 1524-0703, <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2023.101180>.
  16. Shuming Yi, Sichao Liu, Xiaohu Xu, Xi Vincent Wang, Sijie Yan, Lihui Wang, A vision-based human-robot collaborative system for digital twin, *Procedia CIRP*, Volume 107, 2022, Pages 552-557, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.024>.
  17. Claudio Tripodo, Stefano Lorenzi, Antonio Cammi, Giocchino Micciché, Object-oriented modeling, simulation and control of a 6-DoF parallel kinematic manipulator for remote handling in DONES facility, *Fusion Engineering and Design*, Volume 184, 2022, 113304, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113304>.