

СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА И КОБОТА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ СБОРКИ

Топорин А.А.

*Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",
Москва*

Ключевые слова: коллаборативная робототехника, предотвращение столкновений, камера глубины, облако точек, минимальное расстояние.

Аннотация. Статья посвящена описанию концепции построения системы предотвращения столкновений человека и робота в процессе работы производственной коллаборативной ячейки сборки. Представлен краткий обзор существующих решений в области решения подобных задач. Описана структура предлагаемой системы и дан алгоритм ее работы. Приведено компьютерное моделирование одного из этапов работы системы – расчет минимального расстояния между человеком и роботом, которое свидетельствует о работоспособности предлагаемого алгоритма системы.

A COLLISION AVOIDANCE SYSTEM BETWEEN A HUMAN AND A ROBOT DURING THE OPERATION OF A PRODUCTION COLLABORATIVE ASSEMBLY CELL

Toporin A.A.

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow

Keywords: collaborative robotics, collision avoidance, depth camera, point cloud, minimum distance.

Abstract. The article describes the concept of building a collision avoidance system between a human and a robot during the operation of a production collaborative assembly cell. A brief overview of existing solutions in the field of solving such problems is presented. The structure of the proposed system is described and the algorithm of its operation is given. A computer modeling of one of the stages of the algorithm of the system operation is given – the calculation of the minimum distance between a human and a robot, which indicates the operability of the proposed algorithm of the system.

Введение

Безопасность работы человека в составе производственной коллаборативной ячейки (ПРЯ) – одна из наиболее важных задач, решаемых при создании ПРЯ. Согласно ГОСТ Р 60.1.2.3-2021 [1] её решение может быть достигнуто с использованием четырех методов: контролируемая остановка с расчетной безопасностью, ручное управление, ограничение скорости и соблюдение защитного расстояния разделения, ограничение мощности и силы. При использовании первого метода робот останавливается, как только человек появляется в рабочей зоне. При использовании второго метода, человек сам управляет движениями робота. При использовании третьего метода, риск соударения с человеком снижается за счет снижения скоростей движения робота и поддержания защитного расстояния с человеком (чем ближе человек, тем скорость робота ниже, до тех пор, пока он не остановится совсем). В четвертом

методе ограничиваются силы, с которыми робот может воздействовать на объекты внешней среды и на человека.

Таким образом, каждый из этих методов подразумевает внесение ограничений в работу робота. И основным ограничением является снижение скоростей его движения. При нахождении человека в совместном рабочем пространстве [1], робот так или иначе снижает свою скорость, вплоть до полной остановки, а это приводит к увеличению времени выполнения производственной операции.

Вопросы повышения безопасности работы человека в составе ПРЯ рассматривались в работах [2-5]. В [2] описывается успешное использование метода «гипотетических векторов притяжения и отталкивания» при совместной сборке человеком и роботом в автомобильной промышленности. Отмечается, что для работы системы требуется закрепление на человеке несколько блоков инерциальной навигации и использование лазерного дальномера. В работе [3] для отслеживания траектории человека и положений иных объектов в рабочей зоне робота используется несколько камер глубины. В работе [4] приведено компьютерное моделирование разрабатываемой системы управления коллаборативным роботом с использованием методов аналитической пространственной геометрии и цифровых фильтров второго порядка с критическим демпфированием. В патенте [5] описывается разработанная система предиктивного избегания столкновения манипулятора с человеком с использованием камер глубины и указывается, что такой подход обеспечивает повышение производительности и отказоустойчивости роботизированной системы.

Таким образом, развитие данного подхода является актуальным методом повышения эффективности использования коллаборативных систем на производстве, позволяющим человеку и роботу безопасно решать поставленные перед ними задачи, работая совместно и одновременно в одном рабочем пространстве.

В представленной работе представлена концепция построения системы предотвращения столкновений человека и кобота, использующая данные, полученные от нескольких камер глубины.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (FSFS-2021-0004).

Основные идеи и элементы системы предотвращения столкновений

Для повышения производительности ПРЯ предлагается разработка алгоритмов управления, позволяющих коботу совершать движения, направленные на выполнение порученного ему задания, и предотвращать столкновения с человеком. Система, построенная с применением таких алгоритмов, должна непрерывно отслеживать изменяющиеся положения элементов тела человека и оперативно корректировать пространственные положения звеньев и рабочего органа кобота. Таким образом, речь идёт не только о корректировке траектории движения рабочего органа, но, прежде всего, об изменении всей конфигурации звеньев кобота для предотвращения любого контакта с телом человека.

Для своевременного изменения движения звеньев робота, ему необходима информация об окружающей среде. Её он может получить различными способами: через датчики соприкосновений, силомоментные датчики, лазерные дальномеры, ультразвуковые датчики и др. В данной работе предлагается использовать камеру глубины как основной источник информации для робота. С помощью системы технического зрения, в состав которой входит камера, система управления будет способна выделять в пространстве человека и иные объекты взаимодействия, а также препятствия, которые роботу потребуется избегать.

Поскольку производственный процесс сборки может включать в себя операции по перемещению и удержанию относительно крупных с точки зрения размеров изделий, то в определенные моменты времени некоторые участки рабочего пространства на изображении могут быть перекрыты, что приведет к потере информации об окружающей среде и потенциальному столкновению робота с объектом.

Для решения этой проблемы предлагается установка как минимум одной дополнительной камеры для увеличения обзора рабочей зоны. При разработке системы предотвращения столкновений будем рассматривать вариант с двумя камерами глубины, но в дальнейшем их количество может быть увеличено для еще большего расширения обзора рабочего пространства.

Алгоритм работы системы предотвращения столкновений

В основе предлагаемого метода предотвращения столкновений лежит получение облака точек в пространстве на основе данных с нескольких камер глубины. Далее, в данном облаке выделяются человек и робот. В пространстве точек робота выделяется одна точка, на основании координат которой определяется ближайшая к ней точка в пространстве точек человека. На основании координат полученной точки в пространстве точек человека, находится новая точка в облаке точек робота, которая расположена ближе всего к облаку точек человека. Поиск продолжается до тех пор, пока значение расстояния между двумя точками в пространстве точек робота не станет ниже заданного порога. Расстояние между двумя полученными точками в пространстве точек человека и робота используется для принятия решения о корректировке траектории робота.

Алгоритм работы предлагаемого метода представлен на рисунке 1.

Важными вопросами являются объединение облаков точек, полученных от нескольких камер глубины, распознавание и выделение в полученном результирующем облаке человека, робота и иных объектов окружающей среды.

Существует несколько методов получения облака точек от нескольких камер. В работе [6] описывается алгоритм сопоставления трехмерных облаков точек на основе сиамской архитектуры глубокого обучения и сверточных нейронных сетей. В работе [7] для поиска соответствий облаков точек используется сверточная нейронная сеть KdO-Net на основе K-d деревьев и октодеревьев. В работе [8] предложен основанный на обучении подход к частичному сопоставлению облаков точек в жестких и деформируемых сценах – Leopard.

Определению человека в облаке точек посвящены работы [9-12]. В работе [9] для распознавания человека в трехмерном пространстве была разработана нейронная сеть на основе сверточной нейронной сети Минковского с архитектурой U-Net. В работе [10] представлен подход к выделению признаков из облака точек на основе гистограмм локальных нормалей к поверхности и сегментации по методу «сверху-вниз/снизу-вверх» для обнаружения частично закрытых людей. В работе [11] распознавание человека осуществляют путем тренировки нейронной сети YOLO. В работе [12] разработан подход на основе теории графов по получению сегментированного изображения человека с камеры глубины.



Рис. 1. Алгоритм работы системы предотвращения столкновения

Расчет минимального расстояния между человеком и роботом предлагается выполнять по следующему алгоритму, который был промоделирован в среде MATLAB.

1. Для определения положения робота относительно человека в пространстве точек робота случайно выбираются три точки: $R1$ – в верхней части, $R2$ – в средней части и $R3$ – в нижней части (рис. 2).

2. На основании координат полученных точек, вычисляется положение одной – R , характеризующей позицию робота (рис. 2).

3. В пространстве точек человека определяется точка H , расположенная ближе всего к точке R (рис. 3).

4. В пространстве точек робота определяется точка RN , расположенная ближе всего к точке H (рис. 3).

5. Если $\|RN - R\| < u$, где u – заданный порог окончания поиска, то определяется наименьшее расстояние между человеком и роботом $D = \|RN - H\|$ и поиск заканчивается (рис. 4), иначе, $R = RN$ и алгоритм переходит к пункту 3.

Поиск минимального расстояния на персональном компьютере с CPU Intel® Core™ i5 9400F и RAM 16 Gb занимает от 1 мс до 200 мс в зависимости от количества точек в облаке.

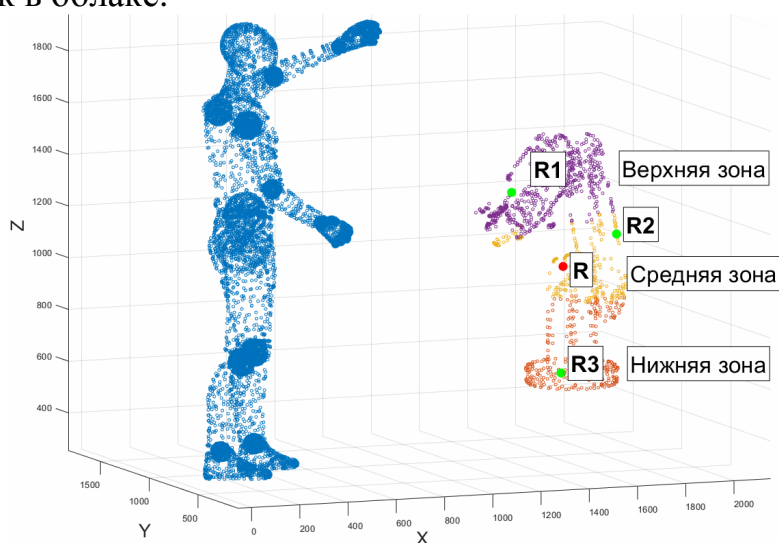


Рис. 2. Определение положения робота

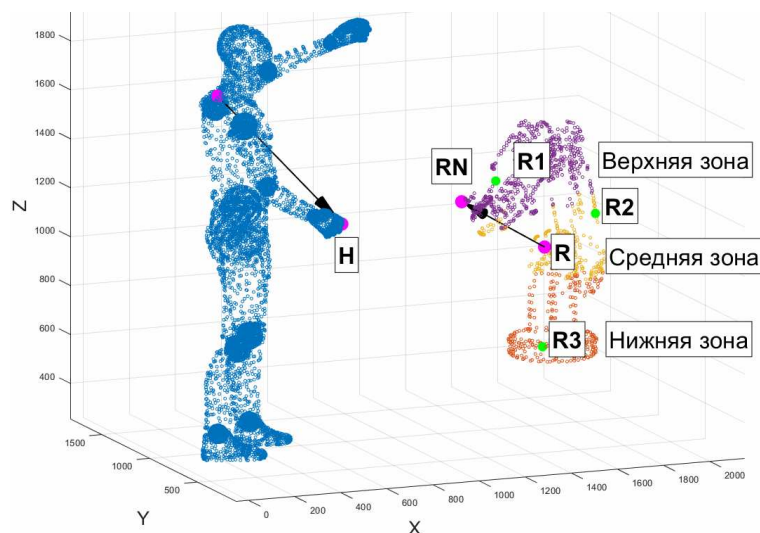


Рис. 3. Определение ближайших точек в пространстве точек человека и робота

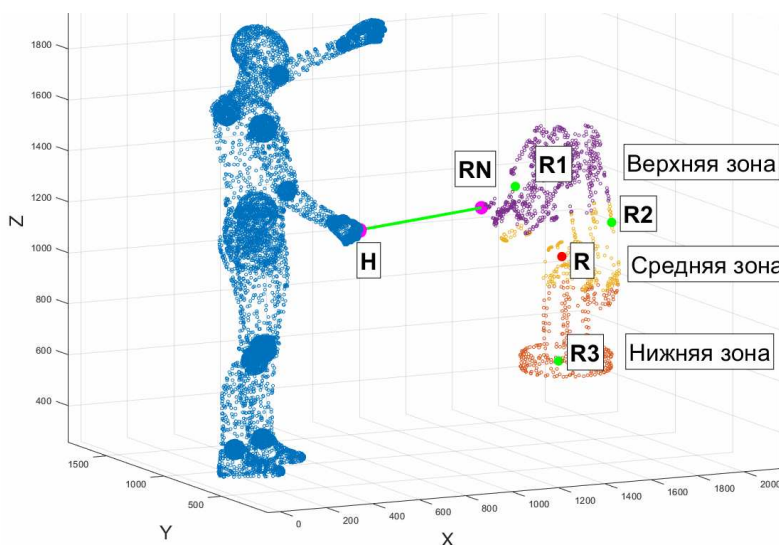


Рис. 4. Определение кратчайшего расстояния от человека до робота

В таблице 1 приведено сравнение работы описанного алгоритма расчета минимального расстояния с алгоритмом полного перебора по времени поиска и ошибки определения расстояния.

Примеры поиска кратчайшего расстояния по облаку точек приведены на рисунке 5,а-г.

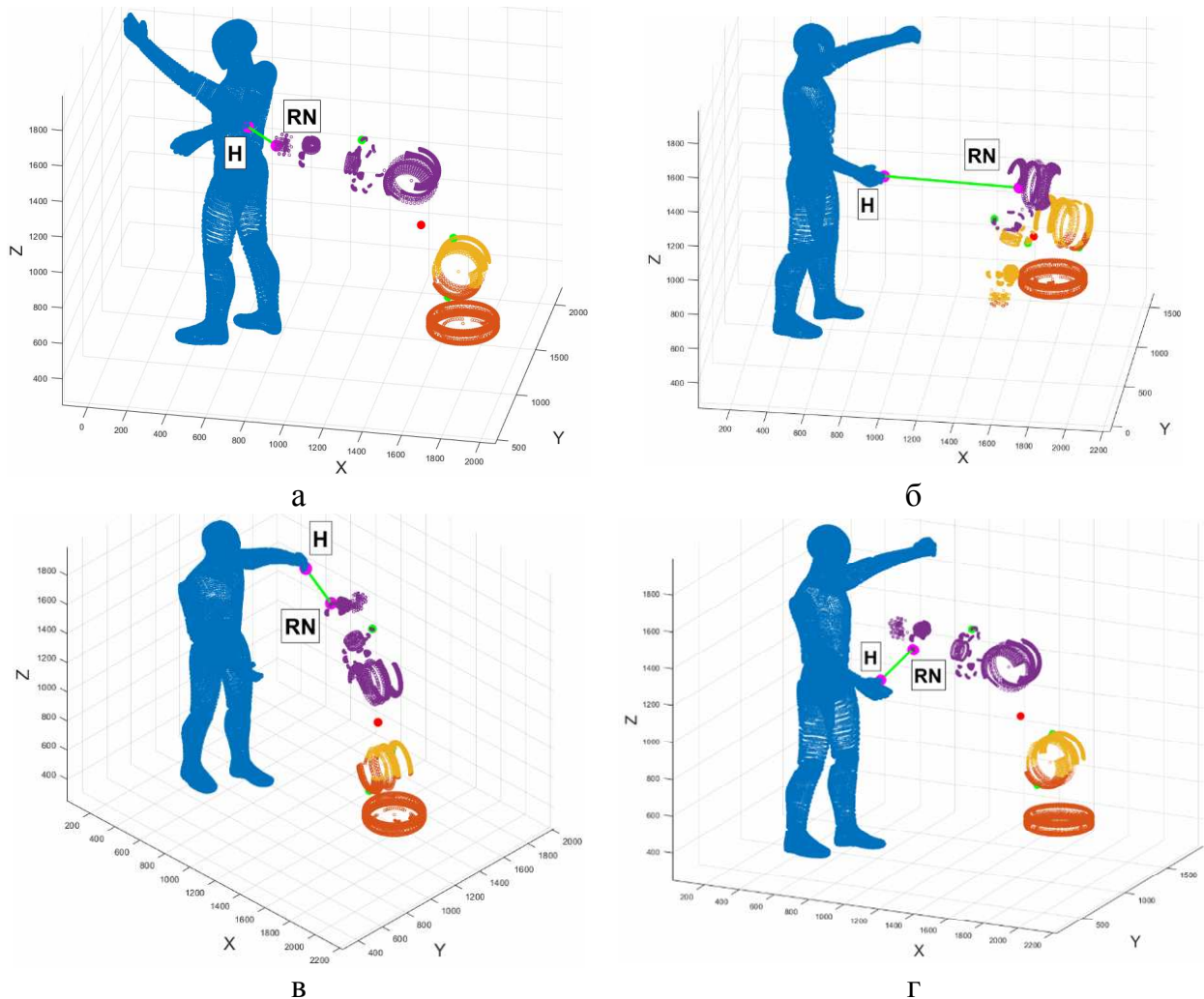


Рис. 5. Примеры определения минимального расстояния между человеком и роботом

Как видно из таблицы 1, разница между измерением минимального расстояния с помощью описанного алгоритма и с помощью алгоритма полного перебора невелика или равна нулю.

В зависимости от значения D траектория движения рабочего органа робота или его звеньев может изменяться. Если значение D становится меньше или равно значению минимального допустимого расстояния между роботом и человеком, система управления роботом должна перестроить траекторию движения всех его звеньев таким образом, чтобы обеспечить движение робота на безопасном от человека расстоянии, но при этом должно сохраниться движение рабочего органа к целевой точке для выполнения порученного роботу задания.

Табл. 1. Сравнение предлагаемого алгоритма расчета минимального расстояния с алгоритмом полного перебора

№	Полученное расстояние D , мм		Ошибка определения расстояния, мм	Время поиска и расчета		Общее число точек
	Описанный алгоритм	Полный перебор		Описанный алгоритм	Полный перебор	
1	515,337	515,337	0	15 мс	4,4 мин	8969
2	435,491	435,491	0	21 мс	2,2 мин	8594
3	742,403	742,098	0,305	15 мс	2,3 мин	8593
4	734,383	734,383	0	15 мс	2,2 мин	8596
5	268,963	268,963	0	21 мс	2,2 мин	8590
6	232,956	232,956	0	21 мс	2,5 мин	8600
7	217,41	217,41	0	21 мс	2,2 мин	8574
С увеличенным числом точек						
1	504,357	504,357	0	50 мс	1,1 часа	35873
Разница при измерении с меньшим числом точек				515,337 мм – 504,357 мм = 10,98 мм		
3	737,866	737,866	0	49 мс	35 мин	34372
Разница при измерении с меньшим числом точек				742,403 мм – 737,866 мм = 4,54 мм		
6	231,592	223,286	8,306	68 мс	37 мин	34399
Разница при измерении с меньшим числом точек				232,956 мм – 223,286 мм = 9,67 мм		

Заключение

В основе концепции построения системы предотвращения столкновения человека и робота лежит система технического зрения, состоящая, как минимум, из двух камер глубины, контролирующих рабочее пространство производственной коллаборативной ячейки.

В процессе работы данной системы непрерывно рассчитывается минимальное расстояние между элементами тела человека и звеньями робота, на основании которого при необходимости корректируются движения робота. Работоспособность алгоритма такого расчёта подтверждена результатами компьютерного моделирования.

Список литературы

- ГОСТ Р 60.1.2.3-2021. Библиографическая ссылка. Роботы и робототехнические устройства. Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком. – Введ. 2021-11-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 31 с.;
- Safeea Mohammad, Neto Pedro, Béarée Richard. On-line collision avoidance for collaborative robot manipulators by adjusting off-line generated paths: An industrial use case // Robotics and Autonomous Systems. 2019, vol. 119, pp. 278-288.
- Chen Jen-Hao, Kai-Tai Song. Collision-Free Motion Planning for Human-Robot Collaborative Safety Under Cartesian Constraint // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2018, pp. 4348-4354.
- Simas Henrique, Di Gregorio, Raffaele. Collision Avoidance for Redundant 7-DOF Robots Using a Critically Damped Dynamic Approach // Robotics. 2022, vol. 11, no. 5, pp. 93-111.

5. Патент №2685996 РФ. Способ и система предиктивного избегания столкновения манипулятора с человеком / А.Л. Постников, А.Р. Гамаюнов, Д.Д. Затыгов, А.Р. Ефимов. – Заявка №2018146647 от 26.12.2018; опублик. 23.04.2019, Бюл. №12.
6. Zan Gojic, Caifa Zhou, Jan D. Wegner, Andreas Wieser. The Perfect Match: 3D Point Cloud Matching with Smoothed Densities // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2019, pp. 5545-5554.
7. Zhang R., Li G., Wiedemann W., Holst C. KdO-Net: Towards Improving the Efficiency of Deep Convolutional Neural Networks Applied in the 3D Pairwise Point Feature Matching // Remote Sensing. 2022, vol. 14, no. 12, pp. 2883-2904.
8. Li Y., Harada T. Leopard: Learning partial point cloud matching in rigid and deformable scenes // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022, pp. 5544-5554.
9. Jia D., Leibe B. Person-MinkUNet: 3D Person Detection with LiDAR Point Cloud // arXiv preprint. 2021.
10. Hegger F., Hochgeschwender N., Kraetzschmar G.K., Ploeger P.G. People Detection in 3d Point Clouds Using Local Surface Normals // RoboCup 2012: Robot Soccer World Cup XVI. 2013, pp. 154-165.
11. Ligocki A., Zalud L. Human Detection in the Depth Map Created from Point Cloud Data, Modelling and Simulation for Autonomous Systems // MESAS 2021. Lecture Notes in Computer Science. 2022, vol. 13207.
12. Hynes A., Czarnuch S. Human Part Segmentation in Depth Images with Annotated Part Positions, Sensors. 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1900-1914.

Сведения об авторе:

Топорин Андрей Александрович – аспирант.