

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.865

Обзор манипуляторов грузоподъемностью до семи килограммов

А.А. Рогачев¹, К.В. Климов¹, Р.М. Щербов¹, А.А. Романов²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова

² ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Review of manipulator devices with a lifting capacity of up to seven kilograms

A.A. Rogachev¹, K.V. Klimov¹, R.M. Scherbov¹, A.A. Romanov²

¹ Lomonosov Moscow State University

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Международная федерация робототехники (IFR) выделила пять основных трендов на 2024 г., среди которых два касаются непосредственно манипуляторов: расширение сферы деятельности коллаборативных манипуляторов и мобильных манипуляторов. Коллаборативные роботы (коботы) — это интеллектуальные устройства, предназначенные для работы совместно с человеком. В отличие от промышленных роботов они спроектированы так, чтобы не подвергать опасности находящихся рядом людей. Рассмотрены небольшие коботы, которые способны безопасно работать в непосредственной близости от оператора, так как обладают сенсорами, останавливающими их при контакте с посторонними объектами. Эти механизмы также можно установить на небольшие мобильные платформы для обеспечения перемещения объектов, технического обслуживания, мониторинга, сварки и других рутинных задач. Исследовано семь коботов различных производителей из Белоруссии, России, Японии, Германии и Китая. Данные получены из статей и открытых источников. Выполнено сравнение результатов исследования. Предложена классификация манипуляторов по различным параметрам.

EDN: TBMDPO, <https://elibrary/tbmdpo>

Ключевые слова: коллаборативный манипулятор, кобот, мобильные манипуляторы, обзор, повторяемость работы манипулятора

The International Federation of Robotics (IFR) identifies the five key trends for 2024; two of them are directly related to the manipulators and include expansion of the collaborative manipulators scope and the mobile manipulators. Collaborative robots (cobots) are the intelligent devices designed to operate together with a human. Unlike the industrial robots, they are designed in such a way as not to endanger the people nearby. The paper considers small manipulators that could safely operate next to a human, as they are equipped with sensors that stop the manipulator upon contact with a foreign object. These devices could also be installed on the small mobile platforms to ensure performance of tasks such as the object displacement, technical maintenance, monitoring, welding, and the other routine

tasks. The paper analyzes operation of seven manipulators from various manufacturers originating in Belarus, Russia, Japan, Germany, and China. The data are obtained from the articles and the open sources. The paper compares the research results. It proposes a classification of the manipulators based on the varying parameters.

EDN: TBMDPO, <https://elibrary/tbmdpo>

Keywords: collaborative manipulator, cobot, mobile manipulators, review, manipulator operation repeatability

Развитие коллаборативных манипуляторов (коботов) [1], способных функционировать в непосредственной близости от оператора [2] без угрозы для человека [3] — один из основных трендов роботизации 2024 г. Активному внедрению таких технологий способствует развитие датчиков [4], систем компьютерного зрения [5] и интеллектуальных захватов [6], обеспечивающих более предсказуемое взаимодействие с внешней средой в режиме реального времени.

В настоящее время наблюдается повышенный спрос на сварочные манипуляторы [7], что в том числе связано с дефицитом персонала. Коботы не подменяют промышленные манипуляторы [8], работающие полностью автономно, но обеспечивают предприятиям большую гибкость. Появляются все новые разновидности коботов, включая устанавливаемые на мобильную робототехническую платформу.

Мобильные манипуляторы (MoMas) [9] — мобильные робототехнические системы, предназначенные для функционирования в различных отраслях, таких как логистика, автомобильная и аэрокосмическая отрасли. Мобильные платформы с манипулятором способны проводить мониторинг промышленных предприятий [10], оценивать состояние оборудования и выполнять техническое обслуживание объектов.

На мировом рынке манипуляторы, устанавливаемые на мобильные платформы и способные поднимать сравнительно небольшие грузы (до 7 кг), представлены в основном образцами из Китая. Свои разработки имеют мировые лидеры KUKA и FANUC, а также российские и белорусские компании.

Сравнение коботов. Коботы сравнивают по таким параметрам, как масса полезной нагрузки [11], повторяемость [12], рабочая скорость и особенности кинематики отдельных осей [13]. Рассмотрим 6-осевые коботы различных производителей.

Кобот PULSE 90 белорусской компании Rozum Robotics (рис. 1), по данным компании,

подходит для автоматизации любых повторяющихся операций. Его применяют на производстве, в сфере услуг и развлечений, в лабораториях и университетах.

Отличительная особенность модели заключается в возможности установки практически на любую поверхность и в любой плоскости: на потолке и стене, над столом и как часть мобильной установки. У кобота малая площадь основания, равная 120 мм.

Высокую точность белорусскому коботу гарантируют сервомоторы собственной разработки компании Rozum Robotics. Сервомоторы RDrive обеспечивают движение кобота с повторяемостью 0,01 мм. Рабочий радиус модели PULSE 90 достигает 900 мм. У робота шесть степеней свободы, что с точки зрения производителя обеспечивает простое и точное управление манипулятором при выполнении сложных и комплексных задач, хотя у всех рассматриваемых коботов такое же число степеней свободы.

Изделие позиционируется как кобот последнего поколения и при интеграции на производство не требует дополнительных ограждений.



Рис. 1. Внешний вид кобота PULSE 90 компании Rozum Robotics

Программный интерфейс робота позволяет реализовывать сложные алгоритмы на языках программирования Java и Python.

Робот *Magic E6* китайской компании *Dobot* (рис. 2) [14] широко применяется в системе образования для ознакомления учеников со спецификой использования автоматизированных систем на основе таких манипуляторов в сфере промышленного производства (фрезеровка, лазерная гравировка, аддитивные технологии и другие задачи).

Робот *Magician* китайской компании *Dobot* — образовательный манипулятор, поддерживающий подключение различных датчиков, а также управление с помощью *Raspberry-Pi* и *Arduino*. Робот способен осуществлять 3D-печать пластиком с точностью не менее 0,01 мм, перемещать объекты посредством захватов разного типа и выполнять их сборку, наносить изображения маркером и делать лазерную гравировку. У робота *Magician* простая конструкция, так как все его элементы можно соединить и разъединить без вспомогательных инструментов. Робот снабжен контроллером, способным подключать любые портативные электронные устройства и управлять ими с помощью совместимого программного обеспечения;

Робот *R800* немецкой компании *KUKA* (рис. 3) — представитель семейства *LBR iiwa* [15] — механизмов, разработанных для выполнения точных сборочных работ. Роботы семейства *LBR iiwa* стали первыми в мире серийно выпускаемыми роботами. С их помощью оператор и робот могут совместно работать над выполнением задач, повышая эффективность производства. Модель *R800* оснащена датчиками крутящего момента в шарнирах, способна быстро обнаруживать контакт с объектами и мгновенно снижать уровень усилия и скорость.

Робот *i5* китайской компании *AUBO Robotics* (рис. 4) [16] — представитель семейства *i* с широким диапазоном грузоподъемности (3...16 кг), благодаря чему роботов можно применять в различных отраслях и быстро адаптировать к индивидуальным потребностям. Это позволяет производству наиболее эффективно реализовать ферму роботов с одинаковым программным обеспечением, что упрощает их техническое обслуживание.

Роботы прошли сертификацию (PL = d, CAT 3), CE, UL, KCs и т. д., а также поддерживают обнаружение столкновений десяти уровней. Модель *i5* обладает невысокой повторя-



Рис. 2. Внешний вид робота *Magic E6* компании *Dobot*



Рис. 3. Внешний вид манипулятора *R800* компании *KUKA*

емостью ($\pm 0,05$ мм), но для некоторых производств такой точности более чем достаточно.

Робот снабжен программными инструментами SDK и API. Также он может устанавливать связь с несколькими периферийными устройствами, такими как терминал, визуальное и портативное оборудование. Робот обладает визуальным интерфейсом и позиционируется как простой, но это можно проверить только на реальном устройстве.

Программное обеспечение робота *i5* основано на управлении через облачную платформу, которая поддерживает удаленное обслуживание, диагностику неисправностей и обновление базового программного обеспечения.

Робот *RX-5* российской компании *Robotech* (рис. 5) — самая компактная и легкая модель семейства *RX*. Это многофункциональное обо-



Рис. 4. Внешний вид робота i5 компании AUBO Robotics



Рис. 5. Внешний вид манипулятора RX-5 компании Robotech

рудование подходит для разных видов работ и манипулирования грузом массой до 5 кг. Данная модель может применяться на небольшом производстве в качестве помощника при проведении погрузочно-разгрузочных работ и обработке материалов.

Так как у робота RX-5 не очень высокая точность (0,05 мм), его можно использовать там, где этот показатель не является важным: для изготовления и сборки деталей, склеивания, привинчивания, упаковки продукции или ее проверки.

Робот можно монтировать как в вертикальном положении, так и в любом другом. Программное обеспечение позволяет подготовить манипулятор к работе за один час. Компания Robotech предлагает пользователям собственное программное обеспечение для программирования робота.

Компания Robotech декларирует многоступенчатый контроль качества, сборки и испытания роботов на стенде, что гарантирует надеж-

ность каждого манипулятора. Благодаря собственной технологии отливки и разработке редукторов каждый робот имеет точность до 0,05 мм.

Робот CR6-DK-093S1-CS01 китайской компании EVZ (рис. 6) применяется для погрузочно-разгрузочных работ, укладки грузов на поддоны, для захвата и перемещения объектов, а также для дуговой сварки. Благодаря компактности он способен выполнять несколько операций в стесненных условиях, имеет малую массу, высокие показатели надежности и производительности.

Робот CR-4iA японской компании FANUC (рис. 7) — самая маленькая модель семейства CR. Благодаря компактности и набору датчиков он идеально подходит для совместной работы



Рис. 6. Внешний вид робота CR6-DK-093S1-CS01 компании EVZ



Рис. 7. Внешний вид робота CR-4iA компании Robotech

Техническая характеристика коботов

Параметр	CR-4iA	CR6-DK-093S1-CS01	RX-5	R800	Magic E6	PULSE 90	i5
Грузоподъемность, кг	4,0	6,0	5,0	7,0	0,5	4,0	5,0
Рабочий радиус, мм	550,0	917,0	913,0	800,0	450,0	900,0	886,5
Повторяемость, мм	±0,01	±0,03	-0,05	±0,10	±0,10	±0,10	±0,05
Масса, кг	48,0	22,0	35,0	23,9	7,2	13,6	24,0
Рабочая скорость, м/с	–	2,0	–	–	0,5	–	2,8
Углы по осям, град:							
J1	340	±360	±170	±170	±360	–	±175
J2	150	±360	-90, +125	±120	±135	–	±175
J3	354	±165	-150, +90	±170	±154	–	±175
J4	380	±360	±210	±120	±160	–	±175
J5	200	±360	±125	±170	±173	–	±175
J6	720	±360	±360	±120	±360	–	±360
J7	–	–	–	±175	–	–	–
Скорость поворота по осям, град/с:							
J1	500	180	360	98	120	–	150
J2	500	180	300	98	120	–	150
J3	500	180	330	100	120	–	150
J4	500	180	500	130	120	–	180
J5	500	180	500	140	120	–	180
J6	500	180	800	180	120	–	180
J7	–	–	–	180	–	–	–
Мотор	–	–	–	–	DC48V	–	DC48V
Мощность, Вт	500	–	–	–	130	–	200

с человеком в стесненных условиях. Кобот имеет возможность монтажа на стену и потолок, предлагая более широкий диапазон движений, не мешая рабочему месту оператора.

Встроенная интеллектуальная сенсорная технология мгновенно останавливает кобот при контакте с человеком или статичным объектом. Это подтверждено сертификатом безопасности TUV ISO 10218-1:2011, категория 3, PL = d.

В зависимости от сферы применения кобот можно оснастить датчиками изображения собственной разработки компании FANUC — Vision Sensor или 3D Area Sensor, которые помогут распознавать изделия и определять их форму.

Из таблицы следует, что самым тяжелым (48 кг), точным (0,01 мм) и быстрым (500 град/с) является кобот CR-4iA. Однако гораздо более легкий манипулятор CR6-DK-093S1-CS01 (22 кг) имеет точность 0,03 мм, чего также достаточно для выполнения большей

части работ. Также видна зависимость ограничения углов работы от кинематики каждого кобота. Как оказалось, нет стандартов обозначения углов, и компания FANUC обозначает абсолютный угол, а остальные производители указывают диапазон изменения угла.

Интересным решением является кинематика компании EVZ, так как узлы имеют возможность вращаться несколько оборотов. В дальнейшем будут исследованы эти возможности коботов.

На основании изложенного можно классифицировать коботы следующим образом:

- по повторяемости — до 0,5 и более 0,5 мм;
- по кинематике — по количеству звеньев с полным оборотом;
- по скорости поворота — до 300 и более 300 град/с;
- по массе полезной нагрузки — до 1, до 5 и более 5 кг;
- по массе кобота — до 10, до 25 и более 25 кг.

Выводы

1. Дан обзор коботов массой до 7 кг, по результатам которого предложена их классификация по различным параметрам.

2. Показано, что коботы имеют большой спрос на рынке, а задача по синтезу и производству конкурентно способных моделей является актуальной.

Литература

- [1] Javid M., Haleem A., Singh R.P. et al. Significant applications of Cobots in the field of manufacturing. *Cogn. Robot.*, 2022, vol. 2, pp. 222–233, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>
- [2] Weiss A., Wortmeier A.K., Kubicek B. Cobots in industry 4.0: a roadmap for future practice studies on human-robot collaboration. *IEEE Trans. Hum. Mach. Syst.*, 2021, vol. 51, no. 4, pp. 335–345, doi: <https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3092684>
- [3] Mörtl A., Lawitzky M., Kucukyilmaz A. et al. The role of roles: physical cooperation between humans and robots. *Int. J. Robot Res.*, 2012, vol. 31, no. 13, pp. 1656–1674, doi: <https://doi.org/10.1177/0278364912455366>
- [4] Phan T.P., Chao P.C.-P., Cai J.J. et al. A novel 6-DOF force/torque sensor for COBOTs and its calibration method. *IEEE ICASI*, 2018, pp. 1228–1231, doi: <https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394511>
- [5] Alenjareghi M.J., Keivanpour S., Chinniah Y.A. et al. Computer vision-enabled real-time job hazard analysis for safe human–robot collaboration in disassembly tasks. *J. Intell. Manuf.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02519-8>
- [6] Staretu I. Robotic arms with anthropomorphic grippers for robotic technological processes. *Proceedings*, 2020, vol. 63, no. 1, art. 77, doi: <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063077>
- [7] Gasparetto A., Scalera L. A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in Historical Studies*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 24–35, doi: <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002>
- [8] Lee D., Seo T.W., Kim J. Optimal design and workspace analysis of a mobile welding robot with a 3P3R serial manipulator. *Rob. Auton. Syst.*, 2011, vol. 59, no. 10, pp. 813–826, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.06.004>
- [9] Mason M.T., Pai D.K., Rus D. et al. A mobile manipulator. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1999, vol. 3, pp. 2322–2327, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770452>
- [10] Marques L., Martins A., de Almeida A.T. Environmental monitoring with mobile robots. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 3624–3629, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545133>
- [11] Crane III C.D., Duffy J. A dynamic analysis of a spatial manipulator to determine payload weight. *J. Robot. Syst.*, 2003, vol. 20, no. 7, pp. 355–371, doi: <https://doi.org/10.1002/rob.10091>
- [12] Shiakolas P.S., Conrad K.L., Yih T.C. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. *Int. J. Model. Simul.*, 2002, vol. 22, no. 4, pp. 245–254, doi: <https://doi.org/10.1080/02286203.2002.11442246>
- [13] Wang K., Lien T.K. Structure design and kinematics of a robot manipulator. *Robotica*, 1988, vol. 6, no. 4, pp. 299–309, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574700004665>
- [14] Sanjuan J., Rahman M., Rulik I. Forward kinematic analysis of Dobot using closed-loop method. *IJRA*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 153–159, doi: <http://doi.org/10.11591/ijra.v9i3.pp153-159>
- [15] Pichkalev M., Lavrenov R., Safin R. et al. Face drawing by KUKA 6 axis robot manipulator. *DeSE*, 2019, pp. 709–714, doi: <https://doi.org/10.1109/DeSE.2019.00132>
- [16] Wei B., Shu S.H., Zhang Y. et al. Kinematics analysis and trajectory planning simulation of manipulator based on AUBO-I5. *IEEE ICDSBA*, 2020, pp. 72–75, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDSBA51020.2020.00025>

References

- [1] Javaid M., Haleem A., Singh R.P. et al. Significant applications of Cobots in the field of manufacturing. *Cogn. Robot.*, 2022, vol. 2, pp. 222–233, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>
- [2] Weiss A., Wortmeier A.K., Kubicek B. Cobots in industry 4.0: a roadmap for future practice studies on human-robot collaboration. *IEEE Trans. Hum. Mach. Syst.*, 2021, vol. 51, no. 4, pp. 335–345, doi: <https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3092684>
- [3] Mörtl A., Lawitzky M., Kucukyilmaz A. et al. The role of roles: physical cooperation between humans and robots. *Int. J. Robot Res.*, 2012, vol. 31, no. 13, pp. 1656–1674, doi: <https://doi.org/10.1177/0278364912455366>
- [4] Phan T.P., Chao P.C.-P., Cai J.J. et al. A novel 6-DOF force/torque sensor for COBOTs and its calibration method. *IEEE ICASI*, 2018, pp. 1228–1231, doi: <https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394511>
- [5] Alenjareghi M.J., Keivanpour S., Chinniah Y.A. et al. Computer vision-enabled real-time job hazard analysis for safe human–robot collaboration in disassembly tasks. *J. Intell. Manuf.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02519-8>
- [6] Staretu I. Robotic arms with anthropomorphic grippers for robotic technological processes. *Proceedings*, 2020, vol. 63, no. 1, art. 77, doi: <https://doi.org/10.3390/proceedings2020063077>
- [7] Gasparetto A., Scalera L. A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in Historical Studies*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 24–35, doi: <https://doi.org/10.4236/ahs.2019.81002>
- [8] Lee D., Seo T.W., Kim J. Optimal design and workspace analysis of a mobile welding robot with a 3P3R serial manipulator. *Rob. Auton. Syst.*, 2011, vol. 59, no. 10, pp. 813–826, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.06.004>
- [9] Mason M.T., Pai D.K., Rus D. et al. A mobile manipulator. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1999, vol. 3, pp. 2322–2327, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770452>
- [10] Marques L., Martins A., de Almeida A.T. Environmental monitoring with mobile robots. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 3624–3629, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545133>
- [11] Crane III C.D., Duffy J. A dynamic analysis of a spatial manipulator to determine payload weight. *J. Robot. Syst.*, 2003, vol. 20, no. 7, pp. 355–371, doi: <https://doi.org/10.1002/rob.10091>
- [12] Shiakolas P.S., Conrad K.L., Yih T.C. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. *Int. J. Model. Simul.*, 2002, vol. 22, no. 4, pp. 245–254, doi: <https://doi.org/10.1080/02286203.2002.11442246>
- [13] Wang K., Lien T.K. Structure design and kinematics of a robot manipulator. *Robotica*, 1988, vol. 6, no. 4, pp. 299–309, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574700004665>
- [14] Sanjuan J., Rahman M., Rulik I. Forward kinematic analysis of Dobot using closed-loop method. *IJRA*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 153–159, doi: <http://doi.org/10.11591/ijra.v9i3.pp153-159>
- [15] Pichkalev M., Lavrenov R., Safin R. et al. Face drawing by KUKA 6 axis robot manipulator. *DeSE*, 2019, pp. 709–714, doi: <https://doi.org/10.1109/DeSE.2019.00132>
- [16] Wei B., Shu S.H., Zhang Y. et al. Kinematics analysis and trajectory planning simulation of manipulator based on AUBO-I5. *IEEE ICDSBA*, 2020, pp. 72–75, doi: <https://doi.org/10.1109/ICDSBA51020.2020.00025>

Статья поступила в редакцию 13.12.2024

Информация об авторах

РОГАЧЕВ Антон Александрович — ведущий инженер лаборатории робототехники НИИ механики. МГУ имени М.В. Ломоносова (119192, Москва, Российская Федерация, Мичуринский пр., д. 1, e-mail: arogachev@imec.msu.ru).

КЛИМОВ Константин Владимирович — ведущий инженер лаборатории робототехники НИИ механики. МГУ имени М.В. Ломоносова (119192, Москва, Российская Федерация, Мичуринский пр., д. 1, e-mail: kklimov@imec.msu.ru).

ЩЕРБОВ Роман Михайлович — ведущий инженер лаборатории робототехники НИИ механики. МГУ имени М.В. Ломоносова (119192, Москва, Российская Федерация, Мичуринский пр., д. 1, e-mail: romanscherbov@gmail.com).

РОМАНОВ Андрей Александрович — кандидат технических наук, младший научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рогачев А.А., Климов К.В., Щербов Р.М., Романов А.А. Обзор манипуляторов грузоподъемностью до семи килограммов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 3–10.

Please cite this article in English as:

Rogachev A.A., Klimov K.V., Scherbov R.M., Romanov A.A. Review of manipulator devices with a lifting capacity of up to seven kilograms. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 9, pp. 3–10.

Information about the authors

ROGACHEV Anton Alexandrovich — Leading Engineer, Laboratory of Robotics, Scientific and Research Institute of Mechanics. Lomonosov Moscow State University (119192, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy Ave., Bldg. 1, e-mail: arogachev@imec.msu.ru).

KLIMOV Konstantin Vladimirovich — Leading Engineer, Laboratory of Robotics, Scientific and Research Institute of Mechanics. Lomonosov Moscow State University (119192, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy Ave., Bldg. 1, e-mail: kklimov@imec.msu.ru).

SCHERBOV Roman Mikhailovich — Leading Engineer, Laboratory of Robotics, Scientific and Research Institute of Mechanics. Lomonosov Moscow State University (119192, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy Ave., Bldg. 1, e-mail: romanscherbov@gmail.com).

ROMANOV Andrey Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).