

УДК 004.89, 004.93, 004.94

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИЗУАЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ЗАДАЧЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МОБИЛЬНЫМ РТК

**А.А. Бурлак**

*МИРЭА - Российский технологический университет*  
Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78  
E-mail: greenbormot@gmail.com

**А.С. Алымова**

*МИРЭА - Российский технологический университет*  
Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78  
E-mail: alena.alyмова.02@mail.ru

**А.Д. Воронков**

*МИРЭА - Российский технологический университет*  
Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78  
E-mail: a.voronkov.rtu@yandex.ru

**Ключевые слова:** системы технического зрения, мобильные РТК, распознавание жестов, визуальная детекция, захват объектов, жестовый интерфейс.

**Аннотация:** В работе анализируются существующие тенденции постоянного усложнения и совершенствования систем технического зрения в составе мобильных робототехнических комплексов. Предлагается архитектура программно-алгоритмического обеспечения, нацеленного на решение задач обработки визуальной информации и управления мобильным робототехническим комплексом в задаче обнаружения, захвата и переноса типовых объектов. Описаны результаты проведенных в виртуальной среде экспериментов по проверке работоспособности предложенного подхода. Обсуждаются перспективы применения предложенного способа управления роботом в сферах складской логистики, строительства и сельского хозяйства.

## 1. Введение

История применения мобильных робототехнических комплексов (МРТК) в сферах складской логистики, строительства и сельского хозяйства началась с развития робототехники и автоматизации производственных процессов. Системы автоматизации и разработки в сфере робототехники стали применяться для оптимизации работы и увеличения эффективности в различных отраслях [1]: в складской логистике для перемещения и сортировки товаров, уборки, упаковки и доставки грузов, инвентаризации; в строительстве для автоматического выполнения строительных работ, таких как перемещение материалов на строительной площадке, выполнение монотонных и опасных операций, а также для мониторинга и контроля качества работ; наконец, в сельском хозяйстве для автоматизации процессов посева, уборки урожая, обработки почвы и мониторинга состояния полей и растений [2]. Это помогает увеличить производительность сельскохозяйственного производства и улучшить качество урожая.

Современные тенденции применения МРТК в этих сферах включают разработку более умных и автономных роботов, использование искусственного интеллекта для оптимизации работы и принятия решений, а также внедрение технологий связи, таких как Интернет вещей (IoT) и облачных вычислений для управления и мониторинга роботов. Кроме того, наблюдается развитие специализированных решений для конкретных задач в каждой из описанных отраслей.

## 2. Анализ предметной области

Для формирования сенсорной подсистемы и восприятия окружающей среды МРТК оснащаются различными датчиками, такими как RGB- и RGBD-камеры, радары, лазерные и ультразвуковые дальномеры. Широкое применение RGBD-камер обусловлено полнотой и качеством получаемой с них информации, что делает возможным в режиме реального времени производить построение частичного облака точек сцены. Полученное таким образом облако точек затем может быть подвергнуто анализу с целью извлечения данных о типовых объектах или планирования захвата [3].

Одной из ключевых задач компьютерного зрения является детекция объектов на изображении. Данная задача может быть решена как классическими методами, так и с помощью сверточных нейронных сетей. Нейросетевые модели обладают лучшими обобщающими способностями и выделяют наборы карт признаков и, анализируя данные признаки, выдают результат. Детекция объектов важна с точки зрения предварительного выделения областей интереса, которые затем анализируются другими алгоритмами.

Одним из перспективных направлений в сфере управления РТК является управление жестами. Так, в [4] рассматривается разработка системы жестового управления манипуляционным роботом, где с помощью набора жестов, распознанных с помощью камеры структурированного света, выполняется управление РТК.

## 3. Постановка задачи

Решаемая практическая задача заключается в разработке системы жестового управления МРТК KUKA youBot, позволяющей осуществлять захват типовых объектов на основе RGBD-изображения. В рассматриваемой задаче автономный робот должен определять положение типовых объектов по видеопотоку с бортовой камеры и выполнять команды на основе множества возможных жестов  $\{G\}$ .

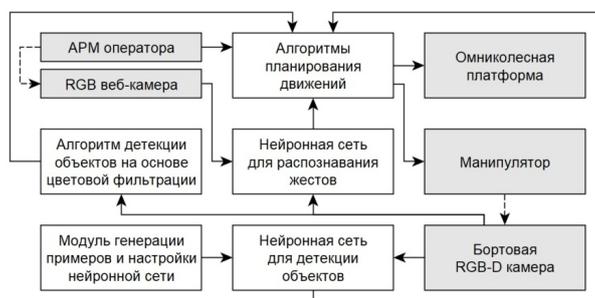


Рис. 1. Структура алгоритмического обеспечения.

Общая структура алгоритмического обеспечения представлена на рис. 1. Визуальная обратная связь представлена детектирующей нейронной сетью, цветовой фильтрацией и жестовым интерфейсом, на основе которых управляется робот.

## 4. Система поиска и захвата типового объекта

Исследуемая виртуальная модель МРТК KUKA youBot была оснащена RGBD-камерой, закрепленной на конечном звене манипулятора, с вертикальным и горизонтальным углами обзора, равными  $60^\circ$ , и разрешением  $256 \times 256$  пикселей. Для моделирования использовался программный пакет CoppeliaSim.

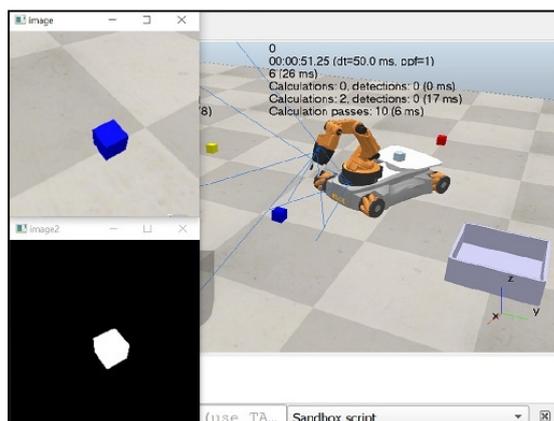


Рис. 2. Сегментация типового объекта на основе данных с бортовой камеры.

Для определения положения типовых объектов использовалась одна из новейших сверточных нейронных сетей семейства YOLO [5] с архитектурой YOLOv8. Для обучения детектирующей нейронной сети была сформирована обучающая выборка, содержащая аннотированные RGBD-изображения сцены со случайно расположенными типовыми объектами.

Однако ограничивающая рамка объекта, полученная в результате детекции, содержит не только пиксели целевого объекта, но и пиксели окружающей среды. Поэтому для сегментации объекта также использовался фильтр для цветовой модели HSV (рис. 2).

Мобильная платформа робота KUKA youBot оснащена 4 всенаправленными колесами, позволяющими ей перемещаться вперед, назад, вбок, по диагонали и поворачиваться вокруг своей оси. Скорость центральной точки платформы можно разложить на 3 составляющие: проекции линейной скорости  $v_x$  и  $v_y$  и угловая скорость  $\omega$ .

Окончательное управление, связывающее скорость вращения колес со скоростью перемещения платформы:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -1 & 1 & a+b \\ 1 & 1 & -a-b \\ -1 & 1 & -a-b \\ 1 & 1 & a+b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}.$$

Для робота Kuka youBot размеры платформы имеют следующее значение:  $a=0.15$  м,  $b=0.235$  м,  $R=0.05$  м.

Манипулятор KUKA youBot имеет пять степеней подвижности. Использованное решение обратной кинематической задачи для данного манипулятора имеет вид:

$$Q_1=0,$$

$$Q_2 = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{h}{r}\right) - \left(\frac{l_2^2 + R^2 - l_3^2}{2l_2R}\right),$$

$$Q_3 = \pi - \left(\frac{l_2^2 - R^2 + l_3^2}{2l_2l_3}\right),$$

$$Q_4 = \pi - Q_2 - Q_3,$$

$$Q_5 = (-a_k + a),$$

где длины звеньев манипулятора KUKA youBot имеют следующие значения:  $l_2=0.155$  м,  $l_3=0.135$  м,  $l_4=0.218$  м,  $h$  – высота цели относительно основания манипулятора,  $r$  – расстояние между основанием манипулятора и целью,  $a_k$  – угол поворота типового объекта,  $a$  – угол направления на цель,  $R$  – расстояние между основанием манипулятора и 4 осью.

Для поиска типовых объектов робот вращается на месте до тех пор, пока не обнаружит сегмент с объектом. Для точного направления на цель вычисляются моменты изображения: момент  $m00$  — количество всех пикселей, входящих в бинарную маску, момент  $m10$  – сумма координат точек бинарной маски по оси  $OX$ , момент  $m01$  – сумма координат точек бинарной маски по оси  $OY$ . Тогда соотношение  $m10/m00$  даст значение координату  $X$  центра объекта на изображении, при условии, что он единственный. Робот достигает нужного положения в момент, когда эта координата будет совпадать с центром кадра с камеры.

После поворота робот начинает движение к цели. Цель считается достигнутой, когда ее площадь на бинарном изображении будет больше определенного значения. В процессе движения робота объект может пропасть из зоны видимости камеры, и для предотвращения данного события во время движения постоянно вычисляются координаты объекта на изображении. Если они выходят из определенной допустимой области вокруг центра кадра, то робот поворачивается или наклоняет манипулятор, возвращая объект в центр изображения.

После обнаружения объекта производится изменение конфигурации манипулятора в необходимое для захвата положение и осуществляется захват объекта.

## 5. Управление манипуляционным роботом на основе распознавания жестов

Для реализации жестового интерфейса была использована библиотека MediaPipe. В данной библиотеке для распознавания жестов используется набор из нескольких нейросетевых моделей, работающих совместно: модели, детектирующей ладонь и модели, извлекающей 21 ключевую точку кисти (рис. 3). Для построения 2D-ограничивающей рамки использовались граничные ключевые точки.

Распознавание жестов производилось с помощью нейронной сети, обученной на сервисе Teachable Machine. Для этого модель сети с последовательной архитектурой была обучена на выборке, где каждому жесту соответствовало 500 элементов обучающей выборки. Полученная таким образом модель распознавала набор из 6 жестов:

- $A$  – захват объекта красного цвета;
- $B$  – захват объекта синего цвета;
- $C$  – захват объекта желтого цвета;
- $G$  – поднятие объекта;
- $Ge$  – перемещение к контейнеру;
- $L$  – опускание объекта в контейнер.

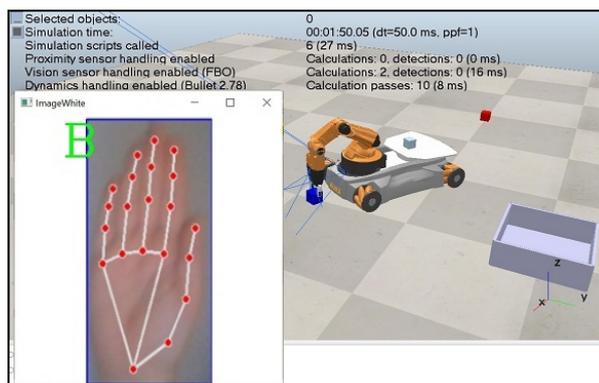


Рис. 3. Распознавание жестов на основе данных с веб-камеры.

## 6. Заключение

Таким образом, в работе исследовалось управление МРТК KUKA youBot в задаче захвата и переноса типовых объектов на основе визуальной обратной связи с помощью бортовой камеры и веб-камеры оператора. Были реализованы алгоритмы управления роботом KUKA youBot для поиска типовых объектов в рабочей зоне, восприятия и выполнения команд оператора с помощью жестового интерфейса. Дальнейшая работа может быть направлена на повышение степени автономности МРТК путем улучшения обобщающих способностей системы восприятия и разработки комплексной системы управления.

## Список литературы

1. Табылов А.О., Суйеуова Н.Б., Юсупов Н.Б. Роботизация современных складских логистических комплексов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2021. № 4(119). С. 58-66;
2. Bayati M., Fotouhi R. A Mobile Robotic Platform for Crop Monitoring // Advances in Robotics & Automation. 2018. Vol. 7, No. 1. 7 p.
3. Lei Q., Meijer J., Wisse M. A survey of unknown object grasping and our fast grasping algorithm-C shape grasping // 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Nagoya, Japan, 2017. P. 150-157.
4. Нагапетян В.Э., Толмачев И.Л. Бесконтактное управление роботизированной рукой посредством жестов человека // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. 2014. № 2. С. 157-163.
5. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object // Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 779-788.