

# Синтез законов управления подвижными объектами с использованием компьютерного зрения

Уткин Алексей Васильевич

**Научный руководитель:**

профессор, кафедра компьютерных технологий  
и систем, д.ф. - м.н. Веремей Евгений Игоревич

**Рецензент:**

инженер, СПбГБУЗ «Медицинский информационно-  
аналитический центр», Арбузова Юлия Михайловна

Санкт-Петербург

2020

---

## Текст доклада

---

Тема моей выпускной квалификационной работы: «Синтез законов управления подвижными объектами с использованием компьютерного зрения».



Пример полной автоматизации



Пример частичной автоматизации

Схемы управления с визуальной обратной связью строятся с целью минимизации ошибки  $e$  между текущим значением вектора визуальных особенностей  $s$  и его желаемым значением  $\tilde{s}$ :  $e = s - \tilde{s}$ .

## Текст доклада

Текущий уровень развития технологий позволяет автоматизировать всё большее количество операций путем замены человека на робота. Автономный мобильный робот может выполнять большой спектр задач, связанных с логистикой. Его автономность обеспечивается набором датчиков, наибольший потенциал среди которых имеет видекамера. Существует множество подходов, позволяющих в той или иной мере раскрыть этот потенциал.

В работе используется подход на основе управления с визуальной обратной связью, который решает задачу обеспечения желаемого положения некоторого набора точек на изображении.

Схемы управления с визуальной обратной связью строятся с целью минимизации ошибки  $e$  между текущим значением вектора визуальных особенностей  $s$  и его желаемым значением  $\tilde{s}$ :  $e = s - \tilde{s}$ .

Немаловажным фактором, характеризующим современные задачи автоматического управления, является повышение требований к динамике управляемого движения подвижного объекта в различных режимах работы. В частности, нередко требуется обеспечение заданного поведения системы в случае наличия внешних возмущений различного характера.

## Цели работы:

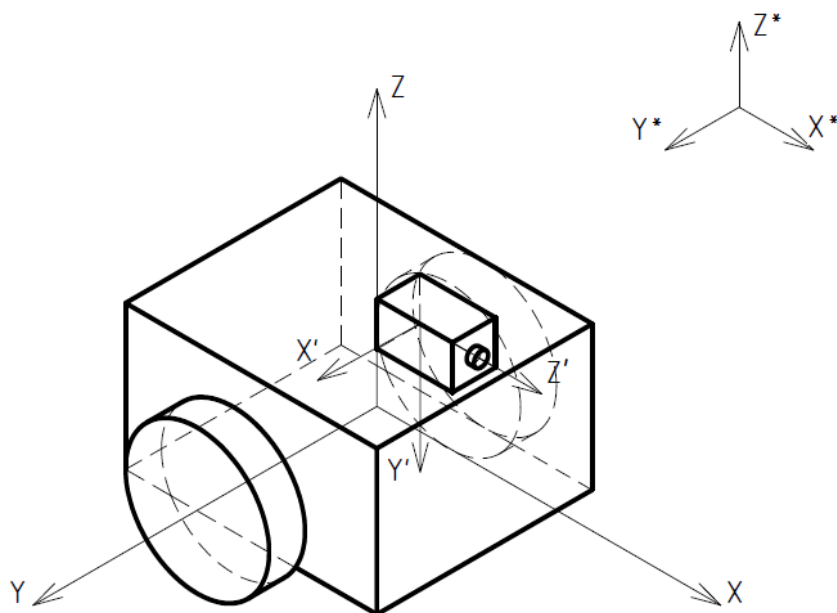
- получить закон управления, обеспечивающий позиционирование робота относительно некоторого объекта, находящегося в области видимости камеры,
- обеспечить ряд требований к динамике управляемого движения, в частности — устойчивость к влиянию внешнего постоянного возмущения,
- спроектировать и реализовать комплекс виртуальной реальности для анализа полученного закона.

---

## Текст доклада

---

Задача заключается в позиционировании робота относительно некоторого объекта, находящегося в области видимости камеры, на основе использования визуальной информации в контуре обратной связи. Также необходимо обеспечить ряд требований к динамике управляемого движения, в частности — устойчивость к влиянию внешнего постоянного возмущения. Для проверки синтезированных регуляторов необходимо спроектировать и реализовать комплекс виртуальной реальности.



---

## Текст доклада

---

Рассмотрим случай двухколесного робота с возможностью поворота на месте. Камеру на роботе данного типа логично расположить таким образом, чтобы ее оптическая ось была параллельна оси поступательной степени свободы робота.

Введем 3 системы координат так, как показано на слайде. Система координат робота вводится таким образом, чтобы вращение осуществлялось вокруг оси  $Z$ , а продольное перемещение — по оси  $X$ . Ось  $Y$  направим так, чтобы система координат была правой. Расположение системы координат камеры обусловлено тем, что в при обработке изображений принято начало координат располагать в левом верхнем углу изображения. Координаты в глобальной системе координат будем помечать звездой.

Математическая модель кинематики колесного робота при движении на плоскости описывается системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} \dot{x}^* = v \cos(\phi), \\ \dot{y}^* = v \sin(\phi), \\ \dot{\phi} = \omega, \end{cases}$$

$v$  — продольная скорость робота,

$\omega$  — угловая скорость робота,

$\phi$  — угол между скоростью робота и осью  $Ox^*$ .

---

## Текст доклада

---

Математическая модель кинематики колесного робота при движении на плоскости описывается системой уравнений, представленной на слайде. Здесь  $v$  обозначает продольную скорость робота,  $\omega$  — угловая скорость робота, а  $\phi$  — это угол между скоростью робота и осью  $Ox^*$ .

Для точки  $\mathbf{X}' = (X', Y', Z')$ , проецируемой на изображении в точку  $\mathbf{x}' = (x', y')$ , и робота со скоростью  $\mathbf{v} = (v_x, \omega_z)$  верно следующее:

$$\begin{cases} \dot{x}' = x'v_x/Z' + (1 + x'^2)\omega_z, \\ \dot{y}' = y'v_x/Z' + x'y'\omega_z. \end{cases}$$

Эта система может быть записана в векторном виде:

$$\dot{\mathbf{x}}' = \mathbf{L}_{\mathbf{x}} \mathbf{v},$$

где

$$\mathbf{L}_{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{x'}{Z'} & (1 + x'^2) \\ \frac{y'}{Z'} & x'y' \end{bmatrix}.$$

---

## Текст доклада

---

Для трехмерной точки  $\mathbf{X}'$ , проецируемой на изображении в двумерную точку  $\mathbf{x}'$ , и робота со скоростью  $\mathbf{v}$  справедлива представленная система.

Эта система может быть записана в векторном виде, где скорость точки на изображении связана со скоростью робота через матрицу взаимодействия  $\mathbf{L}_{\mathbf{x}}$ , вид которой представлен на слайде.

Приняв  $s = \mathbf{x}'$  и потребовав экспоненциальный закон уменьшения ошибки ( $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda \mathbf{e}$ ), получим искомый закон управления по скорости

$$\mathbf{v} = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{x}}^+ (\mathbf{x}' - \tilde{\mathbf{x}}'),$$

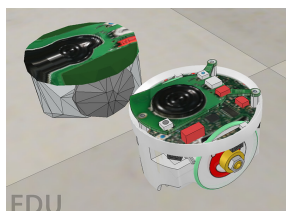
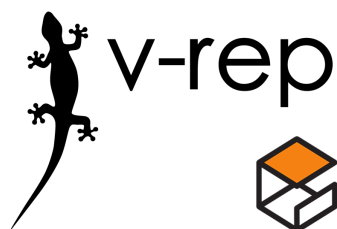
$\tilde{\mathbf{x}}'$  — вектор желаемых координат точки на изображении,  
 $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{x}}^+$  — аппроксимация псевдообратной матрицы к  $\mathbf{L}_{\mathbf{x}}$ .

---

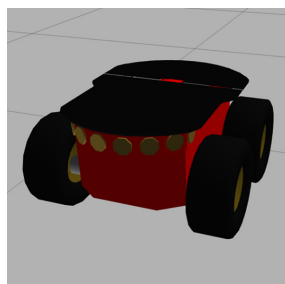
## Текст доклада

---

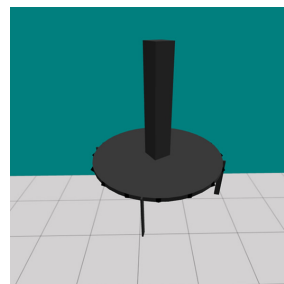
Примем в качестве вектора визуальных особенностей вектор координат особой точки и потребуем экспоненциальный закон уменьшения ошибки. Тогда получим искомый закон управления по скорости, в котором  $\tilde{\mathbf{x}}'$  — вектор желаемых координат точки на изображении, а  $\widehat{\mathbf{L}}_{\mathbf{x}}^+$  — аппроксимация псевдообратной матрицы к матрице  $\mathbf{L}_{\mathbf{x}}$ .



v-rep.



Gazebo.



ARGoS.

*Pitonakova L., Giuliani M., Pipe A., Winfield A., Feature and performance comparison of the V-REP, Gazebo and ARGoS robot simulators // Proc. of the 19th Towards Autonomous Robotic Systems Conf. Springer, 2018. Vol. 10965, P. 357–368.*

7

---

## Текст доклада

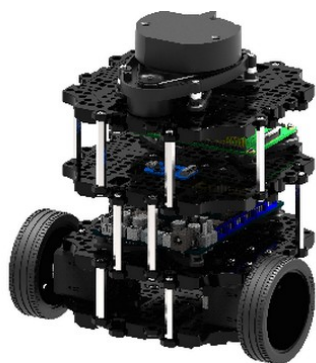
---

Как упоминалось ранее, ключевым моментом моделирования является необходимость смоделировать процесс получения изображения с камеры. Исходя из этого, проектирование моделирующего комплекса было начато с выбора среды 3D моделирования. В статье, название которой приведено на слайде, авторы проводят сравнение трех наиболее применяемых симуляторов с открытым исходным кодом: v-rep, Gazebo, ARGoS. На основе результатов тестирования, приведенных в статье, можно сделать вывод, что для поставленной задачи наиболее подходящим вариантом является Gazebo.

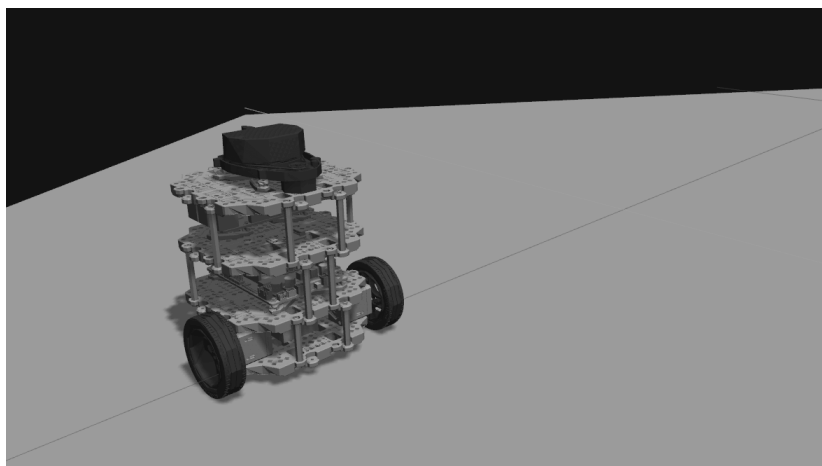
Для осуществления управления объектами в данной среде используется Robot Operating System (ROS). ROS обеспечивает стандартные службы операционной системы, например аппаратную абстракцию, низкоуровневый контроль устройств, передачу сообщений между процессами и так далее.



TurtleBot3 — компактный модульный программируемый мобильный робот. Модель для среды Gazebo имеет физические характеристики, соответствующие реальному роботу.



Фотография робота Turtlebot3.



Модель робота Turtlebot3.

---

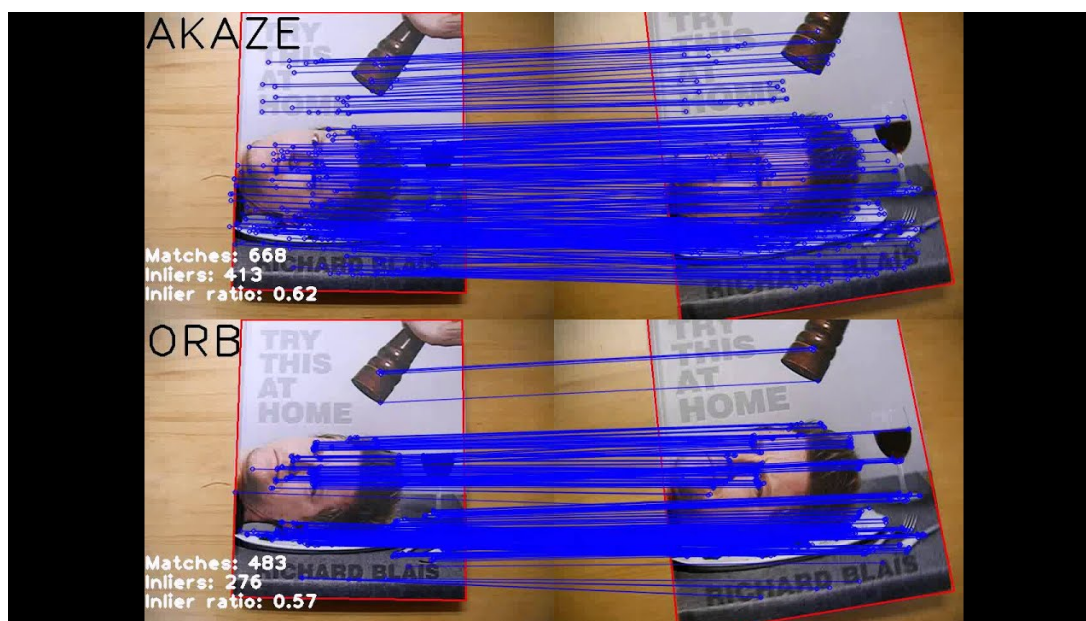
## Текст доклада

---

Учитывая поставленные ранее ограничения на число степеней свободы, в качестве объекта управления был выбран мобильный робот с открытым программным и аппаратным обеспечением Turtlebot3. Модель для среды Gazebo, доступная на официальном сайте производителя, имеет физические характеристики, соответствующие реальному роботу. На слайде можно видеть, что модель визуально соответствует оригиналу.

# Выбор метода извлечения ключевых точек

Для извлечения точек выбраны алгоритмы ORB и AKAZE.



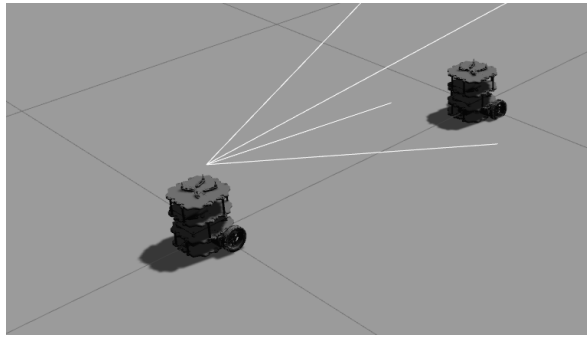
*Tareen S. A. K., Saleem Z., A comparative analysis of sift surf kaze akaze orb and brisk // 2018 Int. Conf. on Computing Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). 2018. P. 1–10.*

9

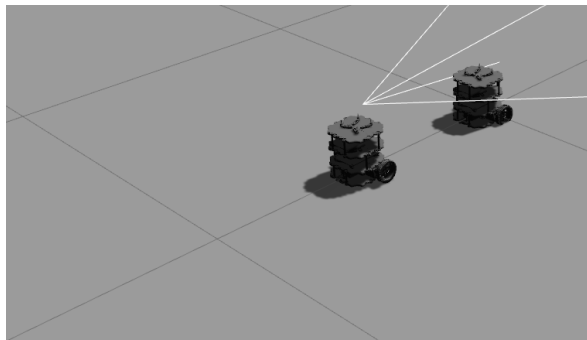
---

## Текст доклада

Для извлечения точек выбраны алгоритмы Oriented FAST and Rotated BRIEF (ORB) и Accelerated KAZE (AKAZE). В отличие от наиболее известных алгоритмов SIFT и SURF, они не защищены патентами, и, по результатам сравнений из статьи под авторством Тарин и Салим, имеют сопоставимую с ними точность и быстродействие. На слайде показано, как выбранные алгоритмы справляются с выделением и сравнением ключевых точек на двух изображениях одной и той же книги.



Состояние системы перед началом движения.



Желаемое состояние системы.

---

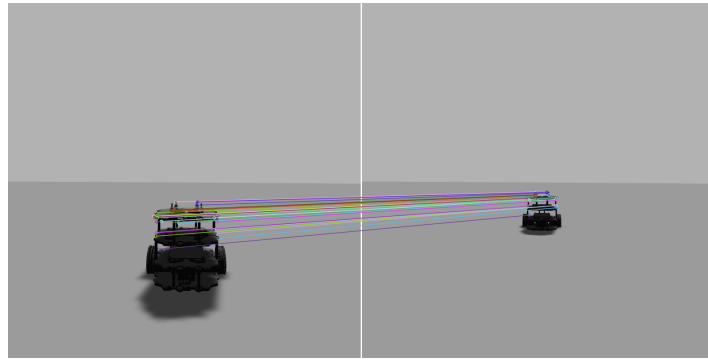
## Текст доклада

---

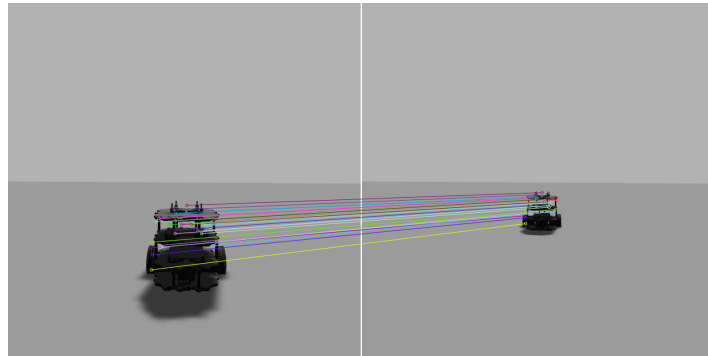
В качестве тестовой задачи рассмотрим позиционирование относительно другого неподвижного робота.

Воспользуемся методом, в котором глубина точки  $Z'$  не измеряется в каждый момент времени, а является константой и полагается равной расстоянию до объекта в желаемом положении.

Стартовое расстояние до объекта составляет 1 метр, желаемое — 0.5 метра. Потребуем также, чтобы ошибка позиционирования не превышала 5 сантиметров.



ORB.



AKAZE.

Изображения с камеры в стартовом и желаемом положениях.

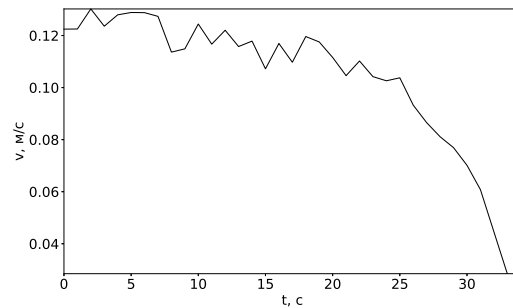
11

---

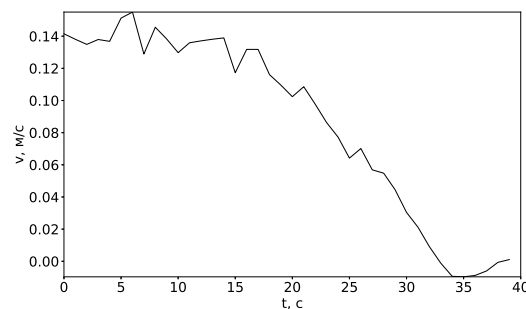
## Текст доклада

---

На слайде представлен результат выделения ключевых точек выбранными алгормами. Показаны только 30 точек с наилучшим совпадением дескрипторов. Также на этапе выделения точек используется алгоритм RANSAC для отсеивания выбросов.



ORB.



AKAZE.

Графики скоростей в ходе выполнения тестовой задачи.

---

## Текст доклада

---

На слайде приведены графики скоростей, вычисляемых алгоритмом управления. Система, использующая алгоритм ORB, справилась с задачей быстрее. Стоит также отметить тот факт, что при использовании алгоритма AKAZE робот проезжает желаемое положение и ему приходится возвращаться. Однако позиционирование происходит точнее. Несмотря на это, система управления успешно решает поставленную задачу в обоих случаях.

Динамику робота в общем случае можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{A}\mathbf{v} + \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_e, \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v},\end{aligned}$$

где

$\boldsymbol{\eta} = (x, y, \phi)$  — вектор кинематических параметров робота,

$\mathbf{A}$  — диагональная матрица коэффициентов трения,

$\boldsymbol{\tau}$  — вектор управляющих воздействий,

$\mathbf{B}$  — матрица коэффициентов при управляющих воздействиях,

$\boldsymbol{\tau}_e$  — вектор внешних возмущений.

Матрица поворота для рассматриваемого случая имеет вид

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

---

## Текст доклада

---

Перейдем к задаче учета динамики управляемого объекта. Динамику робота в общем случае можно описать следующей системой уравнений, где вектор  $\boldsymbol{\eta}$  — это вектор кинематических параметров робота, матрица  $\mathbf{A}$  — диагональная матрица коэффициентов трения, вектор  $\boldsymbol{\tau}$  — вектор управляющих воздействий, матрица  $\mathbf{B}$  — матрица коэффициентов при управляющих воздействиях, а вектор  $\boldsymbol{\tau}_e$  — вектор внешних возмущений.

Многоцелевая структура управления будет иметь вид

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}}_{\mathbf{v}} &= \mathbf{A}\mathbf{z}_{\mathbf{v}} + \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\eta})\mathbf{K}_1(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_{\boldsymbol{\eta}}), \\ \dot{\mathbf{z}}_{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{z}_{\mathbf{v}} + \mathbf{K}_2(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_{\boldsymbol{\eta}}), \\ \dot{\mathbf{z}}_{\mathbf{e}} &= \mathbf{L}\mathbf{z}_{\mathbf{v}} + \mathbf{H}_{\mathbf{e}}(\mathbf{e} - \mathbf{z}_{\mathbf{e}}), \\ \dot{\mathbf{p}} &= \boldsymbol{\alpha}\mathbf{p} + \boldsymbol{\beta}_{\boldsymbol{\eta}}(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_{\boldsymbol{\eta}}) + \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{e}}(\mathbf{e} - \mathbf{z}_{\mathbf{e}}), \\ \dot{\boldsymbol{\zeta}} &= \boldsymbol{\gamma}\mathbf{p} + \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\eta}}(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_{\boldsymbol{\eta}}) + \boldsymbol{\mu}_{\mathbf{e}}(\mathbf{e} - \mathbf{z}_{\mathbf{e}}), \\ \boldsymbol{\tau} &= -\mathbf{K}_{\mathbf{e}}\mathbf{z}_{\mathbf{e}} - \mathbf{K}_{\mathbf{v}}\mathbf{z}_{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\zeta}.\end{aligned}$$

В состав системы входят следующие регулируемые параметры:

- матрицы  $\mathbf{K}_{\mathbf{v}}$  и  $\mathbf{K}_{\mathbf{e}}$  базового закона управления,
- матрицы  $\mathbf{K}_1$ ,  $\mathbf{K}_2$  и  $\mathbf{H}_{\mathbf{e}}$  асимптотического наблюдателя,
- матрицы  $\boldsymbol{\alpha}$ ,  $\boldsymbol{\beta}_{\boldsymbol{\eta}}$ ,  $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{e}}$ ,  $\boldsymbol{\gamma}$ ,  $\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\eta}}$ ,  $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{e}}$  динамического корректора.

---

## Текст доклада

---

Введем многоцелевую структуру управления следующего вида. В ее состав входит ряд регулируемых матричных параметров. Первые три уравнения характеризуют асимптотический наблюдатель, который используется для оценки компонентов, недоступных для прямого измерения. Наблюдатель позволяет ввести в систему динамический корректор, описываемый четвертым и пятым уравнением. Динамический корректор определяет реакцию системы управления на внешние возмущения. В зависимости от поставленной задачи он позволяет либо минимизировать влияние возмущения на динамику системы (в данной работе используется этот вариант), либо минимизировать управляющие воздействия, например, в целях экономии топлива или ресурса актуаторов. В случае необходимости корректор может быть выключен в процессе движения.

Стабильность замкнутой системы обеспечивается при

- $\mathbf{K}_e = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{L}^T$ ,
- любом таком  $\mathbf{K}_v$ , при котором для матрицы  $\mathbf{A} - \mathbf{BK}_v$  выполняется условие устойчивости Гурвица.

Глобальная асимптотическая устойчивость нулевого положения равновесия  $(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_\eta) = 0$ ,  $(\mathbf{e} - \mathbf{z}_e) = 0$  гарантируется, если

- $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  — диагональные и положительно определенные,
- $\mathbf{H}_e$  — положительно определенная.

---

## Текст доклада

---

Рассмотрим вопрос выбора матриц базового закона управления и асимптотического наблюдателя. Если задать  $\mathbf{K}_e = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{L}^T$ , то стабильность замкнутой системы обеспечивается при любом таком  $\mathbf{K}_v$ , при котором для матрицы  $\mathbf{A} - \mathbf{BK}_v$  выполняется условие устойчивости Гурвица.

Глобальная асимптотическая устойчивость нулевого положения равновесия  $(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_\eta) = 0$ ,  $(\mathbf{e} - \mathbf{z}_e) = 0$  гарантируется, если матрицы  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  — диагональные и положительно определенные. Матрица  $\mathbf{H}_e$  также должна быть положительно определенной.



Перепишем динамический корректор в форме

$$\zeta = \mathbf{F}_1(s)(\boldsymbol{\eta} - \mathbf{z}_\eta) + \mathbf{F}_2(s)(\mathbf{e} - \mathbf{z}_e),$$

где

$$\mathbf{F}_1(s) = \gamma(\mathbf{E}s - \boldsymbol{\alpha})^{-1}\boldsymbol{\beta}_\eta + \boldsymbol{\mu}_\eta,$$

$$\mathbf{F}_2(s) = \gamma(\mathbf{E}s - \boldsymbol{\alpha})^{-1}\boldsymbol{\beta}_e + \boldsymbol{\mu}_e.$$

Для обеспечения астатизма системы управления передаточные матрицы должны удовлетворять следующим условиям:

$$\mathbf{F}_1(0) = -\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\eta}_0)\mathbf{K}_1,$$

$$\mathbf{F}_2(0) = -\mathbf{K}_e + \mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{K}_v\mathbf{T},$$

$$\mathbf{T} = -(\mathbf{L}_0^T\mathbf{L}_0)^{-1}\mathbf{L}_0^T\mathbf{H}_e.$$

---

## Текст доклада

---

Перепишем динамический корректор в представленной форме. Обозначив вектор  $\boldsymbol{\eta}$  и матрицу  $\mathbf{L}$  в желаемом положении через  $\boldsymbol{\eta}_0$  и  $\mathbf{L}_0$ , получим следующие формулы для матриц  $\mathbf{F}_1$  и  $\mathbf{F}_2$ .

Динамика движения робота описывается следующими матрицами:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0.2451 & 0 \\ 0 & -0.2368 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0.2350 & 0 \\ 0 & 0.2384 \end{pmatrix}.$$

Для моделирования внешнего постоянного возмущения к роботу приложен момент, соответствующий  $\tau_e = (-0.03, -0.12)$ .

Матрицы асимптотического наблюдателя зададим как

$$\mathbf{K}_1 = 10\mathbf{E}_{3 \times 3}, \quad \mathbf{K}_2 = 5\mathbf{E}_{3 \times 3}, \quad \mathbf{H}_e = 0.5\mathbf{E}_{k \times k}.$$

В силу необходимости получения достаточного количества данных для оценки качества процесса управления расстоянием до цели было увеличено на 1 и выбрана матрица

$$\mathbf{K}_v = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 8 \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты динамического корректора определим так:

$$\alpha = -\mathbf{E}_{2 \times 2}, \quad \gamma = \mathbf{E}_{2 \times 2}, \quad \mu_\eta = \mu_e = 0.$$

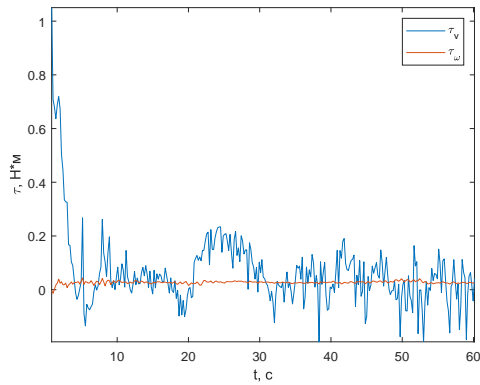
---

## Текст доклада

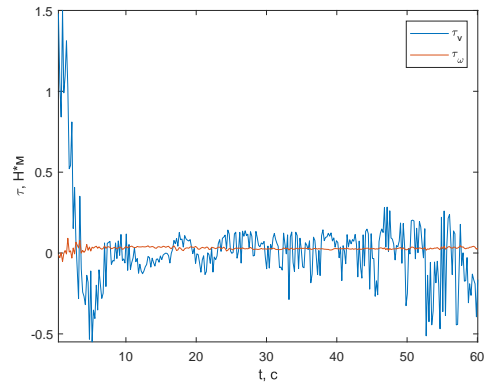
---

Перейдем к моделированию полученного регулятора. На слайде представлены характеристики виртуальной модели робота и выбранные численные значения настраиваемых параметров регулятора.

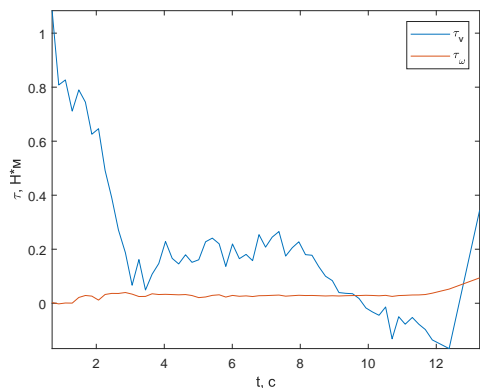
В конце презентации находится слайд со ссылками на видеозаписи экспериментов.



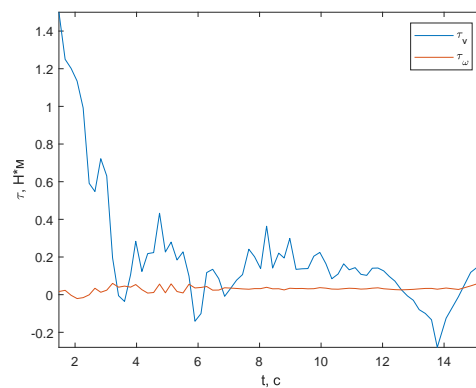
ORB без корректора.



AKAZE без корректора.



ORB с корректором.

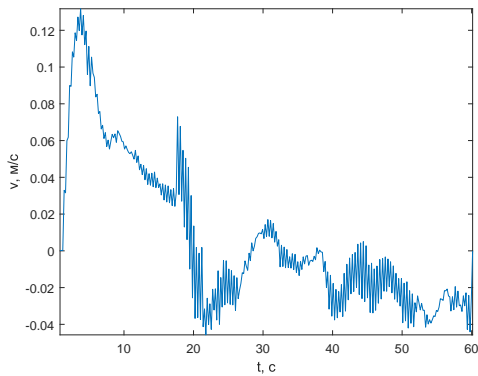


AKAZE с корректором.

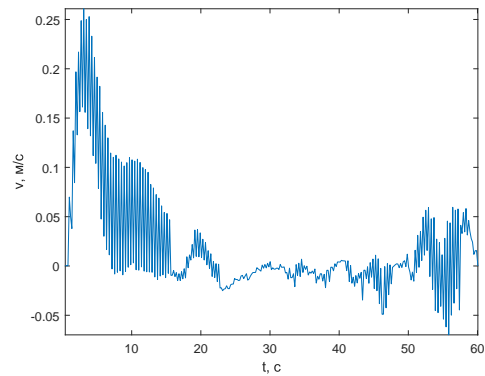
## Текст доклада

Внешнее возмущение заставляет систему без корректора изменять моменты приводов с большой частотой, что может привести к быстрому износу двигателя. Робот под управлением системы с корректором и алгоритмом ORB достигает цели за 13 секунд, в то время как система без него продолжает движение до потери цели из виду.

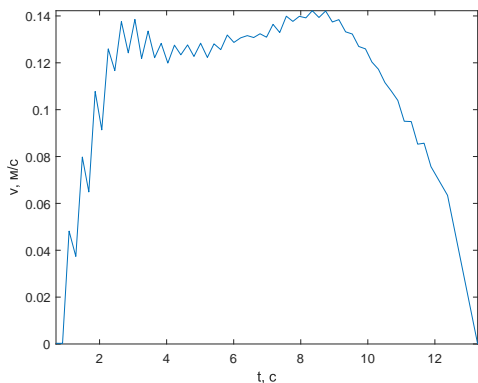
Изменение алгоритма выделения ключевых точек на AKAZE не дало качественного изменения картины для системы без корректора. При этом значительно увеличились значения всплесков моментов, что в реальной системе может привести к сгоранию двигателя.



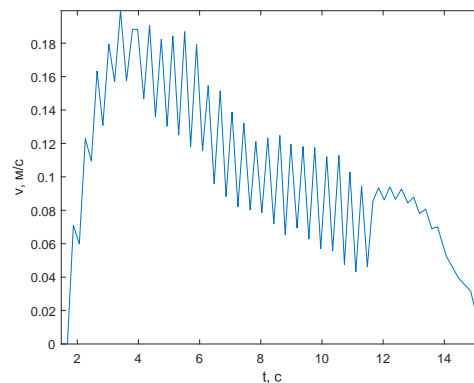
ORB без корректора.



AKAZE без корректора.



ORB с корректором.

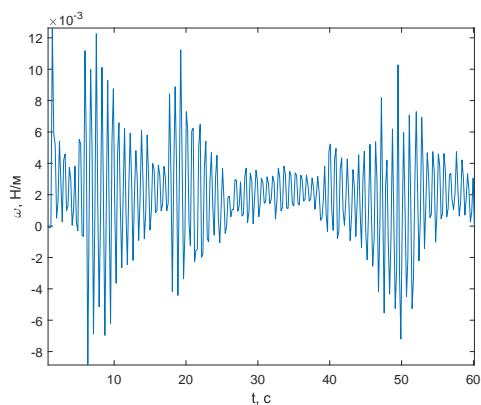


AKAZE с корректором.

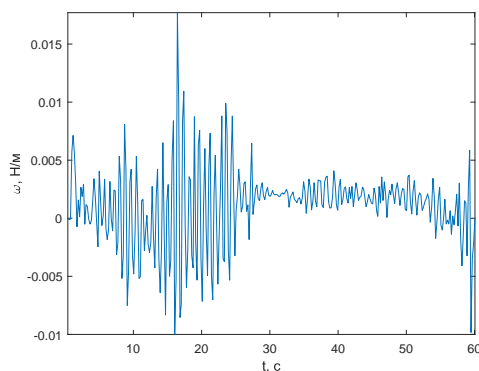
## Текст доклада

Идеальность приводов позволяет почти мгновенно обрабатывать входной момент, что приводит к наследованию проблем управляющего воздействия. Наличие рывков в первой половине графиков обусловлена недостаточной частотой обновления при достаточно быстром изменении скорости.

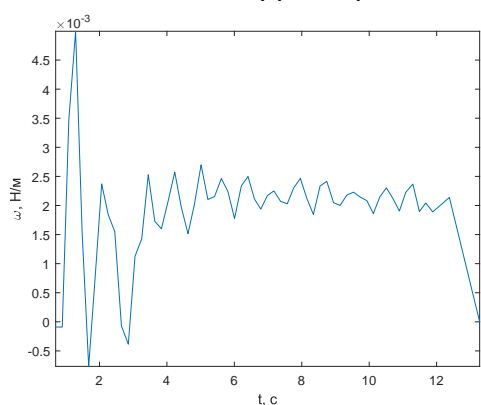
При использовании алгоритма AKAZE качество процесса оказалось значительно хуже, чем при использовании ORB.



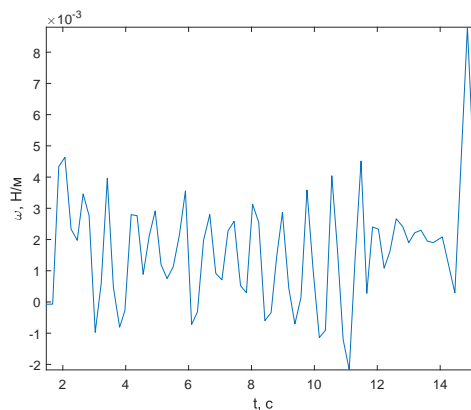
ORB без корректора.



AKAZE без корректора.



ORB с корректором.



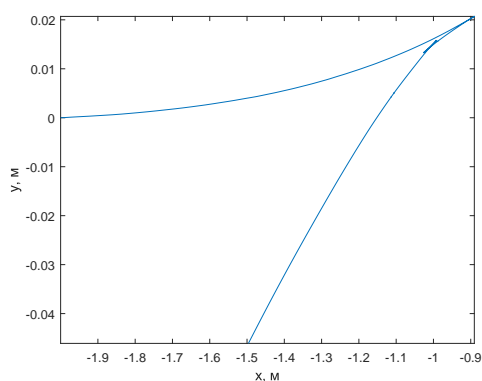
AKAZE с корректором.

---

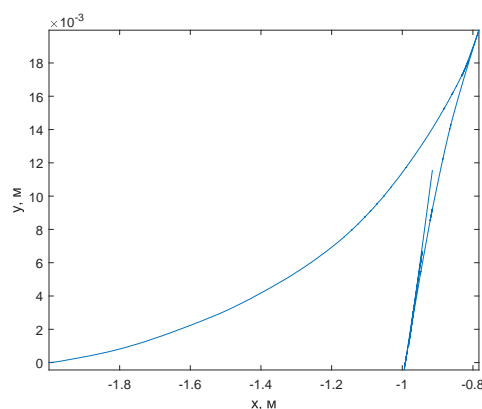
## Текст доклада

---

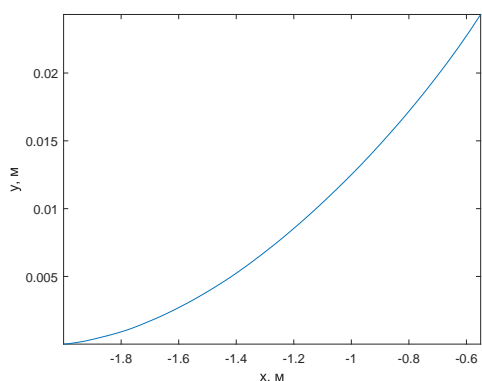
Амплитуда колебаний угловой скорости без корректора больше в 2 раза. Высокая частота изменения угловой скорости повышает требования к характеристикам используемой камеры, так как возможно размытие картинки.



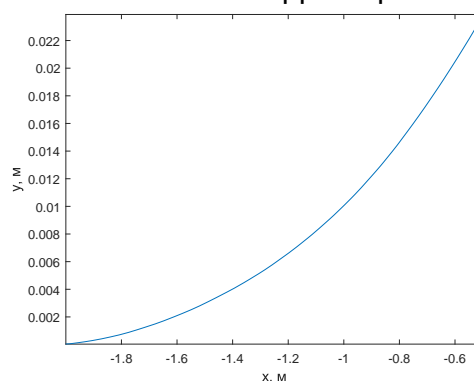
ORB без корректора.



AKAZE без корректора.



ORB с корректором.



AKAZE с корректором.

## Текст доклада

Как видно из графиков, робот без корректора не смог достигнуть желаемого положения. Траектория, полученная под управлением системы с корректором, не прямая, но находится в пределах допустимого отклонения. Отклонение по оси  $y$  связано с неточностью определения ключевых точек.

При использовании алгоритма AKAZE, несмотря на плохое качество процесса, позиционирование произведено точнее.

В ходе выполнения настоящей работы получены следующие результаты:

- 1 Разработан метод синтеза управления с многоцелевой структурой, обеспечивающий позиционирование мобильного робота в положении с желаемым изображением с камеры.
- 2 Разработан моделирующий комплекс виртуальной реальности, позволяющий производить моделирование движения мобильного робота под управлением с визуальной обратной связью с учетом динамики и внешних возмущений.
- 3 Протестирован моделирующий комплекс и проведена численная проверка синтезированного закона управления. В ходе тестирования проведено сравнение методов извлечения ключевых точек AKAZE и ORB.

---

Текст доклада

---

Спасибо за внимание.

- с использованием алгоритма ORB, но без использования корректора,
- с использованием корректора и алгоритма ORB,
- с использованием алгоритма AKAZE, но без использования корректора,
- с использованием корректора и алгоритма AKAZE.