Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра прикладной математики

Сравнительный анализ алгоритмов нахождения оптимальной функции управления рулевым колесом автомобиля с реалистично моделируемыми задержками в управлении

Выпускная квалификационная работы магистра

Выполнил: студент гр. 23641/2 В.А. Никулин

Руководитель: к.т.н., доц. И.В. Штурц

Консультант: Ph.D., Prof. И. Танев

14.06.2018

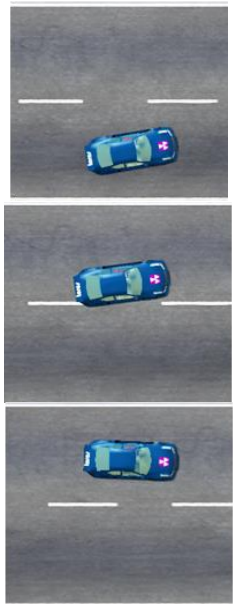
Задача автоматического управления автомобилем

- Рассматривается задача управления рулевым колесом автомобиля для удержания центра полосы

- Информация об окружении автомобиля считается известной

- Для достижения применимого в реальных условиях управления автомобилем, тестирование проводится на реалистичной программной модели
  - Задержка в управлении от 200 до 400 мс

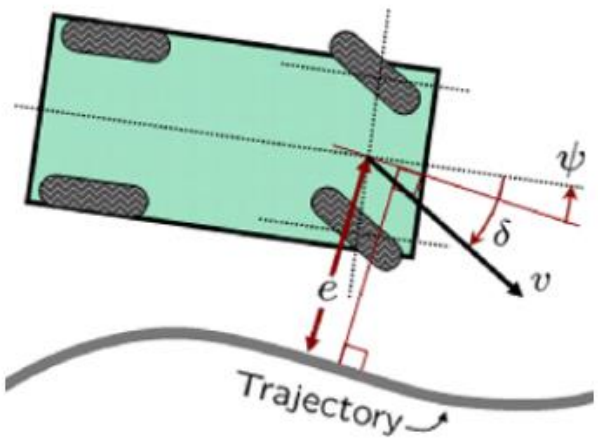
- Сложность построения полной динамической модели движения автомобиля не позволяет вывести оптимальную функцию аналитически. Условия оптимальности:
  - Минимальное значение среднего отклонения от центра полосы
  - Ограничение максимального отклонения от центра полосы
  - Минимальное значение среднего бокового ускорения автомобиля (отсутствие осцилляций)
  - Ограничение максимального значения бокового ускорения. Предельные значения для легковых автомобилей от $5\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ до $11\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$



Существующие решения

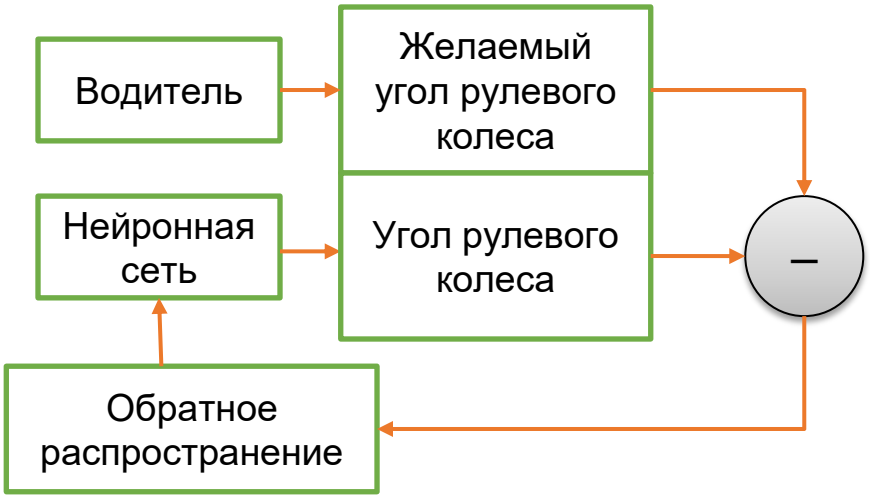
Автопилот от Стэндфордского университета для DARPA challenge

- Полностью аналитическое решение
- Вождение по бездорожью: более слабые условия оптимальности
- Отсутствие заранее заданной полосы



Автопилот от компании Nvidia

- Сквозное обучение (end-to-end learning): очень большое пространство поиска
- Человеческое вождение как источник обучающей выборки: слабая робастность метода
- Используется информация с фронтальной камеры автомобиля: не всегда надёжно

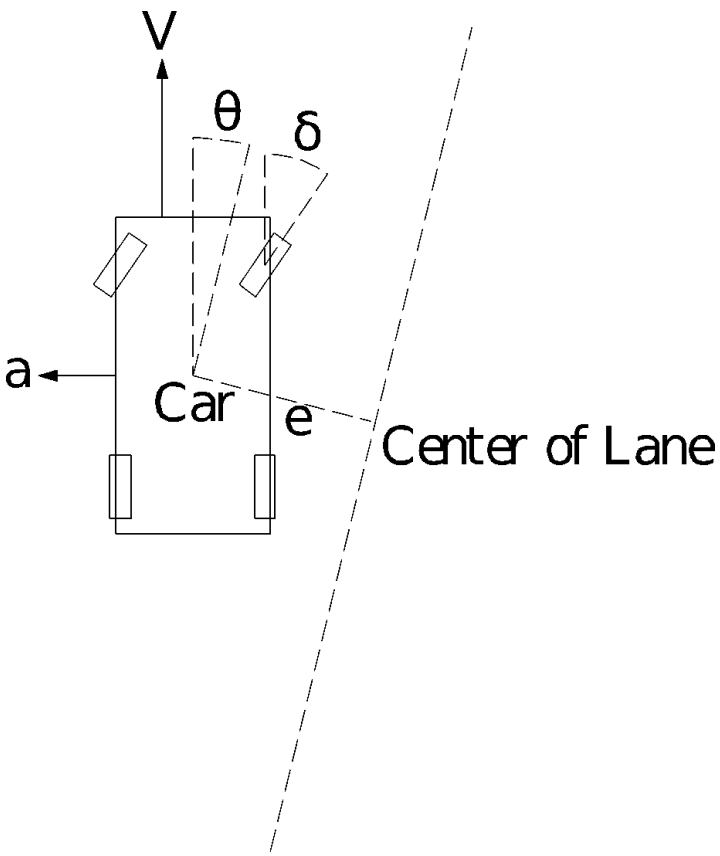


Управление рулевым колесом как программный агент

Задача разработки **автоматического управления рулевым колесом** сводится к задаче разработки **программного агента, действующего в стохастическом окружении**:

Информация, доступная агенту

Восприятие



$\Delta t = 20$ мс

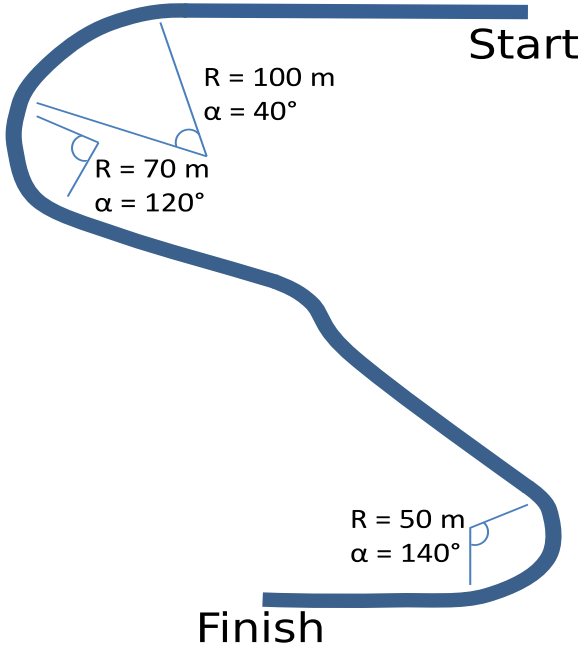
Внутреннее состояние программного агента:

- e : Расстояние до центра полосы
- θ : Угол между главной осью автомобиля и полосой
- V : Скорость автомобиля
- a : Боковое ускорение автомобиля
- δ : *Текущий* угол поворота передних колёс
- $\dot{e} = \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta t}$: Конечная разность e
- $\dot{\theta} = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta t}$: Конечная разность θ
- $\dot{V} = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t}$: Конечная разность V
- $\dot{a} = \frac{a_i - a_{i-1}}{\Delta t}$: Конечная разность a
- $\dot{\delta} = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{\Delta t}$: Конечная разность δ

Экспериментальное окружение

- TORCS
  - Моделирование динамики автомобиля и окружения
  - Эффективность программной реализации
  - Открытый исходный код
    - Позволяет регулировать величину задержки в управлении

- Для оценки качества вождения
  - Автомобиль движется с постоянной скоростью 50 км/ч
  - Трасса включает в себя несколько секций с разными значениями кривизны. Общая длина 2 км.
  - Вычисляется значение *функции пригодности*



Функция пригодности

Должны быть соблюдены четыре условия оптимальности :

- Малое значение **среднего отклонения** от центра полосы: $\bar{e} = \frac{\sum_{i=0}^{N} |e_i|}{N}$
- Ограниченное **максимальное отклонение** от центра полосы: $\max e_i < e_{\max}$
- Малое значение **среднего бокового ускорения** автомобиля: $\bar{a} = \frac{\sum_{i=0}^{N} |a_i|}{N}$
- Ограниченное **максимальное боковое ускорение** автомобиля: $\max a_i < a_{max}$

Функция пригодности : $E = \bar{e} + C * \bar{a}$

Где $C = \frac{e_{max}}{a_{max}}$

Если автомобиль не достигает финиша, значение E полагается бесконечно большим

$e_{max} = 1.75$ м, $a_{max} = 7\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $C = 0.25\ c^2$

Модель серво управления

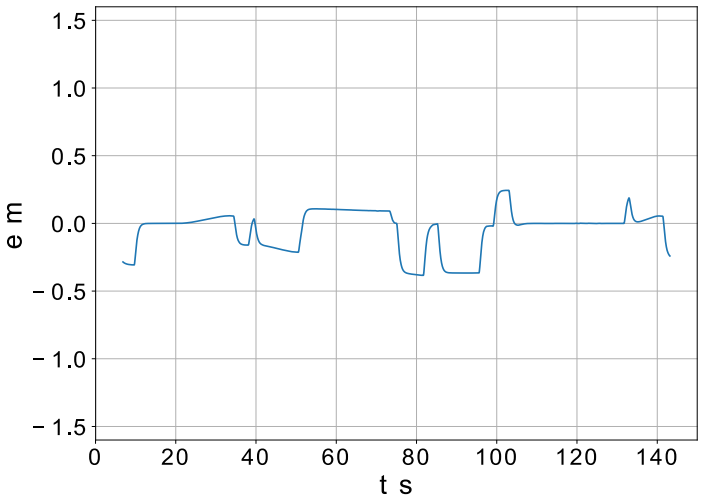
Задача нахождения оптимальной **функции управления** cf :

$$cf\text{: внутреннее состояние агента} \rightarrow \text{рулевая команда}$$

Простейшее решение: $cf(\theta, e) = \mathrm{C}_1\theta + \mathrm{C}_2 e$

Без задержек в управлении E = 0.45 м

$\bar{a} = 1.08\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, $\bar{e} = 0.18$ м, $\max a_i = 2.5\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$



С задержкой в 400 мс ($20\,\Delta t$) нестабильное управление на прямой

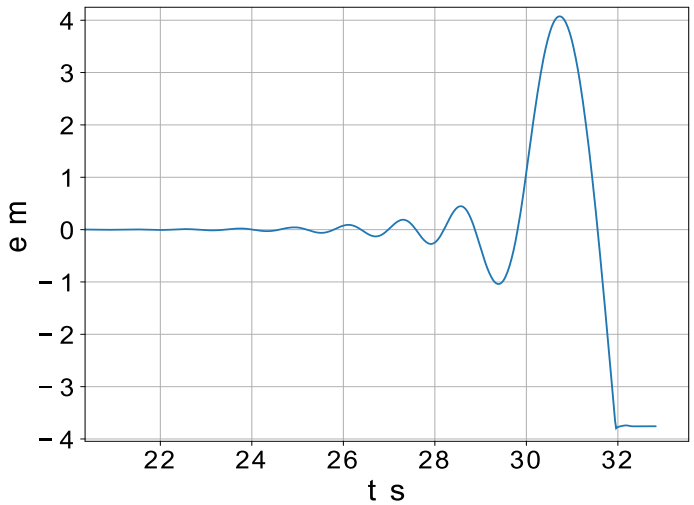


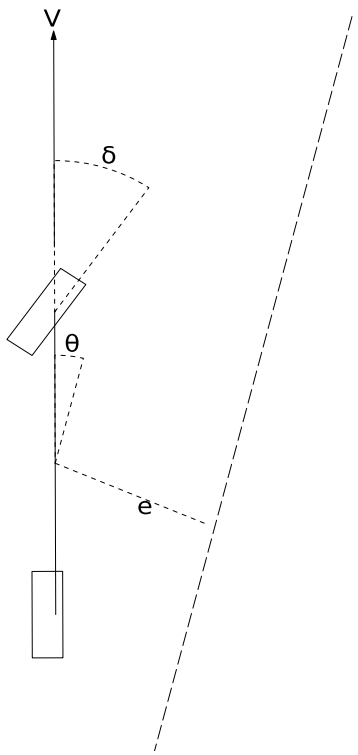
График зависимости отклонения от центра полосы от времени

Приближение динамики автомобиля

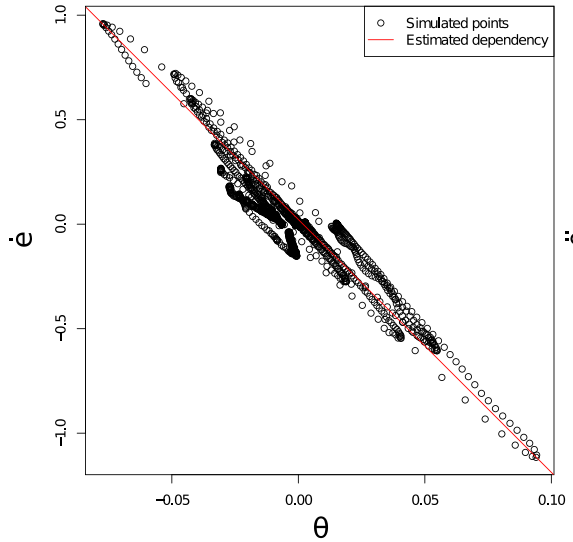
Велосипедная модель	Гипотеза

$$\dot{e} = V \sin\theta$$

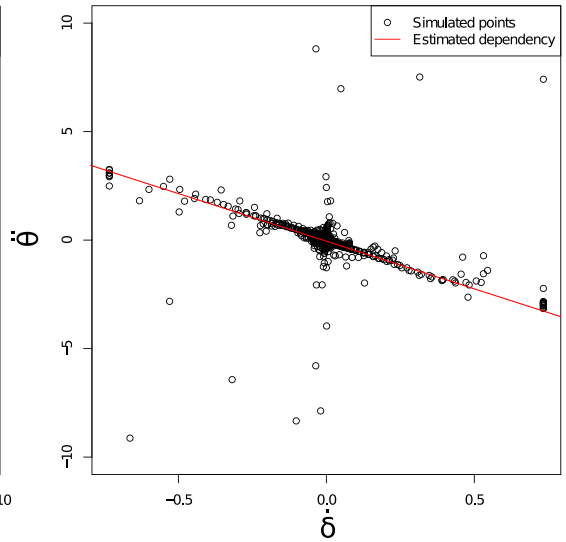
$$\dot{\theta} = \frac{V \tan\delta}{L} + X$$



$$\dot{e} \approx K_1\theta$$



$$\ddot{\theta} \approx K_2\dot{\delta}$$



Экспериментальные данные подтверждают предполагаемую зависимость между динамическими переменными при вождении в нормальных условиях

Аналитическая функция управления

Желаемое состояние программного агента: $e = 0, \theta = 0$

Желаемое соотношение: $\dot{e} = -Se$

Исходя из выведенных зависимостей

$$\delta_i = \delta_{i-1} - \frac{Se_{i-1}}{K_1 K_2 \Delta t} - \frac{\theta_{i-1} + \dot{\theta}_{i-1}\Delta t}{K_2 \Delta t}$$

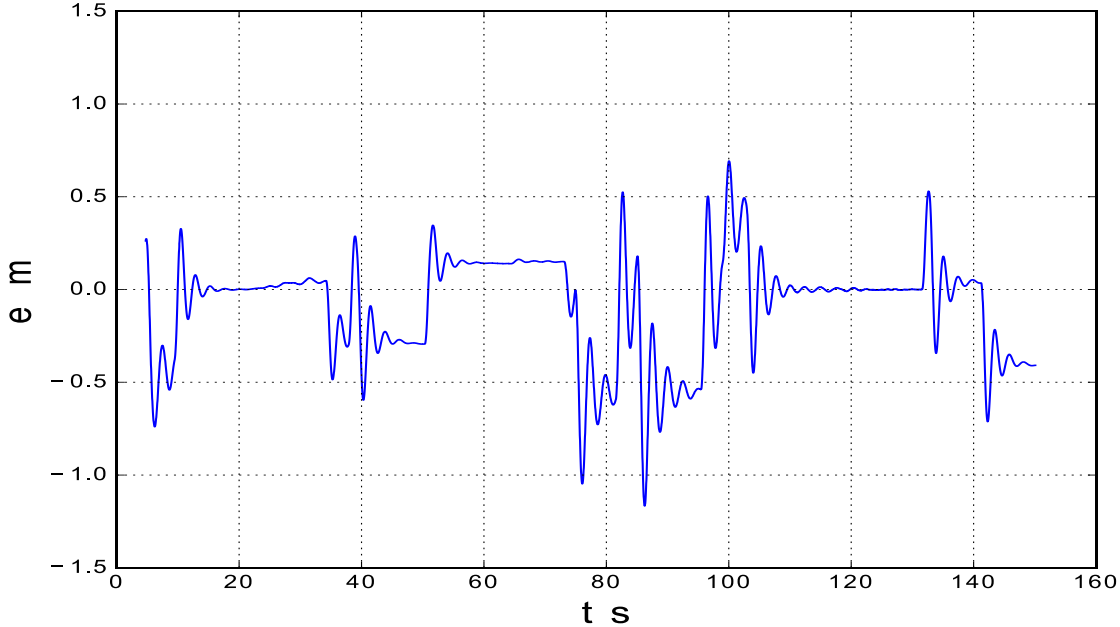
Чтобы учесть задержку в управлении, используется формула предсказания

$$e_{i-1+k} = e_{i-1} + \int_{(i-1)\Delta \mathrm{t}}^{(i-1+k)\Delta \mathrm{t}} \dot{e} dt \approx e_{i-1} + \sum_{j=i-1}^{i-1+k} \dot{e}_j \Delta t$$

Аналогично для θ и δ

Результаты оценки качества вождения для аналитической функции управления

График зависимости отклонения от центра полосы от времени



Значение функции пригодности E = 0.61 м при величине задержки $\tau = 400$ мс

- Присутствуют осцилляции: $\bar{a} = 1.25\,\frac{\text{м}}{c^2}$, $\max|a_i| = 4.8\,\frac{\text{м}}{c^2}$
- Автомобиль двигался в пределах одного метра от центра полосы:

$\mathrm{P}(e < 1\ \text{м}) = 0.98$

Сведение построения функции управления к задаче регрессии (1)

Предложенный алгоритм:

1. Получить временные ряды внутренних состояний агента и рулевых команд при моделировании вождения в разных условиях без задержек в управлении. Управление осуществляется согласно простой серво модели.
2. Сдвинуть колонки, соответствующие рулевым командам, назад во времени в соответствии с величиной задержки в управлении

t, мс	$a, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	e, м	$\theta°$	$\dot{a}, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$\dot{e}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\dot{\theta}°, \frac{1}{\text{с}}$	$\delta°$
…							
6800							
6820							
6840							
…							
7200							
7220							
7240							
…							

t, мс	$a, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	e, м	$\theta°$	$\dot{a}, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$\dot{e}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\dot{\theta}°, \frac{1}{\text{с}}$	$\delta°$
…							
6800							
6820							
6840							
…							
7200							
7220							
7240							
…							

3. Объединить все таблицы и решить задачу регрессии для новой зависимости рулевых команд от внутренних состояний агента

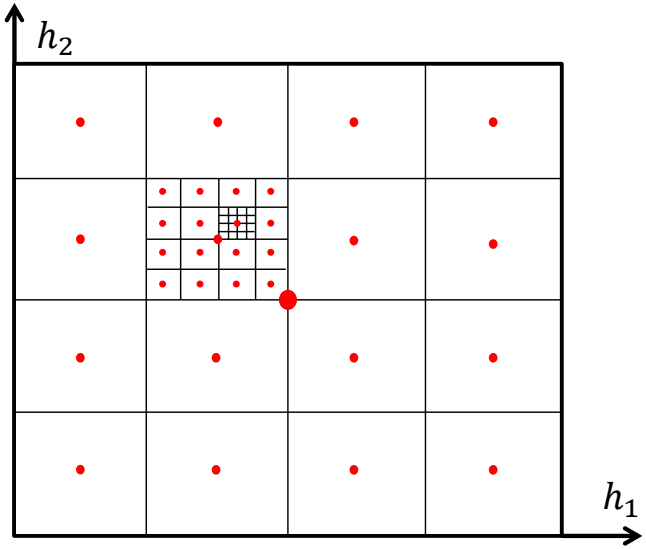
Сведение построения функции управления к задаче регрессии (2)

Размер обучающей выборки: 140000 строк таблицы

Размерность входных данных: 10 (внутреннее состояние агента)

Протестированные регрессионные модели:

- SVR с линейным ядром
- SVR с RBF ядром
- SVR с полиномиальным ядром
- Нейронная сеть (двухслойный перцептрон)

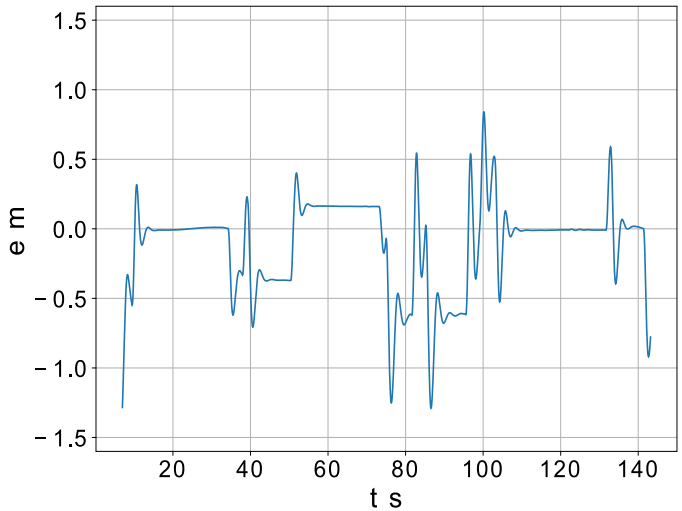


Настройка гиперпараметров осуществлялась итеративным поиском по сетке минимизируя функцию пригодности.

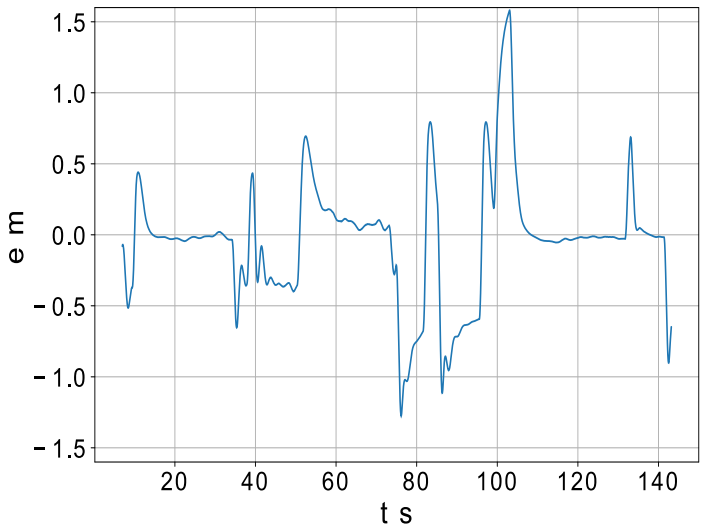
В рассмотренных моделях итоговое количество значений гиперпараметров для синтеза $= 900 \sim 12000$

Экспериментальные результаты

Регрессионная модель: SVR с RBF ядром



Регрессионная модель: Нейронная Сеть



Графики зависимости отклонения от центра полосы от времени

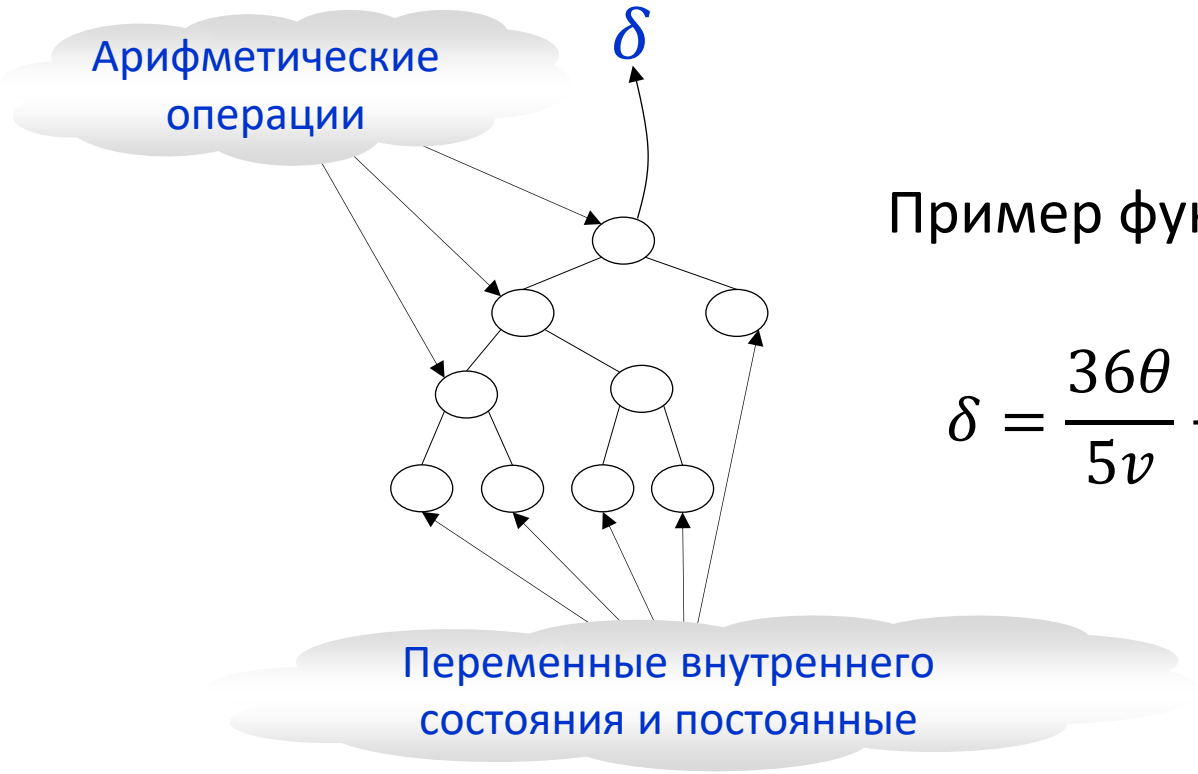
	E, м	$\bar{a}, \frac{м}{c^2}$	$\max\lvert a_i\rvert, \frac{м}{c^2}$	$P(e < 1\ м)$	$\max\lvert e_i\rvert$, м
Нейронная сеть	0.64	1.07	3.7	0.95	1.51
SVR с RBF ядром	0.65	1.17	4.5	0.97	1.27

Генетическое программирование

Функция управления имеет вид алгебраического выражения.

Набор терминалов: Все переменные внутреннего состояния агента, постоянные $C \in [1, \dots, 10]$

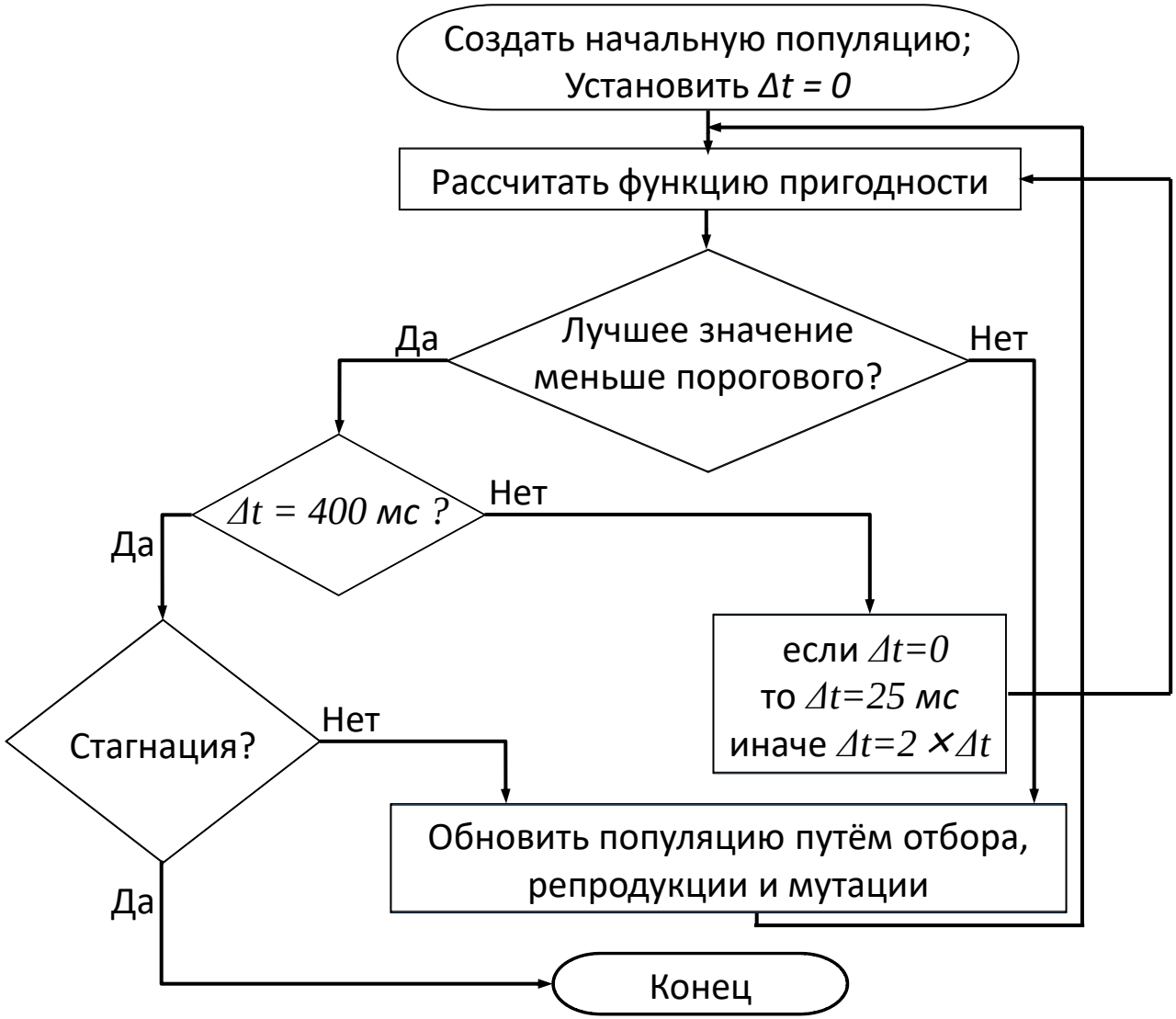
Набор функций: Арифметические операции



Пример функции управления

$$\delta = \frac{36\theta}{5v} + \theta + \frac{2\dot{\theta} + 2\theta - e}{\frac{1}{5v} - \theta + 4}$$

Инкрементальное Генетическое Программирование



- Количество индивидов в популяции – 200
- В функции пригодности присутствует штрафное слагаемое за количество узлов в дереве
- Шанс мутации – 0.05. Увеличивается с приближением стагнации

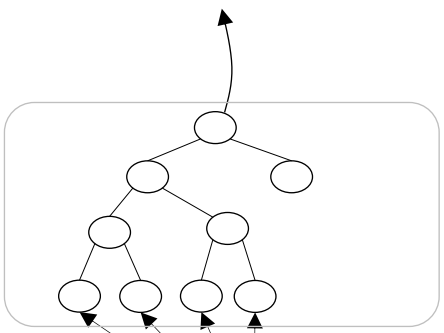
Особая форма решения

Известная серво модель:

$$\delta = C_1 e + C_2 \theta$$

Стандартная форма решения

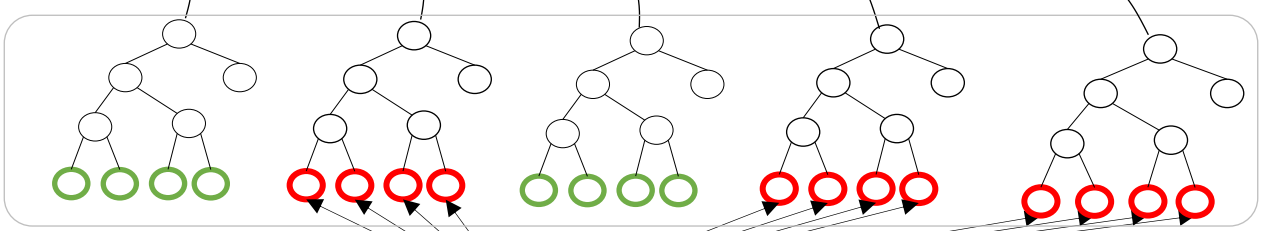
δ



Переменные внутреннего состояния и постоянные

Предложенная форма решения

$$\delta = \boxed{C_1}(e + \boxed{e_{PRED}}) + \boxed{C_2}(\theta + \boxed{\theta_{PRED}}) + \boxed{ft}$$

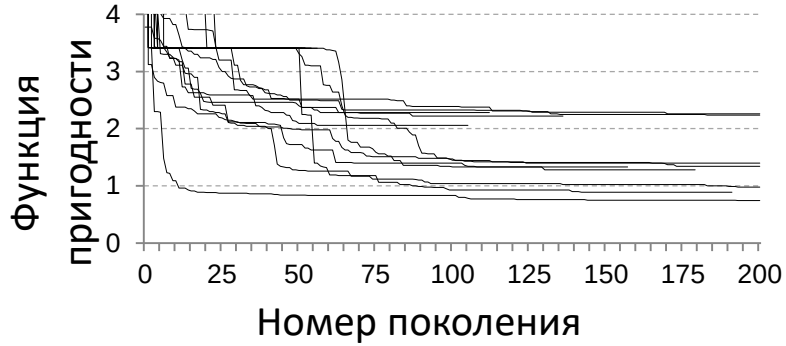


Переменные внутреннего состояния и постоянные

Постоянные

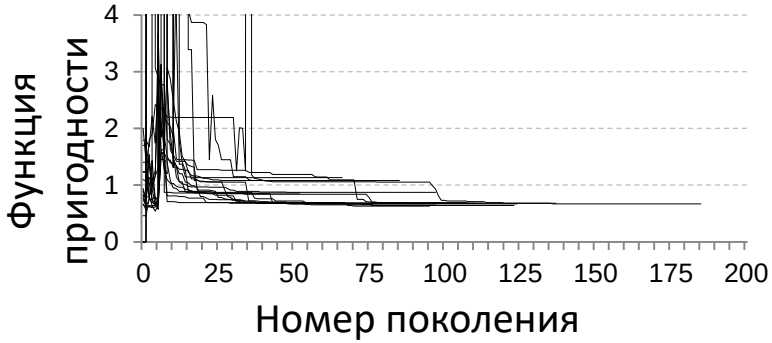
Генетическое программирование: экспериментальные результаты

Стандартное генетическое программирование



Минимальное значение функции пригодности	**0.74**
Максимальное значение функции пригодности	**3.41**
Среднее значение	**2.32**
Стандартное отклонение	**1.02**

Генетическое программирование с предложенными улучшениями



Минимальное значение функции пригодности	**0.62**
Максимальное значение функции пригодности	**1.13**
Среднее значение	**0.76**
Стандартное отклонение	**0.16**

Заключение

- Предложено и исследовано три подхода к разработке функции управления рулевым колесом реалистично моделируемого автомобиля
  - Все подходы имеют схожие значения функции пригодности: $E \approx 0.6$ м

- Первый подход основан на аналитическом выводе функции управления из приближенных динамических уравнений движения автомобиля
  - Слишком много допущений при выводе
  - Требуется всего один запуск симулируемого автомобиля для оценки параметров K_1 и K_2

- Второй подход основан на сведении имеющейся задачи к задаче регрессии при известной функции управления идеализированным автомобилем
  - Более гибкий подход по сравнению с первым
  - Требуется от 900 до 12000 оценок функции пригодности при настройке гиперпараметров

- Третий подход основан на улучшении алгоритма генетического программирования
  - Широкое пространство поиска
  - Направленный поиск: в среднем хватает 20000 оценок функции пригодности для всего поиска