

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ «КОНТРОЛИРУЕМОГО» РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Д.А. Локтев

loktevdan@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложен подход к обнаружению, захвату и распознаванию транспортных средств на изображении для определения их геометрических, кинематических и динамических характеристик. Контроль своевременно определенных характеристик позволит выявлять нарушения транспортных средств, анализировать и предотвращать возможные аварийные ситуации, а также реализовать цифровую модель окружающего пространства, в том числе для ее представления в виртуальной реальности. При детектировании объекта применяется алгоритм YOLOv3 с обучением сверточных нейронных сетей. Для определения границ объекта и колесных осей используются детекторы Кенни и Хафа. Предложен метод определения размытия границ объекта на основе численного определения производных первого, второго и третьего порядков по каждой координатной оси и последующего уточнения на разных уровнях разрешающей способности. После детектирования и определения числа колесных осей автотранспортного средства пассивным методом анализа изображений выбирается модель вертикальных колебаний экипажа и на основе полученных геометрических и кинематических параметров определяются динамические характеристики автотранспорта. Подробно описана используемая модель транспортного средства с двумя осями. В качестве начальных условий колебательной системы приняты параметры искусственного препятствия типа «лежащий полицейский»

Ключевые слова

Определение параметров, детектирование объектов, определение массы, анализ изображения, размытие объекта, динамические характеристики

Поступила 10.09.2019

Принята 30.09.2019

© Автор(ы), 2020

*Работа выполнена в соответствии с государственным заданием
Минобрнауки России (проект № 2.5048.2017/8.9)*

Введение. В настоящее время все большей проблемой, которую необходимо учитывать при развитии и проектировании автомобильных дорог и транспортных узлов как в городах, так и на основных автомагистралях, становится увеличение скоростей транспортных потоков в целом и отдельных экипажей в частности, а также нагрузок на автомобильное полотно. Это приводит к увеличению аварийных ситуаций на наиболее опасных участках дорог и ускоренному изнашиванию автомобильного полотна. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является разработка информационно-измерительных систем мониторинга движущихся объектов для автоматизации определения и сбора параметров состояния и поведения транспортных средств, таких как местоположение на дороге относительно разметки и относительно других транспортных средств, габаритные размеры, скорость и направление движения, ускорение, нагрузка на ось колесной пары, масса всего транспортного средства. Контроль своевременно определенных перечисленных характеристик позволит выявлять нарушения, анализировать и предотвращать путем управления движением, основанного на полученных параметрах, возможные аварийные ситуации. Предлагаемую управляющую систему мониторинга можно использовать для создания цифровой модели [1] автомобильных и железных дорог и прилегающих к ним объектов, используя определяемые параметры объектов для представления в среде виртуальной реальности [2] (цифровом «двойнике» реальной окружающей среды). Это позволит решать проблему контроля состояния транспортной инфраструктуры и поведения движущихся объектов в режиме реального времени.

Первоочередным шагом является выбор используемого метода для получения кинематических, геометрических и динамических характеристик объекта. Для получения подобной первичной информации возможно использование активных и пассивных методов. К первым относятся способы, предполагающие излучение каких-либо волн, например, использование лазеров [3], эхолотов, тепловизоров [4], PMD-камер (Photonic Mixer Device) [5, 6]. К пассивным относятся методы, использующие анализ одного или нескольких образов контролируемого объекта. Например, метод стереозрения [5, 7], анализа размытия изображения объекта [8], метод пропорционального соотношения объектов и др. Анализ изображений позволяет не только удешевить процедуру снятия показателей по сравнению с активными методами при приемлемой точности, но и определить наибольшее число параметров объекта при минимальном разнообразии используемого оборудования без применения дополнительного активного оборудования и представить полученные данные в одном формате.

Для достижения поставленных целей предлагается разработать алгоритм определения параметров объектов на основе анализа их изображений с использованием вычислительных методов оценки размытия образа объекта, математического обеспечения информационно-измерительной системы мониторинга для контроля транспортных средств. При этом учитывается тип транспортного средства, для чего необходимо на основе габаритных размеров и числа степеней свободы экипажа использовать математическую модель, позволяющую оценить и описать перемещения транспортного средства, с учетом его движения, в том числе колебательно-го. При рассмотрении и оценке вертикальных перемещений колесных осей их начальные смещения задаются с помощью неровностей проезжей части с известными геометрическими характеристиками, которые определяются или априорно, или на основе анализа изображений дорожного полотна.

Детектирование и определение параметров объекта. Для получения геометрических, кинематических и динамических характеристик объектов с помощью анализа их изображений [9] необходимо определить внутренние характеристики камеры, такие как фокусное расстояние, диаметр объектива, точку фокусировки, разрешение светочувствительной матрицы и размеры кадра [10]. При получении очередного кадра видеопотока происходит обнаружение движущегося объекта, для чего предлагается использовать алгоритм YOLOv3 [11].

При обнаружении объекта определяется наличие и число колесных осей, представляемых в виде окружностей, и габаритные размеры транспортного средства. Для этого необходимо, зная внутренние характеристики камеры, по размытию границ объекта определить расстояние до него от камеры и его скорость, затем определить наиболее подходящую модель транспортного средства, описываемую системой уравнений, для решения которой используются численные методы аппроксимации (рис. 1, а).

Детектирование объекта предлагается осуществлять с помощью алгоритма YOLOv3, основанного на использовании обучения сверточных нейронных сетей [11], в нем задача распознавания решается как регрессия. Алгоритм принимает входное изображение и делит его на сетку фрагментов размером $S \times S$ (рис. 1, б). В каждом фрагменте выбирается некоторое число прямоугольных ограничивающих рамок (bounding boxes), для которых нейросеть вычисляет вероятности принадлежности классам и значения смещений. При превышении заданной границы вероятности рамка признается объектом класса на изображении. Таким образом, одна сверточная нейросеть делает предсказание ограничивающих рамок объекта, вычисляет вероятности наличия объекта и принад-

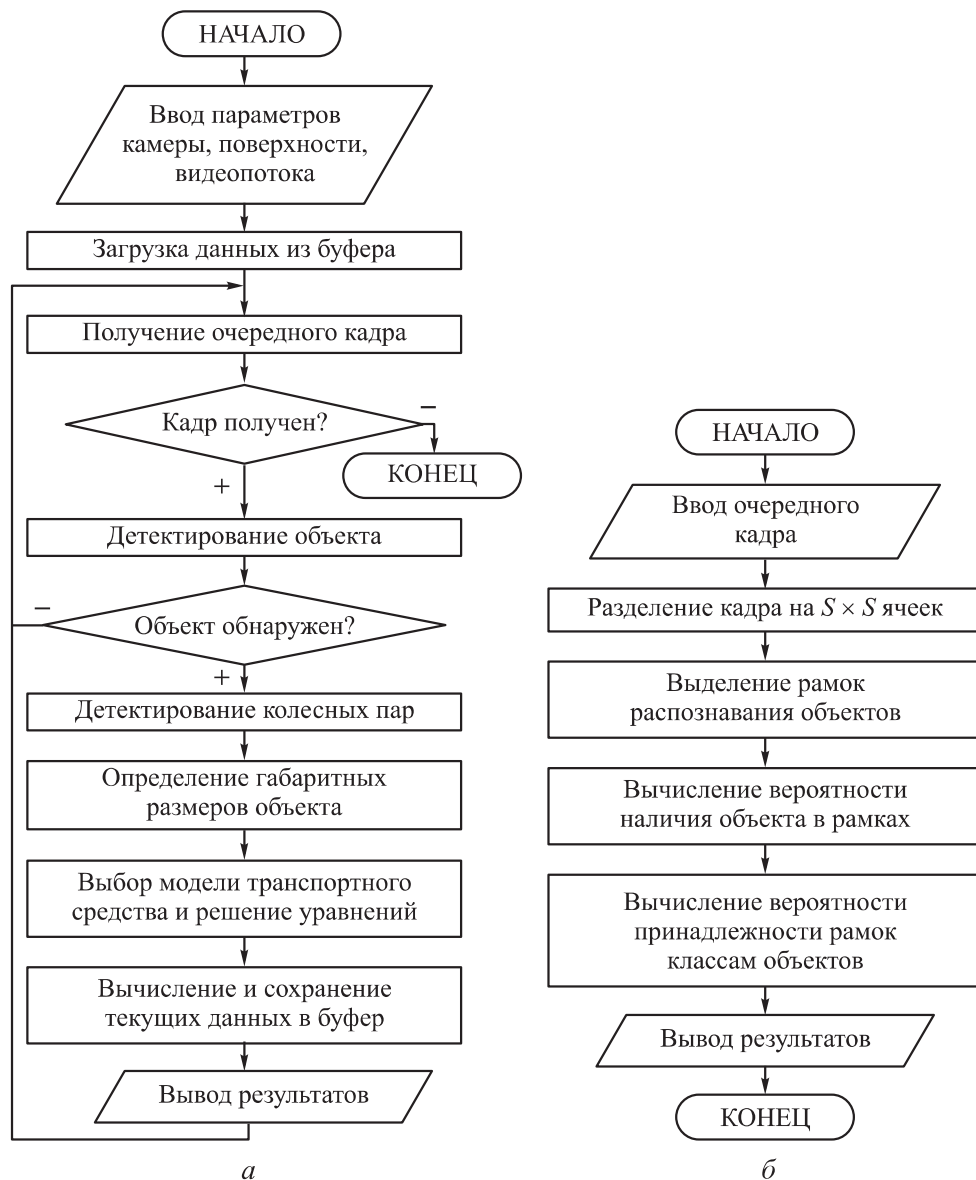


Рис. 1. Алгоритм определения параметров (а) и детектирования (б) объектов

лежности классам для каждой рамки, при этом используя в работе сверточную нейросеть Darknet-53 из 53 сверточных внутренних слоев и превосходя в скорости алгоритмы R-CNN и Fast R-CNN в 1000 и 100 раз [12]. Предлагаемый алгоритм приведен на рис. 1.

После выбора областей интереса необходимо определить границы движущегося объекта, для чего используется детектор Кенни [13], результатом работы которого являются массивы контуров сегментированного транспортного средства [14].

При этом математическая модель выделения границ объекта описывается дифференциальными методами с определением множества контуров K , состоящего из N_k элементов $K_l : K = \{K_l\} | l=1, \dots, N_k$, где контур K_l представляет собой совокупность точек образа объекта, отличных по интенсивности от фона изображения, таких, что для каждой точки (x_i, y_i) найдутся соседние точки (x_j, y_j) , расположенные на расстоянии порога точности t пикселей:

$$\forall (x_i, y_i) \in K_l, i = \overline{1, \dots, N_{k_i}} : \exists (x_j, y_j) \in K_l, j = \overline{1, \dots, N_{k_i}}, \quad (1)$$

$$\min_{i \neq j} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \leq t.$$

Для уменьшения вычислительной сложности путем отбрасывания точек кривой контур аппроксимируется алгоритмом Рамера — Дугласа — Пекера, что позволяет уменьшить число используемых точек кривой (контура) [15, 16]. При этом упрощенная кривая состоит из подмножества точек, определяющих исходную кривую. Алгоритм определяет отличия на основе максимального расстояния (расстояния Хаусдорфа) между исходной и упрощенной кривыми.

Для нахождения образов колесных осей можно использовать градиентный метод Хафа [17] для выделения окружностей на изображении, причем для уменьшения его вычислительной сложности можно рассматривать только кривые, касательные которых перпендикулярны градиенту яркости изображения в рассматриваемой точке [18]. Тогда сам алгоритм Хафа можно представить в виде набора следующих действий.

1. Определение границ изображения детектором Кенни.
2. Вычисление градиента для ненулевых точек.
3. Определение центров кругов.
4. Определение точек, лежащих на одном расстоянии относительно центра.

Определение габаритных размеров транспортного средства. Для определения расстояния до объекта аппроксимируем полученную экспериментальным путем зависимость размытия границ объекта от расстояния до него методом наименьших квадратов. В качестве теоретической функции воспользуемся логарифмической функцией с учетом модуля (рис. 2) вида $\sigma = \text{abs}(b \ln(r) + a)$ (σ — размытие границ объекта, r — расстояние до объекта), где найденные при аппроксимации коэффициенты $a = -18,68$; $b = 104,7$ [19, 20]. При известной зависимости размытия объекта от расстояния до него можно подобрать необходимую чувствительность метода путем

варьирования внутренних характеристик фотодетекторов, таким образом, получая «контролируемое» размытие.

Для проверки адекватности модели вычислим значение F -критерия: $F_{\text{расч}} = 105,7497175$; $F_{\text{табл}} = 2,08$. Поскольку фактическое значение $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, то найденная оценка уравнения регрессии статистически значима.

Таким образом, расстояние r от камеры до объекта можно определить по полученной заранее для камеры с конкретными параметрами зависимости, вычислив размытие σ объекта на изображении.

При определении размеров транспортного средства необходимо знать априорные характеристики камеры — углы обзора по вертикали α_y и горизонтали α_x (в радианах), размеры получаемого изображения — высоту $Height$ и ширину $Width$ кадра (в пикселях), а также с помощью методов анализа изображений определить высоту H_{obj} и ширину W_{obj} объекта (в пикселях). Тогда реальные габаритные размеры транспортного средства (высоту h и длину l) можно вычислить по формулам:

$$h = \frac{\alpha_y H_{obj}}{Height} r; \quad l = \frac{\alpha_x W_{obj}}{Width} r. \quad (2)$$

При определении скорости объекта предлагается представить ее вектор в виде трех проекций v_x , v_y , v_z , где оси x и y расположены в плоскости изображения, а ось z направлена перпендикулярно. При этом образ объекта на изображении перемещается на ΔX_{obj} , ΔY_{obj} пикселей. Действительные смещения объекта по горизонтали и вертикали можно определить из пропорций прямоугольных треугольников, определяющих положение изображения и реального объекта, а компоненты скоростей v_x , v_y получаются путем деления смещений на промежуток времени Δt , составляющая скорости v_z объекта определяется по изменению высоты объекта в момент времени t с использованием уравнений (2):

$$v_y = \frac{\alpha_y \Delta Y_{obj}}{Height} \frac{l}{\Delta t}; \quad v_x = \frac{\alpha_x \Delta X_{obj}}{Width} \frac{l}{\Delta t}; \quad (3)$$

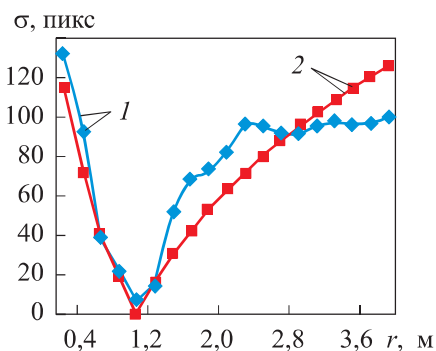


Рис. 2. Экспериментально полученная зависимость размытия объекта (1) и ее аппроксимация (2)

$$v_z = \left(\frac{H_{obj}(t - \Delta t) - H_{obj}(t)}{H_{obj}(t)H_{obj}(t - \Delta t)} \right) \frac{Height \cdot h}{\alpha_y \Delta t}. \quad (3)$$

После определения скорости уравнениями (3) подобным образом находят ускорение автомобиля в виде проекций на координатные оси.

Определение размытия границ объекта. Для определения величины размытия границ исследуемого объекта предлагается представить изображение как зависимость интенсивности от координат $I(x, y)$. Затем, используя различные уровни разрешающей способности итерационной схемы Боке [21, 22], найти производные первого порядка по каждой координате (проекции градиента на оси x и y), производные второго порядка (показывающие изменения проекции градиента на оси x и y), приравнять нулю для определения точек с наибольшими значениями скорости изменения интенсивности по координатам (центр размытия) x_0 и y_0 , далее определить точки перегиба функции по каждой координате в окрестностях найденных x_0 и y_0 (координаты x_1, x_2 и y_1, y_2). Таким образом, точки x_1 и x_2 будут определять границы размытия объекта по оси x : $\sigma_x = x_2 - x_1$, а y_1 и y_2 — границы размытия по оси y : $\sigma_y = y_2 - y_1$.

Применение итерационной схемы Боке в алгоритме необходимо для локализации анализируемых точек для определения границ и размытия объекта. На самом верхнем уровне (с низкой разрешающей способностью) границы объекта наиболее четкие — на этом уровне находимы только точки, лежащие на контуре объекта, полученные из уравнения (1), чтобы затем рассматривать только их и прилежащие к ним точки в некоторой окрестности (фрейме) w .

На каждом уровне итерационной схемы определяем производные первого, второго и третьего порядков функции изображения $I(x, y)$, которые находятся отдельно от x (при этом считая, что $y = \text{const}$) и от y (считая, что $x = \text{const}$). Тогда по каждой координате можно получить набор зависимостей, представленных на рис. 3.

Функция $I(x, y)$ показывает изменение интенсивности по координате x , производная первого порядка определяет скорость изменения интенсивности по координате x (проекцию градиента на ось x); производная второго порядка показывает изменение проекции градиента на ось x , приравнявая ее нулю, определяем точку x_0 наибольшего значения скорости изменения интенсивности по координате x (центр размытия); производная третьего порядка определяет точки x_1 и x_2 , в которых первая производная исходной функции меняет знак (точка перегиба), а значит,

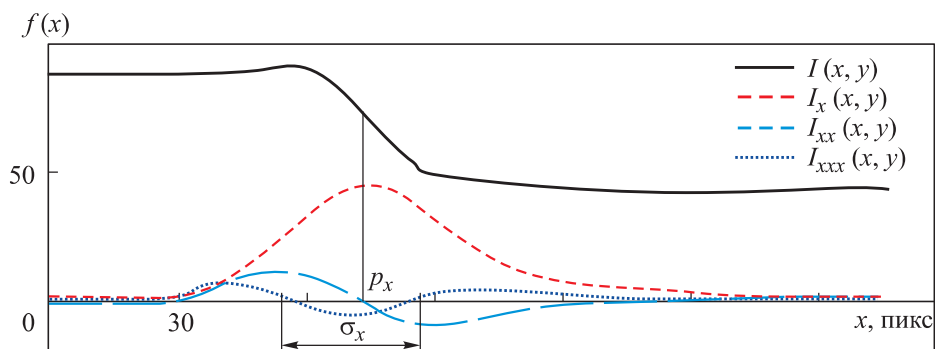


Рис. 3. Определение величины размытия объекта по оси x

скорость ее изменения в этих точках не будет ни уменьшаться, ни увеличиваться при увеличении координаты. Таким образом, точки x_1 и x_2 будут определять границы размытия объекта, т. е. размытие по оси x будет представлять собой $\sigma_x = x_2 - x_1$.

Для представления производной в качестве используемого численного метода применяется полином Лагранжа для четырех точек.

Описанные действия определения размытия границ объекта можно представить в виде следующей последовательности с использованием численных методов дифференцирования.

Шаг 1. Ввод изображения $I(x, y)$ и представление в оттенках серого цвета.

Шаг 2. Построение пирамиды (итерационной схемы с разными уровнями разрешающей способности) исходного изображения $\{I^L\}_{L=0, \dots, L_m}$.

Шаг 3. Инициализация границ циклов: $w_{x0} = 0, w_{y0} = 0; w_x = Width / 2^L, w_y = Height / 2^L$.

Шаг 4. Цикл по уровням L от L_m до 0 с шагом -1 .

Шаг 5. Цикл по y от w_{y0} до w_y .

Шаг 5.1. Цикл по x от w_{x0} до w_x .

Шаг 5.2. Расчет первой производной для каждой точки (x, y) по четырем точкам изображения I^L по пространственной координате x с шагом h (1 пикс) с помощью представления в виде полинома Лагранжа:

$$I_x^L(x, y) = \frac{1}{6h} \left(-11I^L(x, y) + 18I^L(x + 1, y) - 9I^L(x + 2, y) + 2I^L(x + 3, y) \right). \quad (4)$$

Шаг 5.3. Расчет второй производной (первой производной градиента) для каждой точки (x, y) по четырем точкам изображения I^L по пространственной координате x для нахождения точки x_0 (центра размытия) и определение, когда она равна нулю, с помощью представления в виде полинома Лагранжа:

$$\begin{aligned} I_{xx}^L(x, y) &= \\ &= \frac{1}{h^2} \left(2I^L(x, y) - 5I^L(x+1, y) + 4I^L(x+2, y) - I^L(x+3, y) \right), \quad (5) \\ &\quad \left| I_{xx}^L(x, y) \right| < t_{x1}, \end{aligned}$$

где t_{x1} — заданный порог точности расчета второй производной. Определение точки x_0 .

Шаг 5.4. Расчет третьей производной (второй производной градиента) изображения I^L по пространственной координате x и определение, когда она равна нулю, с помощью представления в виде полинома Лагранжа:

$$\begin{aligned} I_{xxx}^L(x, y) &= \\ &= \frac{1}{6h^3} \left(I^L(x, y) - 3I^L(x+1, y) + 3I^L(x+2, y) - I^L(x+3, y) \right), \quad (6) \\ &\quad \left| I_{xxx}^L(x, y) \right| < t_{x2}, \end{aligned}$$

где t_{x2} — заданный порог точности расчета третьей производной. Определение точек x_1 и x_2 в окрестности точки x_0 и величины $r_x = x_1 - x_2$.

$$\text{Шаг 5.5. Определение среднего значения } \bar{r}_x = \frac{\sum_{y=w_{y0}}^{w_y} r_{xy}}{w_y - w_{y0} + 1} \text{ по всем } y.$$

Шаг 6. Цикл по x от w_{x0} до w_x .

Шаг 6.1. Цикл по y от w_{y0} до w_y .

Шаг 6.2. Расчет первой производной изображения I^L по координате y :

$$\begin{aligned} I_y^L(x, y) &= \\ &= \frac{1}{6h} \left(-11I^L(x, y) + 18I^L(x, y+1) - 9I^L(x, y+2) + 2I^L(x, y+3) \right). \quad (7) \end{aligned}$$

Шаг 6.3. Расчет второй производной (первой производной градиента) изображения I^L по пространственной координате y для нахождения точки y_0 (центра размытия):

$$\begin{aligned}
 I_{yy}^L(x, y) &= \\
 &= \frac{1}{h^2} (2I^L(x, y) - 5I^L(x, y + 1) + 4I^L(x, y + 2) - I^L(x, y + 3)), \quad (8) \\
 &|I_{yy}^L(x, y)| < t_{y1},
 \end{aligned}$$

где t_{y1} — заданный порог точности определения второй производной. Определение точки y_0 .

Шаг 6.4. Расчет третьей производной (второй производной градиента) изображения I^L по пространственной координате:

$$\begin{aligned}
 I_{yyy}^L(x, y) &= \\
 &= \frac{1}{6h^3} (I^L(x, y) - 3I^L(x, y + 1) + 3I^L(x, y + 2) - I^L(x, y + 3)), \quad (9) \\
 &|I_{yyy}^L(x, y)| < t_{y2},
 \end{aligned}$$

где t_{y2} — заданный порог точности расчета второй производной. Определение точек x_1 и x_2 в окрестности точки x_0 и $r_x = x_1 - x_2$.

$$\text{Шаг 6.5. Расчет среднего значения } \bar{r}_y = \frac{\sum_{x=w_{x0}}^{w_x} r_{yx}}{w_x - w_{x0} + 1} \text{ по всем } x.$$

Шаг 7. Расчет координат (p_x, p_y) интересующего пикселя на изображении I^{L-1} и границ циклов по x и y :

$$p_x = x_0 \cdot 2, \quad \bar{r}_x = \bar{r}_x \cdot 2, \quad p_y = y_0 \cdot 2, \quad \bar{r}_y = \bar{r}_y \cdot 2. \quad (10)$$

$$\text{Шаг 8. } w_{x0} = p_x - \bar{r}_x, \quad w_{y0} = p_y - \bar{r}_y, \quad w_x = p_x + \bar{r}_x, \quad w_y = p_y + \bar{r}_y. \quad (11)$$

Шаг 9. Возврат на шаг 4, новая итерация.

Шаг 10. Конец цикла по уровням L .

Шаг 11. Определение размытия границы объекта по x и y :

$$\sigma_x = w_x - w_{x0}, \quad \sigma_y = w_y - w_{y0}. \quad (12)$$

Шаг 12. Определение полного размытия (в пикс): $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$.

Далее определим, на сколько итераций алгоритм с применением пирамидальной схемы Боке будет быстрее по времени, чем без ее применения. При этом сам алгоритм определения размытия изображения путем нахождения производных первого, второго и третьего порядков будет одинаков.

Без применения итерационной схемы Боке для исходного изображения с шириной $Width = 2297$ пикс и высотой $Height = 4007$ пикс верхняя оценка вычислительной сложности алгоритма будет: $O(m, n) = Width \cdot Height = 2297 \cdot 4007 = 9\,204\,079$ циклов. С применением итерационной схемы Боке вычислительная сложность будет:

$$\begin{aligned} O(m, n) &= Width \cdot Height / 4^{L=3} + \left(2w_x^{l=2}\right) \left(2w_y^{l=2}\right) \cdot 4 + \\ &+ \left(2w_x^{l=1}\right) \left(2w_y^{l=1}\right) \cdot 4 + \left(2w_x^{l=0}\right) \left(2w_y^{l=0}\right) \cdot 4 = \\ &= 288 \cdot 501 + 16 \cdot 40 \cdot 40 + 16 \cdot 92 \cdot 92 + 16 \cdot 180 \cdot 180 = 823\,712 \text{ циклов,} \end{aligned}$$

т. е. по предлагаемой итерационной схеме быстродействие увеличивается в 11,17 раза.

Моделирование транспортных средств. При моделировании поведения кузова экипажа, колесной оси и покрытия проезжей части предлагается использовать геометрическую, кинематическую и динамическую характеристики движения [23–25]. Динамическая характеристика движения в данной постановке задачи — это сила взаимодействия между различными подрессоренными частями системы $P(t)$, а также ее максимальное значение $\max_{t \in [0, \infty]} P(t)$, которое в ряде случаев играет определяющую роль. Для ее определения необходимо составить уравнения для вертикальных колебаний.

В предлагаемой модели транспортного средства с четырьмя степенями свободы и двумя колесными парами, которая соответствует практически любому двухосному экипажу (рис. 4), для описания вертикальных перемещений принимаются следующие обобщенные координаты: Z_1 — вертикальное перемещение центра масс кузова экипажа, при этом считается, что эта точка не меняет своего положения во все время движения, т. е. груз не имеет подвижности; φ — угловое перемещение некоторой средней линии кузова автомобиля, проходящей через центр масс; z_1 и z_2 — вертикальные перемещения первой и второй колесных пар. Кузов экипажа имеет массу M_1 и момент инерции продольного сечения J_1 , а первая и вторая колесные пары имеют массы m_1 и m_2 .

Систему определяющих дифференциальных уравнений для вертикальных колебаний системы тел, моделирующей продольную проекцию транспортного средства, можно получить, используя принцип Даламбера [26] для каждой массы модели:

$$\begin{aligned}
 M_1 \ddot{Z}(t) + F_1(v_1, \dot{v}_1) + F_2(v_2, \dot{v}_2) - M_1 g &= 0; \\
 J_1 \ddot{\varphi}(t) + F_1(v_1, \dot{v}_1) a_T - F_2(v_2, \dot{v}_2) b_T &= 0; \\
 m_1 \ddot{z}_1(t) - F_1(v_1, \dot{v}_1) + R_1(u_1, \dot{u}_1) - m_1 g &= 0; \\
 m_2 \ddot{z}_2(t) - F_2(v_2, \dot{v}_2) + R_2(u_2, \dot{u}_2) - m_2 g &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где $F_i(v_i, \dot{v}_i)$ и $R_i(u_i, \dot{u}_i)$ — силы линейного сопротивления в демпфере, моделирующем взаимодействие i -й колесной пары с кузовом и проезжей частью; $v_i = v_i(t)$ и $\dot{v}_i = \dot{v}_i(t)$ — вертикальное перемещение и скорость деформации демпфера над i -й осью; $u_i = u_i(t)$ и $\dot{u}_i = \dot{u}_i(t)$ — вертикальное перемещение и скорость деформации непосредственно колеса на i -й оси.

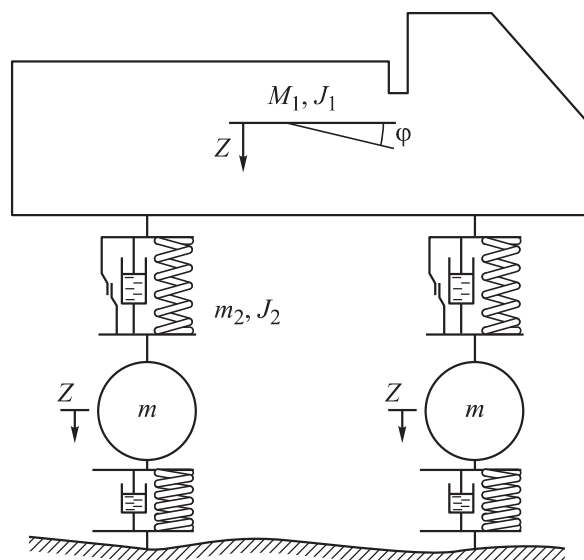


Рис. 4. Плоская модель двухосного автомобиля с четырьмя степенями свободы

В функциональные выражения для сил сопротивления F_i и R_i из системы (13) включены слагаемые, учитывающие диссипативные свойства за счет вязкоупругого тела типа Кельвина — Фойгхта и трения сухого скольжения, согласно модели Кулона, которые представлены в виде кусочно-линейных функций:

$$F_i(v_i, \dot{v}_i) = F_i(v_i) + k_{pi} \dot{v}_i + T_{pi} \text{sign}(\dot{v}_i), \quad R_i(u_i, \dot{u}_i) = R_i(u_i) + k_{ши} \dot{u}_i, \tag{14}$$

где k_{pi} , $k_{ши}$ — коэффициенты демпфирования вязкоупругого буфера и непосредственно колеса на i -й оси; T_{pi} — коэффициент сухого трения в буфере над i -й осью.

На основе найденного числа колесных осей, положения отдельных точек кузова и колеса в моменты времени до (или после) наезда на препятствие и при непосредственном положении колесной пары на искусственной неровности, кинематических составляющих рассматриваемых точек для составленной системы уравнений определяются динамические характеристики транспортного средства (нагрузки на ось колесных пар) и масса всего транспортного средства. При этом начальные условия для решения системы задаются с помощью искусственной неровности, геометрические характеристики которой известны (рис. 5).



Рис. 5. Движение автомобиля через искусственную неровность с известными размерами поперечного сечения:
a — перед искусственной неровностью, *б* — передняя колесная ось на искусственной неровности

Рассмотрим смещение кузовов $Z(t)$ автомобилей Хендэ Соната и Хендэ Солярис общей массой (с учетом водителя) 1650 и 1240 кг при наезде на искусственную неровность* с длиной хорды 0,7 м и максимальной высотой гребня 0,07 м [27] при скорости транспортного средства 25 км/ч (рис. 6, *a*), а также в зависимости от скорости транспортного средства (рис. 6, *б*).

Зная массу снаряженного экипажа и нагрузку, передаваемую на каждую ось, определенные с помощью специальных автомобильных весов или построения акселерограммы колебания проезжей части вблизи экипажа, можно рассчитать ускорения различных элементов автотранспорта и сделать вывод об оптимальности и безопасности режима его движения.

Еще одной вариацией задачи может быть определение самой массы экипажа и массы, приведенной к отдельной оси, из системы (13), а расчет

* ГОСТ Р 52605–2006. Технические средства организации дорожного движения. Искусственные неровности. Общие технические требования. Правила применения. М., Стандартинформ, 2007.

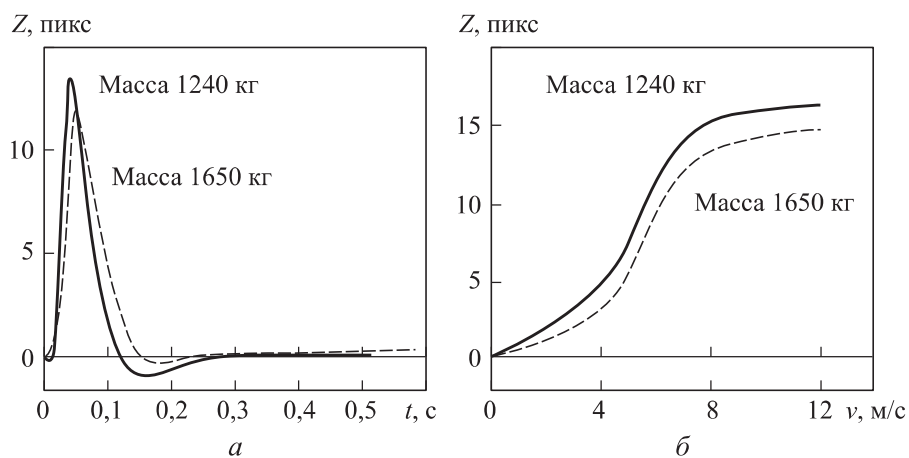


Рис. 6. Смещение кузова автомобиля при пересечении выпуклой искусственной неровности (а) и в зависимости от скорости автомобиля (б)

соответствующих ускорений предлагается проводить согласно методу анализа изображений экипажа, полученных до «лежачего полицейского» и в момент наезда на него.

На основе решения уравнений (13) и (14), численно интегрируемых инструментами MathCad, были получены следующие величины массы при разных скоростях для различных марок автомобилей (рис. 7).

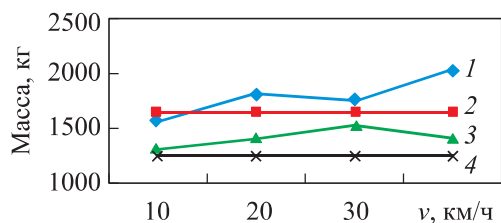


Рис. 7. Зависимость измеряемой (1, 3) и реальной (2, 4) масс автомобилей марок Хендэ Соната и Хендэ Солярис от скорости движения

Измеренная масса зависит от скорости движения объекта и в рассмотренном случае определяется со средней точностью 87 %.

Заключение. Описан подход к детектированию, распознаванию транспортных средств, выбору соответствующей математической модели, а также определению динамических характеристик объекта на основе полученных методом анализа контролируемого размытия геометрических и кинематических характеристик рассматриваемых точек, а также с учетом геометрического строения дорожного полотна. При этом существенным является определение требований к временному интервалу получения соответствующих фотографий и необходимой вычислительной мощности программно-аппаратного комплекса мониторинга движения транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бойков В.Н., Скворцов А.В., Сарычев Д.С. Цифровая автомобильная дорога как отраслевой сегмент цифровой экономики. *Транспорт Российской Федерации*, 2018, № 2, с. 56–60.
- [2] Onyesolu M., Udoka Eze F. Understanding virtual reality technology: advances and applications. *IntechOpen*, 2011, pp. 53–70. DOI: <https://doi.org/10.5772/15529>
- [3] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. Определение расстояния до объекта с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина. *Письма в ЖТФ*, 2007, т. 33, № 21, с. 72–77.
- [4] Mansour M., Ismail Y., Swillam M. Subwavelength focusing in the infrared range using a meta surface. *ACES*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.23919/ROPACES.2017.7916019>
- [5] Beder Chr., Bartczak B., Koch R. A comparison of PMD-cameras and stereo-vision for the task of surface reconstruction using patchlets. *IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recogn.*, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383348>
- [6] Wiedemann M., Sauer M., Driewer F., et al. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics. *Proc. 17th World Cong. Int. Federation of Automatic Control*. Seoul, 2008, pp. 46–51.
- [7] Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. Система технического зрения для измерения пути мобильного робота. *Механика, управление и информатика*, 2012, № 2, с. 219–224.
- [8] Loktev D.A., Loktev A.A. Determination of object location by analyzing the image blur. *Contemp. Eng. Sci.*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 467–475. DOI: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.52198>
- [9] Локтев А.А., Сычев В.П., Локтев Д.А. К задаче проектирования модуля визуального распознавания элементов верхнего строения пути на высокоскоростных магистралях. *Транспорт Российской Федерации*, 2017, № 1, с. 22–26.
- [10] Локтев А.А., Алфимцев А.Н., Локтев Д.А. Алгоритм размещения видеокамер и его программная реализация. *Вестник МГСУ*, 2012, № 5, с. 167–175.
- [11] Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: an incremental improvement. *arxiv.org: веб-сайт*. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1> (дата обращения: 15.12.2019).
- [12] Ross G. Fast R-CNN. *arxiv.org: веб-сайт*. URL: <https://arxiv.org/abs/1504.08083> (дата обращения: 15.12.2019).
- [13] Canny J.F. Finding edges and lines in images. Master's thesis. MIT, 1983.
- [14] Zhou Q., Aggarwal J. Tracking and classifying moving objects from video. *Performance Evaluation of Tracking Systems Workshop*, 2001.
- [15] Ramer U. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Comput. Graph. Image Process.*, 1972, vol. 1, no. 3, pp. 244–256.
- [16] Douglas D., Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 1973, vol. 19, no. 2, pp. 112–122.

- [17] Goldenshluger A., Zeevi A. The Hough transform estimator. *Ann. Stat.*, 2004, vol. 32, no. 5, pp. 1908–1932.
- [18] Кудрина М.А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2014, т. 16, № 4-2, с. 476–478.
- [19] Сычёв В.П., Локтев А.А., Локтев Д.А. и др. Повышение информативности оценки содержания железнодорожного пути. *Мир транспорта*, 2017, т. 15, № 2, с. 20–31.
- [20] Loktev D.A., Loktev A.A. Diagnostics of external defects of railway infrastructure by analysis of its images. *Proc. GloSIC*, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570083>
- [21] Bouguet J.-Y. Pyramidal implementation of the Lucas — Kanade feature tracker: description of the algorithm. Intel Corporation Microprocessor Research Labs, 2000.
- [22] Локтев А.А., Бахтин В.Ф., Черников И.Ю. и др. Методика определения внешних дефектов сооружения путем анализа серии его изображений в системе мониторинга. *Вестник МГСУ*, 2015, № 3, с. 7–16.
- [23] Елисеев В.В., Оборин Е.А., Миткин В.Г. Колебания автомобиля на неровной дороге: влияние динамических свойств подвески. *Теория механизмов и машин*, 2017, т. 15, № 1, с. 6–16.
- [24] Лопаницын Е.А. Моделирование вертикальных колебаний автомобиля. В: *Избранные проблемы прикладной механики и математики*. М., МГТУ МАМИ, 2003, с. 208–234.
- [25] Локтев Д.А., Кочнев В.А., Локтев А.А. Определение габаритов транспортных средств и их положения на проезжей части в системе видеомониторинга. *Наука и техника транспорта*, 2018, № 4, с. 62–69.
- [26] Loktev A.A., Loktev D.A. Transverse impact of a ball on a sphere with allowance for waves in the target. *Tech. Phys. Lett.*, 2008, vol. 34, no. 11, pp. 960–963.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785008110187>

Локтев Даниил Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные системы и телекоммуникации» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Локтев Д.А. Определение характеристик движущихся объектов с использованием «контролируемого» размытия изображения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 2, с. 98–116.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-98-116>

**DETERMINING MOVING OBJECT PROPERTIES
USING “CONTROLLED” IMAGE BLURRING**

D.A. Loktev

loktevdan@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper proposes an approach to detecting, capturing and identifying vehicles in an image in order to determine their geometrical, kinematic and dynamic properties. Monitoring the properties determined in real time will assist in detecting violations of vehicle regulations, in analysing and preventing potential accidents by means of using the parameters obtained to control vehicle motion, as well as in implementing a digital model of the environment, including its possible virtual reality representation. To detect the object, we employ the YOLOv3 algorithm using convolutional neural network training. Canny and Hough detectors are used to determine the object boundaries and its axle positions. We propose a method for determining the object boundary blurring based on numerically finding the first, second and third derivatives with respect to each coordinate axis and subsequently refining the result at different resolutions. After detecting the axles in a vehicle and determining their number via passive image analysis, a model of vertical oscillations is selected for the vehicle; the geometrical and kinematic parameters obtained are then used to assess the automotive vehicle dynamics. We describe in detail our vehicle model featuring two axles. We assume the parameters of an artificial obstacle such as a speed breaker to be the initial conditions of the oscillating system

Keywords

Parameter assessment, object detection, mass estimation, image analysis, object blurring, dynamics

Received 10.09.2019

Accepted 30.09.2019

© Author(s), 2020

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 2.5048.2017/8.9)

REFERENCES

- [1] Boykov V.N., Skvortsov A.V., Sarychev D.S. Digital motorway as an industry segment of digital economy. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2018, no. 2, pp. 56–60 (in Russ.).
- [2] Onyesolu M., Udoka Eze F. Understanding virtual reality technology: advances and applications. *IntechOpen*, 2011, pp. 53–70. DOI: <https://doi.org/10.5772/15529>

- [3] Usanov D.A., Skripal' A.V., Avdeev K.S. Determining distances to objects using a frequency-switched semiconductor laser autodyne. *Tech. Phys. Lett.*, 2007, vol. 33, no. 11, pp. 930–932. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785007110119>
- [4] Mansour M., Ismail Y., Swillam M. Subwavelength focusing in the infrared range using a meta surface. *ACES*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.23919/ROPACES.2017.7916019>
- [5] Beder Chr., Bartczak B., Koch R. A comparison of PMD-cameras and stereo-vision for the task of surface reconstruction using patchlets. *IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recogn.*, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383348>
- [6] Wiedemann M., Sauer M., Driewer F., et al. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics. *Proc. 17th World Cong. Int. Federation of Automatic Control*. Seoul, 2008, pp. 46–51.
- [7] Devyaterikov E.A., Mikhaylov B.B. Computer vision system for mobile robot path measuring. *Mekhanika, upravlenie i informatika*, 2012, no. 2, pp. 219–224 (in Russ.).
- [8] Loktev D.A., Loktev A.A. Determination of object location by analyzing the image blur. *Contemp. Eng. Sc.*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 467–475. DOI: <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2015.52198>
- [9] Loktev A.A., Sychev V.P., Loktev D.A. Contribution to the problem of designing a vision module for track superstructure elements on high-speed mainlines. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2017, no. 1, pp. 22–26 (in Russ.).
- [10] Loktev A.A., Alfimtsev A.N., Loktev D.A. Algorithm of placement of video surveillance cameras and its software implementation. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 5, pp. 167–175 (in Russ.).
- [11] Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: an incremental improvement. *arxiv.org: website*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1> (accessed: 15.12.2019).
- [12] Ross G. Fast R-CNN. *arxiv.org: website*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1504.08083> (accessed: 15.12.2019).
- [13] Canny J.F. Finding edges and lines in images. Master's thesis. MIT, 1983.
- [14] Zhou Q., Aggarwal J. Tracking and classifying moving objects from video. *Performance Evaluation of Tracking Systems Workshop*, 2001.
- [15] Ramer U. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Comput. Graph. Image Process.*, 1972, vol. 1, no. 3, pp. 244–256.
- [16] Douglas D., Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer*, 1973, vol. 19, no. 2, pp. 112–122.
- [17] Goldenshluger A., Zeevi A. The Hough transform estimator. *Ann. Stat.*, 2004, vol. 32, no. 5, pp. 1908–1932.
- [18] Kudrina M.A. Using Hough transformation for detecting lines and circles in pictures. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [Izvestia RAS SamSC]*, 2014, vol. 16, no. 4-2, pp. 476–478 (in Russ.).

- [19] Sychev V.P., Loktev A.A., Loktev D.A., et al. Increase in informative value of railway track maintenance assessment. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 20–31 (in Russ.).
- [20] Loktev D.A., Loktev A.A. Diagnostics of external defects of railway infrastructure by analysis of its images. *Proc. GloSIC*, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570083>
- [21] Bouguet J.-Y. Pyramidal implementation of the Lucas — Kanade feature tracker: description of the algorithm. Intel Corporation Microprocessor Research Labs, 2000.
- [22] Loktev A.A., Bakhtin V.F., Chernikov I.Yu., et al. Method of determining external defects of a structure by analyzing a series of its images in the monitoring system. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 3, pp. 7–16 (in Russ.).
- [23] Eliseev V.V., Oborin E.A., Mitkin V.G. Vehicle vibrations on uneven road: influence of dynamic properties of suspension. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines], 2017, vol. 15, no. 1, pp. 6–16 (in Russ.).
- [24] Lopanitsyn E.A. Modelirovanie vertikal'nykh kolebaniy avtomobilya [Modeling of vehicle vertical vibrations]. V: *Izbrannye problemy prikladnoy mekhaniki i matematiki* [In: Selected problems of applied mechanics and mathematics]. Moscow, MSTU MAMI Publ., 2003, pp. 208–234 (in Russ.).
- [25] Loktev D.A., Kochnev V.A., Loktev A.A. Prediction of occurrence of deviations from railway track maintenance standards before the fault affecting the transportation process. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport], 2018, no. 4, pp. 62–69 (in Russ.).
- [26] Loktev A.A., Loktev D.A. Transverse impact of a ball on a sphere with allowance for waves in the target. *Tech. Phys. Lett.*, 2008, vol. 34, no. 11, pp. 960–963.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785008110187>

Loktev D.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Information Systems and Telecommunications, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Loktev D.A. Determining moving object properties using “controlled” image blurring. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 2, pp. 98–116 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-2-98-116>