

УДК: 004.932

Анализ изображений в системах управления беспилотными автомобилями на основе модели энергетических признаков

М. П. Шлеймович^a, М. В. Дагаева^b, А. С. Катасёв^c,
С. А. Ляшева^d, М. В. Медведев^e

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ,
Россия, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

E-mail: ^aShlch@mail.ru, ^bDagaevam@rambler.ru, ^cKat_726@mail.ru,
^dStellyash@mail.ru, ^eMmedv@mail.ru

Получено 28.02.2018, после доработки — 30.05.2018.

Принято к публикации 30.05.2018.

В статье показана актуальность научно-исследовательских работ в области создания систем управления беспилотными автомобилями на основе технологий компьютерного зрения. Средства компьютерного зрения используются для решения большого количества различных задач, в том числе для определения местоположения автомобиля, обнаружения препятствий, определения пригодного для парковки места. Данные задачи являются ресурсоемкими и должны выполняться в реальном режиме времени. Поэтому актуальна разработка эффективных моделей, методов и средств, обеспечивающих достижение требуемых показателей времени и точности для применения в системах управления беспилотными автомобилями. При этом важное значение имеет выбор модели представления изображений. В данной работе рассмотрена модель на основе вейвлет-преобразования, позволяющая сформировать признаки, характеризующие оценки энергии точек изображения и отражающие их значимость с точки зрения вклада в общую энергию изображения. Для формирования модели энергетических признаков выполняется процедура, основанная на учете зависимостей между вейвлет-коэффициентами различных уровней и применении эвристических настроечных коэффициентов для усиления или ослабления влияния граничных и внутренних точек. На основе предложенной модели можно построить описания изображений для выделения и анализа их характерных особенностей, в том числе для выделения контуров, регионов и особых точек. Эффективность предлагаемого подхода к анализу изображений обусловлена тем, что рассматриваемые объекты, такие как дорожные знаки, дорожная разметка или номера автомобилей, которые необходимо обнаруживать и идентифицировать, характеризуются соответствующими признаками. Кроме того, использование вейвлет-преобразований позволяет производить одни и те же базовые операции для решения комплекса задач в бортовых системах беспилотных автомобилей, в том числе для задач первичной обработки, сегментации, описания, распознавания и сжатия изображений. Применение такого унифицированного подхода позволит сократить время на выполнение всех процедур и снизить требования к вычислительным ресурсам бортовой системы беспилотного автотранспортного средства.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, система управления, компьютерное зрение, обработка и анализ изображений, вейвлет-преобразование, модель энергетических признаков изображения

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания по проекту № 2.1724.2017/4.6.

UDC: 004.932

The analysis of images in control systems of unmanned automobiles on the base of energy features model

M. P. Shleymovich^a, M. V. Dagaeva^b, A. S. Katasev^c,
S. A. Lyasheva^d, M. V. Medvedev^e

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev,
10 K. Marx st., Kazan, 420111, Russia

E-mail: ^aShlch@mail.ru, ^bDagaevam@rambler.ru, ^cKat_726@mail.ru,
^dStellyash@mail.ru, ^eMmedv@mail.ru

Received 28.02.2018, after completion — 30.05.2018.

Accepted for publication 30.05.2018.

The article shows the relevance of research work in the field of creating control systems for unmanned vehicles based on computer vision technologies. Computer vision tools are used to solve a large number of different tasks, including to determine the location of the car, detect obstacles, determine a suitable parking space. These tasks are resource intensive and have to be performed in real time. Therefore, it is important to develop effective models, methods and tools that ensure the achievement of the required time and accuracy for use in unmanned vehicle control systems. In this case, the choice of the image representation model is important. In this paper, we consider a model based on the wavelet transform, which makes it possible to form features characterizing the energy estimates of the image points and reflecting their significance from the point of view of the contribution to the overall image energy. To form a model of energy characteristics, a procedure is performed based on taking into account the dependencies between the wavelet coefficients of various levels and the application of heuristic adjustment factors for strengthening or weakening the influence of boundary and interior points. On the basis of the proposed model, it is possible to construct descriptions of images their characteristic features for isolating and analyzing, including for isolating contours, regions, and singular points. The effectiveness of the proposed approach to image analysis is due to the fact that the objects in question, such as road signs, road markings or car numbers that need to be detected and identified, are characterized by the relevant features. In addition, the use of wavelet transforms allows to perform the same basic operations to solve a set of tasks in onboard unmanned vehicle systems, including for tasks of primary processing, segmentation, description, recognition and compression of images. The such unified approach application will allow to reduce the time for performing all procedures and to reduce the requirements for computing resources of the on-board system of an unmanned vehicle.

Keywords: unmanned automobile, control system, computer vision, image processing and analysis, wavelet transform, model of energy features of image

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 369–376 (Russian).

The work was supported by the Russian Federation Ministry of Education and Science, project no. 2.1724.2017/4.6.

1. Введение

Для развития различных отраслей экономики и обеспечения обороноспособности особое значение имеет решение транспортных задач с помощью беспилотных автомобилей, под которыми понимаются транспортные средства, оборудованные системами автоматического управления и способные передвигаться без участия человека [Ендачев, 2016]. В настоящее время работы по созданию беспилотных автомобилей ведут практически все зарубежные автопроизводители, в том числе General Motors, Ford, Mercedes Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Volvo, Cadillac. Значительный объем работ проводится по закрытой тематике в рамках оборонного заказа, по этой причине результаты исследований практически не публикуются в открытой печати. Сложные наукоемкие технические решения, программное обеспечение, датчики систем управления беспилотных автомобилей во многих странах отнесены к продукции двойного назначения.

Основные достоинства беспилотных автотранспортных средств заключаются в возможности обеспечения перевозки грузов в опасных для жизни людей условиях, снижении затрат на выполнение транспортных работ, возможности централизованного управления транспортным потоком, уменьшении числа человеческих жертв в дорожно-транспортных происшествиях. Эффективность беспилотных автомобилей зависит от систем управления движением. Примерами практических результатов в данной области являются:

- полуавтоматическая система Temporary Auto Pilot для обеспечения оптимальной степени автоматизации в зависимости от дорожной ситуации и состояния водителя (Volkswagen);
- система Traffic Jam Assistant для управления движением в пробках (Audi);
- система Connected Drive Connect для управления движением по автомагистрали (BMW);
- система автоматического управления Super Cruise для обеспечения маневрирования, торможения и движения по полосе на автомагистрали (Cadillac);
- система Safe Road Trains for the Environment для обеспечения движения автомобилей по дороге в организованной колонне (Volvo).

Таким образом, для преодоления отрыва от зарубежных производителей беспилотных транспортных средств, которые начали вести активные разработки еще в 1980-х годах, одним из наиболее приоритетных научно-технических отечественных направлений является развитие собственных беспилотных автомобилей.

Создание беспилотных автотранспортных средств требует применения множества технологий. При этом важное значение имеют технологии компьютерного зрения, применяемые, например, для решения задач определения местоположения автомобиля, обнаружения препятствий, определения пригодного для парковки места и др. Указанные задачи являются ресурсоемкими и должны выполняться в реальном режиме времени. Поэтому актуальна разработка эффективных моделей, методов и средств, обеспечивающих достижение требуемых показателей времени и точности при решении указанных задач.

В основе процедур, реализуемых средствами компьютерного зрения, лежат модели и методы обработки и анализа изображений. Изображения, как правило, представляют собой значительные по объему массивы данных. Их обработка требует применения большого количества процедур, таких как:

- первичная обработка (шумоподавление, яркостная коррекция, геометрические преобразования),
- сегментация (бинаризация, выделение контуров, выделение однородных по текстуре, яркости или цвету областей),
- описание (формирование дескрипторов точек, границ и областей),
- распознавание (обнаружение и идентификация заданных объектов),
- анализ (определение размеров, скорости и направления движения),
- сжатие (сокращение избыточности).

Поэтому актуально создание алгоритмов комплексной обработки изображений, основанных на одних и тех же математических моделях и процедурах.

2. Выбор модели представления изображений

За последние десятилетия создано множество успешных систем компьютерного зрения, в которых в тех или иных сочетаниях реализованы различные подходы и парадигмы. Однако единого математического формализма и единой общепризнанной методики разработки алгоритмов анализа изображений в данных системах не существует.

При проектировании систем для беспилотных автомобилей на базе средств компьютерного зрения возникает ряд трудностей, связанных с ограничениями программно-аппаратных средств и условиями их функционирования. Их преодоление возможно только в процессе разработки новых эффективных моделей и методов обработки и анализа изображений для решения конкретных задач.

При разработке средств компьютерного зрения для применения в системе управления беспилотным автомобилем важное значение имеет выбор модели представления изображений. При этом необходимо определить признаки изображений, которые будут использоваться в рамках выбранной модели. Обычно рассматривают признаки цвета, текстуры, формы и структуры, которые позволяют описать изображения с точки зрения их цветового содержания, пространственного распределения цветов или яркости, характеристик регионов, наличия определенных объектов и их взаимного расположения. Среди различных моделей представления изображения часто применяются модели их характерных особенностей, к которым относят контуры, регионы и точки интереса.

Контурные модели основаны на выделении и анализе границ между областями на изображении. Для их построения широко применяются методы, основанные на морфологических операторах и операторах производных Робертса, Превитта, Собеля, Лапласа и др. [Гонсалес, Вудс, 2012].

Модели регионов описывают цветное или текстурное содержание областей изображений. Они строятся на базе цветовых и текстурных признаков, примерами которых являются гистограмма цветов [Long et al., 2003], вектор цветовой связности [Pass, Zabih, 1996], коррелограмма цветов [Huang et al., 1999], цветовые моменты [Stricker, Orengo, 1995], дескриптор доминантного цвета [Deng et al., 2001], статистические текстурные признаки [Гонсалес, Вудс, 2012], локальные бинарные шаблоны [Pietikinen et al., 2011], спектральные признаки [Tuceryan et al., 1998], признаки Тамуры [Tamura et al., 1978] и др.

Модели точек интереса основаны на детектировании и описании так называемых ключевых или особых точек. Для этого используются соответствующие детекторы и дескрипторы. Первые предназначены для поиска особых точек на изображениях, а вторые — для их описания. В настоящее время существует множество используемых на практике детекторов и дескрипторов, например детектор Моравеца, детектор Хариса, SUSAN, SIFT, SURF, FAST, BRIEF, ORB, GLOH, FREAK, BRISK [Awad, Hassaballah, 2016; Fan et al., 2015].

Для решения различных задач обработки и анализа изображений в бортовой системе беспилотного автомобиля наиболее оптимальным является применение таких методов, которые базируются на одних и тех же преобразованиях. Это обуславливает эффективность подходов, основанных на вейвлет-преобразовании [Tang, 2009].

3. Использование вейвлет-преобразований для анализа изображений

Вейвлет-преобразование в самом общем виде представляется следующим образом [Addison, 2002]:

$$Wf(\mathbf{u}, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{x}) \frac{1}{s^{D/2}} \psi^* \left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{u}}{s} \right) d\mathbf{x},$$

где Wf — результат преобразования, f — исходная функция, ψ^* — комплексное сопряжение сдвинутой и масштабированной функции ψ , которая имеет нулевое среднее значение, центр в нулевой точке и единичную норму, D — размерность сигнала, \mathbf{u} — D -мерный вектор параметров сдвига, s — параметр масштаба.

Для цифровых изображений часто применяют дискретные ортогональные кратномасштабные вейвлет-преобразования, в основе которых лежит представление дискретной функции $f(\mathbf{x})$, описывающей исходный сигнал в виде разложения по ортогональным базисным функциям. Данные базисные функции имеют вид

$$\begin{aligned} \phi_{j,k}(x) &= 2^{j/2} \phi(2^j x - k), \\ \psi_{i,k}(x) &= 2^{j/2} \psi(2^i x - k), \end{aligned}$$

где ϕ и ψ — масштабирующая функция и функция материнского вейвлета, которые определяют вид используемого вейвлет-преобразования.

В результате вейвлет-преобразования функция представляется в виде суммы:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} a_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(x) + \sum_{i=j_0}^J \sum_{k=0}^{2^i-1} d_{i,k} \psi_{i,k}(x),$$

где J — число уровней разложения, j_0 — наименьший уровень разложения, $a_{j_0,k}$ — вейвлет-коэффициент аппроксимации, $d_{i,k}$ — вейвлет-коэффициент детализации.

Таким образом, функция описывается множеством вейвлет-коэффициентов аппроксимации и детализации [Малла, 2005].

Вейвлет-преобразования одноканальных (например, полутонных) изображений обычно реализуются в два этапа: сначала выполняется преобразование для строк, а затем для столбцов (либо наоборот). Результаты преобразования на j -м уровне группируются в матрицу аппроксимирующих коэффициентов $[LL_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$ и матрицы детализирующих горизонтальных $[LH_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$, вертикальных $[HL_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$ и диагональных $[HH_{j,m,n}]_{m,n=0}^{2^j-1}$ коэффициентов.

Для многоканальных (например, цветных) изображений каждый канал подвергается преобразованию по отдельности.

Для ортонормированного вейвлет-преобразования справедливо следующее:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} f_{k,l}^2 &= \sum_{m=0}^{2^{j_0}-1} \sum_{n=0}^{2^{j_0}-1} LL_{j_0,m,n}^2 + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} LH_{j,m,n}^2 + \\ &+ \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} HL_{j,m,n}^2 + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \sum_{n=0}^{2^j-1} HH_{j,m,n}^2, \end{aligned} \tag{1}$$

где $f_{k,l}$ — яркость точки изображений, $LL_{j,m,n}$, $LH_{j,m,n}$, $HL_{j,m,n}$, $HH_{j,m,n}$ — вейвлет-коэффициенты.

Суммы в правой части равенства (1) показывают вклад коэффициентов различных уровней в общую энергию изображения на различных масштабах. Этот вклад позволяет получить оценки энергии каждой точки изображения.

На основе равенства (1) можно предложить следующую процедуру вычисления оценок энергии точек изображения:

- 1) выполнить преобразование до уровня j_0 ;
- 2) положить $w_{j_0-1,m,n}^2 = K'_{j_0-1} LL_{j_0,m,n}^2$;

3) последовательно для $j = j_0, \dots, J-1$, где $J = \log_2 N$, $m = 0, 1, \dots, 2^{j+1} - 1$, $n = 0, 1, \dots, 2^{j+1} - 1$, вычислить оценки энергии:

$$w_{j,m,n}^2 = K'_j w_{j-1,m,n}^2 + K''_j \times [LH_{j,m/2,n/2}^2 + HL_{j,m/2,n/2}^2 + HH_{j,m/2,n/2}^2].$$

Использование настроечных коэффициентов K'_j и K''_j позволяет обеспечить оптимальное вычисление множества значений $\{w_{k,l}\}_{k,l=0}^{N-1}$ в соответствии с решаемой задачей. В этом случае данные значения можно считать весами точек. Таким образом, можно построить весовое изображение, в котором каждой точке будет сопоставлен ее вес — оценка энергии данной точки. Само весовое изображение представляет собой модель энергетических признаков.

4. Анализ изображений на основе модели энергетических признаков

На основе модели энергетических признаков можно построить эффективные описания изображений для выделения и анализа их характерных особенностей. Например, можно так подобрать настроечные коэффициенты, которые обеспечат большие значения весов у граничных точек по сравнению со значениями весов внутренних точек областей, что, в свою очередь, позволит выделить границы на изображениях. Если же рассматривать распределение весов точек изображения, то можно получить описание текстуры, характеризующее его различные регионы. Также можно выделить и описать особые точки, под которыми подразумеваются точки с наибольшими весами в окрестностях заданных размеров.

Эффективность применения предлагаемого подхода к анализу изображений в бортовых системах беспилотных автомобилей обуславливается тем, что объекты (например, дорожные знаки, дорожная разметка или номера автомобилей), которые необходимо идентифицировать, характеризуются контурами. На рис. 1 и 2 показаны результаты построения моделей энергетических признаков в виде весовых изображений (рис. 1, а и рис 2, а) для изображений дорожно-го знака (рис. 1, б) и дорожной разметки (рис. 2, б).

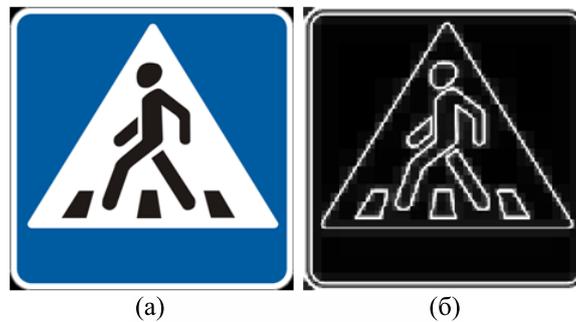


Рис. 1. Модель энергетических признаков изображения дорожного знака

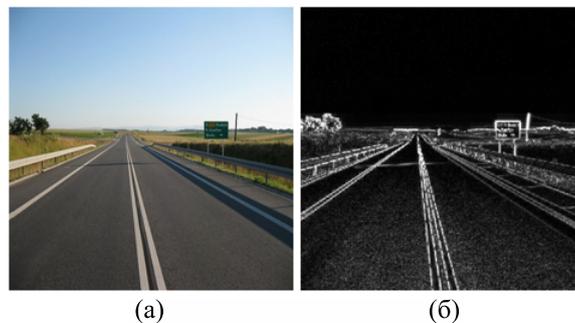


Рис. 2. Модель энергетических признаков изображения дорожной разметки

Как видно из представленных рисунков, модель энергетических признаков изображений позволяет достаточно точно выделять имеющиеся на них контуры.

5. Заключение

Применение представленной модели энергетических признаков позволяет обеспечить эффективное описание изображений для их последующей обработки и анализа.

Использование вейвлет-преобразования дает возможность использовать одни и те же базовые операции для решения комплекса задач в бортовых системах беспилотного автомобиля, в том числе первичной обработки, сегментации, описания, распознавания и сжатия изображений. Применение такого унифицированного подхода позволит сократить время на выполнение всех процедур и требования к вычислительным ресурсам бортовой системы беспилотного транспортного средства.

Научно-исследовательские работы в данном направлении соответствуют дорожной карте Национальной технологической инициативы «Автонет» в рамках тематики «Элементы системы компьютерного зрения беспилотного автомобиля». Она позволяет внести вклад в преодоление следующих основных технологических барьеров для российских производителей:

- необходимость обеспечения безопасности (в том числе качества управления) при использовании автомобилей с интеллектуальными системами на дорогах общего пользования;
- необходимость повышения автономности автомобилей с интеллектуальными системами (общие технологии робототехники);
- требования по обеспечению большой продолжительности автономного движения и снижению операционной стоимости.

Кроме того, следует отметить, что предложенный подход имеет более общий характер и может быть применен для обнаружения и распознавания объектов в различных системах, базирующихся на методах и средствах компьютерного зрения [Lyasheva et al., 2014; Shleymovich et al., 2017; Shleymovich et al., 2016].

Список литературы (References)

- Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2012.
Gonsales R., Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij [Digital image processing]. — Moscow: Technosfera, 2012 (in Russian).
- Ендачев Д. В.* Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля. — М.: ФГУП «НАМИ», 2016.
Endachev D. V. Prognozirovanie kharakteristik krivolinejnogo dvizheniya bespilotnogo avtomobilya [Predicting the characteristics of the curvilinear motion of an unmanned vehicle]. — Moscow: FGUP «NAMI», 2016 (in Russian).
- Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов. — М.: Мир, 2005.
Malla S. Veyvlety v obrabotke signalov [Wavelets in signal processing]. — Moscow: Mir, 2005 (in Russian).
- Addison P. S.* The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. — Institute of Physics Publishing, 2002. — 368 p.
- Awad A. I., Hassaballah M.* Image Feature Detectors and Descriptors. Springer, 2016. — 438 p.
- Deng Y., Manjunath B. S., Kenney Ch., Moore M. S., Shin H.* An efficient color representation for image retrieval // IEEE Transactions on image processing. — 2001. — Vol. 10, No. 1. — P. 140–147.
- Fan B., Wang Z., Wu F.* Local Image Descriptor: Modern Approaches. Springer, 2015. — 108 p.
- Huang J., Kumar S. R., Mitra M., Zhu W.-J., Zabih R.* Spatial Color Indexing and Applications // International Journal of Computer Vision. — 1999. — Vol. 35 (3). — P. 245–268.

- Long F., Zhang H., Feng D.* Fundamentals of content-based image retrieval // Multimedia Information Retrieval and Management — Technological Fundamentals and Applications. — Springer-Verlag, 2003. — P. 1–26.
- Lyasheva S. A., Medvedev M. V., Shleimovich M. P.* Terrain object recognition in unmanned aerial vehicle control system // Russian Aeronautics. — 2014. — Vol. 57, No. 3. — P. 303–306.
- Pass G., Zabih R.* Histogram refinement for content-based image retrieval // IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. — 1996. — P. 96–102.
- Pietikinen M., Hadid A., Zhao G., Ahonen T.* Computer Vision Using Local Binary Patterns. — Springer, 2011.
- Shleymovich M. P., Medvedev M. V., Lyasheva S. A.* Image analysis in unmanned aerial vehicle on-board system for objects detection and recognition with the help of energy characteristics based on wavelet transform // Proceedings of SPIE. — 2017. — Vol. 10342.
- Shleymovich M. P., Medvedev M. V., Lyasheva S. A.* Object detection in the images in industrial process control systems based on salient points of wavelet transform analysis // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 — Proceedings 7911633, 2016.
- Stricker M., Orengo M.* Similarity of Color Images // Proceedings of the SPIE Conference. — 1995. — Vol. 2420. — P. 381–392.
- Tamura H., Mori S., Yamawaki T.* Texture features corresponding to visual perception // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1978. — Vol. SMC-8, No. 6. — P. 460–473.
- Tang Y. Y.* Wavelet Theory and Its Application to Pattern Recognition. — World Scientific Publishing Company, 2009. — 482 p.
- Tuceryan M., Jain A. K., Chen C., Pau L. F., Wang P. S.* Texture analysis // The Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision (2nd edition). — World Scientific Publishing Co., 1998. — P. 207–248.