

УДК 004.896; 681.786.2

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ “АВТОНИВА”

В.Е. Павловский (*vlpavl@mail.ru*),

К.И. Кий (*konst.i.kiy@gmail.com*),

И.А. Орлов (*orlovbel@gmail.com*),

А.П. Алисейчик (*atooxa@gmail.com*)

Институт Прикладной Математики им. М.В. Келдыша РАН,
Москва

Аннотация. В работе описаны функции и главные алгоритмы подсистемы СТЗ АвтоНИВА, работающей с цветными телевизионными изображениями. Данная подсистема основана на новом, специальном сжатом описании каждого кадра, которое позволяет решать задачи нахождения и распознавания объектов в реальном времени, минимизируя обращения к исходному массиву изображения на стандартном персональном компьютере. Описана система выделения препятствий на пути движения автомобиля по дальномерным данным. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ.¹

Ключевые слова: автономное вождение, сегментация изображений, понимание изображений.

Введение

С середины 80-х годов прошлого века начался интенсивный поток работ по созданию систем компьютерного зрения для обеспечения беспилотного движения автомобилей по дороге. В конце 80-х несколько исследовательских групп (включая одну советскую группу) смогли реализовать автономное движение по дорогам. В последнее время имеются значительные достижения в создании роботов-автомобилей для движения по дорогам общего пользования. Опытные образцы автомобилей-роботов имеются у многих ведущих фирм производителей автотранспорта. В частности продвинутые образцы автомобилей-роботов имеются у Daimler, Google и других компаний. Google-vehicle регулярно

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-08-00880).

ездит по дорогам, и отчеты о его поездках можно найти на сайте компании Google. Несмотря на большие достижения, имеются направления развития компьютерного зрения, которые требуют дальнейшего развития и являются высоко актуальными. Это связано как с расширением условий, в котором возможно использовать авто-водителя и увеличением списка задач решаемых системой, так и с обеспечением значительного удешевления использованного оборудования. В работе описана подсистема СТЗ беспилотного автомобиля “АвтоНИВА” для обеспечения автономного движения по дорогам, основанная на новом подходе к сегментации, описанию, и пониманию цветных изображений.

1 Конструкция информационной системы

Конструкция информационной системы приведена на рис.1.

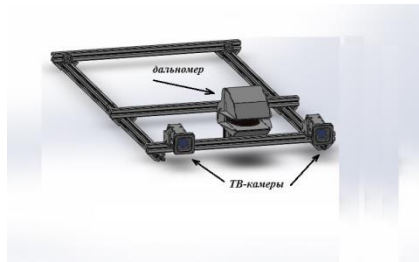


Рис.1. Конструкция информационной системы

Как показывает рис.1, система имеет специальную раму, на которой закреплены дальномер и две телекамеры. В качестве дальномера применен лазерный дальномер SICK, ТВ-камеры – профессиональные камеры VEC-255-IP с Ethernet-протоколом (2.0 Mpix). Рама крепится на крыше автомобиля, а сенсоры крепятся на раме так, что можно легко менять их позиции и настраивать систему на наиболее эффективную работу.

2 Задачи и принципы построения подсистемы СТЗ, основанной на обработке цветных изображений

Предлагаемые алгоритмы понимания дорожных сцен основаны на методе геометризованных гистограмм, описанном в [Kiy, 2010], [Kiy, 2015a], [Kiy, 2015b]. Данный метод является далеким развитием метода, примененного одним из авторов данной статьи в успешном советском проекте по автономному движению по дорогам [Kiy et al., 1995].

2.1 Теоретические основы алгоритмов понимания дорожных сцен в СТЗ

С помощью техники, разработанной в [Kiy, 2010], [Kiy, 2015a], [Kiy, 2015b], каждому цветному изображению ставится в соответствие граф цветовых сгустков STG . Для построения STG изображение разбивается на полосы одинаковой ширины, параллельные горизонтальной или вертикальной оси плоскости изображения Os . Каждая полоса описывается множеством цветовых сгустков. Каждый цветовой сгусток b характеризуется следующими параметрами: 1. интервал $[beg_b, end_b]$ – начало и конец b на оси Os ; $\Delta_H^b = [H_{min}^b, H_{max}^b]$ и H_{mean}^b – диапазон и среднее значение цветового оттенка b ; $\Delta_S^b = [S_{min}^b, S_{max}^b]$ и S_{mean}^b – диапазон и среднее значение цветового насыщения; $\Delta_I^b = [I_{min}^b, I_{max}^b]$ и I_{mean}^b – диапазон и среднее значения полутоновой компоненты, и мощность сгустка $Card^b$ (приблизительно, число точек в прообразе интервала в полосе, которые имеют цветовые характеристики, принадлежащие диапазонам цветового сгустка). Неформально, каждый сгусток дает описание некоторой части реального объекта в полосе, его проекцию на ось Os и описание значений численных характеристик этой части объекта. STG можно интерпретировать геометрически с помощью наложения отрезков его сгустков ($[beg_b, end_b]$) на центральную линию соответствующей полосы. Описание изображений с помощью цветовых сгустков сжимает информации об изображении с миллионов пикселей до нескольких сотен цветовых сгустков. Определяется подмножество доминирующих цветовых сгустков, отношение соседства между ними и определяется степень контрастности соседних цветовых сгустков. Многие задачи по поиску ориентиров и объектов в кадре, можно переформулировать строго как задачи поиска некоторых абстрактных объектов на графе цветовых сгустков. Для этих целей в [Kiy, 2015a] введены понятия левых и правых контрастных кривых на STG и определен двудольный граф левых и правых контрастных кривых LRG . Если изображение разбито на горизонтальные полосы, то неформально левая или правая контрастная кривая есть цепочка цветовых сгустков в соседних полосах с подобными цветовыми характеристиками. Отметим, что левые или правые концы цветовых сгустков меняются от полосы к полосе “непрерывно”, и соседние в той же полосе слева или справа цветные сгустки имеют контрастные цветовые характеристики. Левая и правая контрастные кривые соединены ребром в LRG , если часть сгустков, их образующих, можно соединить цепочками других цветовых сгустков в одной и той же полосе без контрастных переходов. Связные компоненты в LRG определяют контура на изображении, которые являются границами областей и снабжены информацией о цветовых параметрах этих областей. Рисунок 2 (левая часть) показывает цветовые

сгустки, наложенные на средние линии полос. Набор левых и правых контрастных кривых из связной компоненты определяет форму полученной области.

Правые и левые контрастные кривые, соответствующие дороге и области растительности представлены на Рис. 2. Границы растительности на изображении, образованном цветовыми сгустками, выделены красными вертикальными отрезками. В данном случае они совпадают с границами дороги. Заметим, понятие левой (правой) контрастной кривой гораздо шире обычных контуров, так как они содержат информацию об области, лежащей слева (справа) от контура, определяемого границами отрезков цветовых сгустков.

На множестве доминирующих цветовых сгустков удастся задать структуру полной упорядоченности (перенумеровать доминирующие цветовые сгустки от 0 до некоторого k). Построенное упорядочивание (сгустки перенумерованы с сохранением отношения соседства) позволяет построить граф соседства ADG (adjacency graph) для построенных контрастных объектов в STG . Граф ADG позволяет собирать сложные реальные объекты, которые состоят из разнородных частей. В этом графе устанавливаются отношения не только между объектами, которые непосредственно граничат друг с другом, но и между объектами изображения, разделенными заслонениями от других объектов. Например, с помощью графа ADG можно восстанавливать связи между частями дороги, связь между которыми прервана заслонениями от других транспортных средств, участвующих в движении. Новым результатам, связанным с детальным построением и применением графа ADG посвящена работа автора, находящаяся в печати [Киу, 2017].



Рис. 2. Цветовые сгустки с выделенной границей растительности и левые и правые контрастные кривые, соответствующие дороге и растительности.

2.2. Объекты и ориентиры, выделяемые при анализе дорожных сцен и алгоритмы для их нахождения

На основе предложенной теории в СТЗ робота “АвтоНИВА” разрабатываются алгоритмы поиска ключевых объектов и ориентиров нескольких типов. К ключевым объектам относятся полотно дороги, разметка на ней, другие участники движения, характерные участки на них

(габариты, сигналы поворота, торможения), растительность в окрестности дороги, другие объекты в ее окрестности и область неба в кадре.

Также разрабатываются алгоритмы для поиска светофоров и понимания их состояния и алгоритмы поиска окрашенных конусов для обозначения строительных работ на дороге. Поскольку робот-автомобиль предназначен для движения по стандартным российским дорогам, включая проселочные дороги, это предъявляет особые требования к набору ключевых элементов, характеризующих дорогу, так как разметка может отсутствовать или быть сильно поврежденной ввиду климатических условий (особенно в конце зимы или весной). Также в виду присутствия других участников движения, значительные части дороги могут быть заслонены. Поэтому существенное внимание уделено анализу окрестности дороги.

Используя представление цветного изображения дорожной сцены с использованием графов *STG*, *LRG* и *ADG*, разработаны и реализованы в виде программного комплекса системы рассуждений для поиска области дороги, растительности в окрестности дороги, ее границы в окрестности дороги, строительных конусов на дороге.

В общем случае, каждый из объектов (растительность, дорога, небо) может состоять из нескольких разнородных контрастных объектов и не может быть выделен заданием каких-то порогов цветовых или яркостных характеристик. Для неба эти разнородные контрастные объекты состоят из кусков чистого неба, освещенных разным образом, зон облаков, имеющих разную плотность и также освещенных разным образом. Кроме того, яркость части облаков может быть ниже, чем яркость дороги смыкающейся с ней (при движении на подъем), и, как правило, она меньше окружения дороги из-за снега зимой. Особенно сложной становится задача выделения неба в городских условиях. Аналогичным образом, дорога с лужами, влажными пятнами, пятнами грязи, трещинами и дефектами покрытия также является сложным объектом для распознавания. Например, лужи, расположенные у края дороги, могут отражать растительность и иметь ее цветовые и яркостные характеристики. Влажные области в конце дороги также могут иметь цветовые и яркостные характеристики участков неба и фактически с ними смыкаться. Только тонкий анализ формы (сходящийся характер границ участка дороги) и анализ соседних объектов (тонкая полоска растительности между дорогой и небом) позволяют различить эти разные объекты. Сегментация, выделение контрастных объектов на изображении с помощью методов, представленных в [Kiy, 2010], [Kiy, 2015a], [Kiy, 2015b] позволяет найти достаточно большие относительно однородные части реальных объектов (дорога, растительность, лужи, части неба, и т.д.), описать их форму и цветовые и яркостные характеристики. С

помощью разработанной теории удастся описать граф пространственных связей (отношение соседства) между построенными частями объектов. Построенные системы рассуждений взвешивают данные о положении объектов в кадре, их цветовых и яркостных характеристиках, отношении соседства, чтобы собрать цветовые сгустки, соответствующие области дороги, растительности или неба. Например, область, по цветовым параметрам близкая к небу расположенная в верхней части кадра, но имеющая сходящиеся границы и "накрытая" сверху растительностью, будет отнесена к дороге. А область с расходящимися границами и лежащая над растительностью и имеющая сверху области неба будет отнесена к небу. Зона растительности, имеющая в достаточно близкой окрестности зону дороги и с противоположной стороны зону растительности такую, что границы обеих зон сходятся, считается зоной растительности, ограничивающей дорогу и т. д. Участки близкие к положению неба, имеющие близкие цветовые и яркостные характеристики, но имеющие прямолинейные границы и (или) структуры, похожие на окна, исключаются из области неба. Рисунок 2 показывает кадры областей неба в кадре, выделенных системой в разных видеопоследовательностях. Цветовые сгустки, принадлежащие к небу, нарисованы черным цветом.



Рис. 3. Цветовые сгустки, принадлежащие небу, наложенные на изображения.

2.3 Программная реализация и эксперименты с СТЗ

Пакет программ для СТЗ робота "АвтоНИВА" написан на C++ и работает в операционной системе Linux (Ubuntu 16). Для ввода изображений и записи результатов испытаний используются возможности OpenCV.

Разработанные программы отработаны на большом числе видеопоследовательностей, снятых при движении автомобилей. Программы визуализации результатов использованы при подготовки иллюстраций настоящей статьи.

3. Алгоритм обнаружения препятствий

При движении автомобиля по дороге, особенно по проселочной дороге, на пути могут возникать отдельные препятствия. Для их

обнаружения в комплексе "АвтоНИВА" применен алгоритм, разработанный для использования дальномерных данных. Этот алгоритм реализован как эвристический продукционный алгоритм, он может настраиваться на технические параметры мобильного аппарата, в частности, на параметры автомобиля "НИВА" (размеры и т.п.).

3.1. Описание алгоритма

Дальномер позволяет получить облако точек, до которых известны расстояния, а потому могут быть легко вычислены трехмерные координаты эти точек. Поскольку точки продуцируются дальномером в известном порядке, на них можно построить триангуляционную сетку St . Вычисления алгоритма производятся на этой сетке с целью обнаружения резких скачков направлений нормалей к треугольникам сетки St , характерных для препятствий.

Введем вектор m_i маркировки треугольников сетки St . Этот вектор определяет раскраску сетки, при которой каждый треугольник с номером k может быть отнесен к одному из следующих типов: подстилающая поверхность ($m_i(k)=0$), недостоверный треугольник ($m_i(k)=-1$), препятствие ($m_i(k)=-2$), боковая (относительно расположения пары дальномер-препятствие) тень от препятствия ($m_i(k)=-3$), и тень от препятствия за препятствием ($m_i(k)=-4$). Опишем процедуру маркировки.

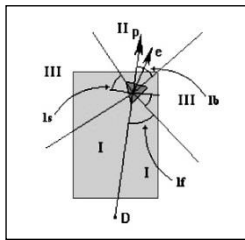


Рис.4. Классификационные зоны вокруг препятствия.

На рис.4 показаны проекция на плоскость $D'x'y'$ (горизонтальная плоскость, проходящая через дальномер) некоторого тела (представляющего собой параллелепипед, в проекции - прямоугольник), проекции луча дальномера и нормали к выделенному треугольнику, а также передняя, задняя и две боковые классификационные зоны, обозначенные на рисунке цифрами I, II и III соответственно. Введенные зоны реализуют пороговую классификацию по направлениям нормалей к исследуемым треугольникам.

Треугольники сетки St классифицируются по нескольким порогам, по ним же классифицируются вершины этой сетки:

$c0$ – порог угла наклона подстилающей поверхности,

$c1$ – порог угла наклона нормали к вертикали,

$c2$ – порог сонаправленности угла линии визирования с нормалью.

С помощью введенных пороговых величин будем далее классифицировать (раскрашивать) треугольники сетки Ct и их вершины. Для этого будем использовать два вектора признаков - треугольников m_i и аналогичный для вершин, значения которых последовательно модифицируются.

Введем набор решающих правил $P = \{P1, P2, P3, P4, P5\}$, выполнение определенного сочетания которых позволит отнести текущий треугольник T_k к одному из перечисленных выше типов. Правила Pi заключаются в выполнении следующих условий:

$P1$ – нормаль сильно отклонена от вертикали (угол наклона нормали больше порога $c1$),

$P2$ - проекция нормали на плоскость $D'x'y'$ сонаправлена с проекцией луча обзора на ту же плоскость - нормаль направлена в классификационную зону III (рис.3),

$P3$ - проекция нормали на плоскость $D'x'y'$ противоположно направлена относительно проекции луча обзора на ту же плоскость - нормаль направлена в классификационную зону I,

$P4$ - в треугольнике нет скачка по z ,

$P5$ - треугольник с предыдущим номером определен как препятствие.

Тогда окончательно вывод о наличии/отсутствии препятствий может быть сделан следующими продукционными правилами:

$$\text{если } P_2 \wedge \overline{P_4} \text{ то } m_i(k) = -4,$$

$$\text{если } \overline{(P_2 \wedge P_4)} \wedge \overline{(P_2 \vee P_3 \vee P_4)} \text{ то } m_i(k) = -3,$$

$$\text{если } \overline{(P_2 \wedge P_4)} \wedge \overline{(P_2 \vee P_3 \vee P_4)} \wedge (P1 \vee P3) \text{ то } m_i(k) = -2.$$

Поясним эти условия.

Если для треугольника T_k одновременно истинно правило P_2 и ложно правило P_4 , то такой треугольник маркируется (окрашивается) как тень за препятствием. Введенное условие означает, что нормаль к треугольнику направлена в классификационную зону II и в треугольнике имеется скачок высоты между его вершинами.

Если для треугольника T_k не является истинным логическое произведение P_2 и $\overline{P_4}$, и если не является истинной логическая сумма правил P_2, P_3, P_4 то такой треугольник маркируется как боковая тень. Это означает, что треугольник будет окрашен как боковая тень, если не выполнено предыдущее условие, и одновременно при этом нормаль к

треугольнику не направлена в классификационные зоны I и II (т.е. направлена в зону III) и в треугольнике нет скачка высоты между его вершинами.

Если для треугольника T_k не является истинным предыдущее условие, и если истинны условия P_1 или P_3 , то такой треугольник маркируется как препятствие. Это означает, что треугольник будет окрашен как препятствие, если одновременно не выполнено предыдущее составное условие, и либо нормаль сильно отклонена от вертикали (в зону I), либо предыдущий треугольник уже окрашен как препятствие.

3.2 Эксперименты по моделированию

На следующем рисунке представлена карта, на которой нанесены 4 препятствия. На карте представлены результаты обработки измерений одного скана в проекции на плоскость $D'x'y'$ (ось x' направлена горизонтально, а ось y' направлена вертикально в плоскости рисунка). Точка D' на рисунке соответствует проекции точки подвеса дальномера и является началом полярной сетки, определяющей сканирование.

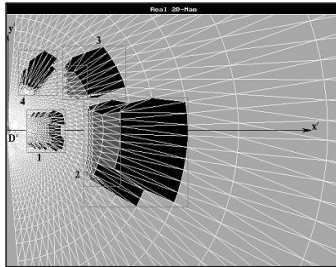


Рис.5. Карта препятствий.

При этом номерами 1 и 3 обозначены проекции измерений двух параллелепипедов (и их теней), определенных системой как препятствия. Объект с номером 2 представляет собой проекцию измерений призмы с основаниями, параллельными плоскости $D'x'y'$, и с наклоненной стороной, параллельной оси y' . Заметим, что угол наклона этой стороны больше значения предельного угла наклона поверхности, являющейся проходимой для робота (так были заданы соответствующие значения параметра $c\theta$ и координаты вершин этой призмы), и поэтому данная сторона была определена как препятствие. Объект с номером 4 - это проекция измерений полусферы, центр которой лежит на плоскости сцены.

В ходе исследований различных примеров проведены эксперименты по использованию описанного алгоритма для зашумленных данных, приближенных к данным реального устройства. Эти эксперименты

показали устойчивую работу алгоритма в пределах до величин ошибок порядка 1-1.5% от величины исходной дальности. В указанном диапазоне алгоритм устойчиво выделял препятствия, причем их размеры и границы мало отличались от случая идеальных точных данных. При больших значениях ошибок алгоритм также выделял реальные препятствия, но при этом появлялись дополнительные "фантомные" препятствия - зоны, которые обозначались алгоритмом как препятствия, хотя фактически являлись проходимыми участками.

Заключение

Эксперименты со зрительной системой показали ее полную работоспособность в различных реальных случаях. В настоящее время система обрабатывается на "АвтоНИВЕ".

Проведенные эксперименты по моделированию дальномерного алгоритма также подтвердили его работоспособность. Показана возможность применения алгоритма в указанном выше 1.5% диапазоне точности измерений. Представленные алгоритмы включены в комплекс "АвтоНИВА".

Список литературы

- [Kiy, 2010] Kiy K.I. A new real-time method for description and generalized segmentation of color images. // Pattern Recognition and Image Analysis. 2010. № 2. P.
- [Kiy, 2015a] Kiy K.I. Segmentation and detection of contrast objects and their application in robot navigation. //Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. № 2. P. 338-346.
- [Kiy, 2015b] Kiy K.I. A new real-time method of contextual image description and its application in robot navigation and intelligent control, in *Computer Vision in Control Systems-2. Innovations in Practice*, Springer, Intelligence Systems Reference Library. Vol. 75, Ch. 5. P. 109-133.
- [Kiy et al., 1995] Kiy K.I. A.V. Klimontovich, G.A. Buyvolov, Vision-based system for road following in real time. //Proc. International Conference on Advanced Robotics ICAR'95, Spain. Vol.1. P. 115–124, 1995.
- [Kiy 2017] Kiy K.I. Geometrized histogram method of global real-time analysis of regions: application to recognition of road scenes and navigation of autonomous vehicles in *Computer Vision in Control Systems-3. Innovations in Practice*, Springer Book Series 8578, 2017, in press.