

Качество детектирования препятствий как проблемно-ориентированный подход к оценке стереоалгоритмов в задачах распознавания дорожной ситуации

А.А. Смагина¹, Д.А. Шепелев¹, Е.И. Ершов¹, А.С. Григорьев¹

¹Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича – ИППИ РАН,
Большой Каретный переулок 19с1, Москва, Россия, 127051

Аннотация. В данной работе рассматривается метод оценки качества алгоритмов детектирования препятствий на основе стереозрения, учитывающий особенности задачи распознавания дорожной ситуации, с малой трудоёмкостью подготовки тестовых данных. Описываемый подход был разработан для применения в автономных системах анализа дорожной ситуации, таких как беспилотные наземные транспортные средства или системы помощи водителю, и может также применяться для построения проблемно-ориентированных критериев оценки качества алгоритмов стереорекострукции.

1. Введение

Одной из ключевых функций любой системы анализа дорожной обстановки, будь то система помощи водителю либо полнофункциональный автопилот, является предотвращение столкновений с различного рода препятствиями, как статичными, так и движущимися. В настоящее время наиболее активно для решения этой задачи используются радары, лидары и различные системы стереозрения (в широком смысле — бинокулярные стереокамеры, времяпролетные камеры, системы, основанные на структурированном свете) [1, 2, 3]. Ввиду относительно невысокой стоимости и высокого пространственно-временного разрешения особенно актуальны бинокулярные видеокамеры, основной проблемой при работе с которыми является сложность задачи трехмерной реконструкции. Однако бинокулярные стереокамеры являются пассивными сенсорами, что является неоспоримым преимуществом при создании автономных систем для большого числа транспортных средств. Каждый год по этой теме публикуется множество новых алгоритмов (как пример, [4], [5]), соответственно, крайне актуально использование критериев качества как систем предотвращения столкновений в целом, так и алгоритмов стереорекострукции как лимитирующих качество системы в целом, поскольку, имея достаточно точную трехмерную модель мира, задача обнаружения препятствий и избежания столкновений становится достаточно хорошо формализуемой, это позволяет верифицировать корректность решений строго, а не вероятностно.

Одним из традиционных тестов качества алгоритмов бинокулярной стереорекострукции является набор данных и инструментарий тестирования Middlebury [6]. Однако, по мере осознания невозможности создания универсального алгоритма стереосопоставления

для всего спектра задач в которых он применяется, возрастает интерес к проблемно-ориентированным решениям [7]. В частности, в работе [8], описывающей популярный в тестировании алгоритмов анализа дорожной ситуации набор данных KITTI, показано, что ранжирование эффективности на их наборе данных существенно отличается от ранжирования, полученного на Middlebury, то есть при разработке систем обнаружения препятствий необходимо пользоваться наборами данных и метриками, адаптированными именно под задачи распознавания дорожной ситуации. Тем не менее, использование правильного набора данных недостаточно для адекватной оценки применимости алгоритмов трехмерной реконструкции для построения надежной системы: нужно иметь возможность анализировать вклад ошибок реконструкции трехмерного мира в ошибки принятия конечных решений, т.е. выполнять анализ на более высоком уровне абстракции. В работе [9] предлагается трехуровневая иерархия метрик качества алгоритмов стереозрения:

- Низкий уровень — правильность облака точек, карты глубин — оценивает точность самого алгоритма реконструкции, но малоинформативен с точки зрения точности решения конечной задачи и требует трудоемкого получения высокодетализированных тестовых данных для сравнения;

- Средний уровень — в качестве него авторами используется т.н. "стиксельное" представление — трехмерный мир представляется упрощенной геометрической моделью, позволяющей работать с результатами реконструкции на менее детальном и более релевантном для решения задачи уровне, также предъявляет меньше требований к детализации тестовых данных;

- Высокий уровень — конечный ответ рассматриваемой системы. В описываемой работе использовалось положение ближайшего автомобиля, при этом сама метрика упомянута крайне поверхностно.

Помимо того, что метрики среднего уровня не позволяют получить оценки итогового качества системы, их недостатком является достаточно высокая трудоемкость получения тестовых данных (правильных ответов). В [9] рассматривается метод получения правильных ответов в виде стиксельного представления с радаров либо лидаров, также возможна автоматическая конверсия данных, представленных в виде карт глубин или облаков трехмерных точек, как в наборах данных KITTI [8] и Cityscapes [10] в правильные ответы. Высокая трудоемкость не слишком актуальна при использовании стандартных схем расположения оборудования (видеокамер) и при наличии целевых условий наблюдения в существующих открытых наборах данных. При использовании же менее типичных конфигураций, наподобие описываемой в данной работе (беспилотный автобус — камеры установлены высоко с наклоном вниз) необходима подготовка нового набора данных, и в подобных случаях становится актуальным вопрос минимизации трудоемкости его подготовки при сохранении удовлетворительного уровня детализации относительно рассматриваемой задачи.

В представленной работе рассматривается подход к тестированию системы обнаружения препятствий, основанный на сравнении итогового ответа системы, генерируемого автоматически на основе низкодетализированных тестовых данных, что обеспечивает относительно низкий уровень трудоемкости при создании тестового набора данных. Данная схема относится к среднему и высокому уровням абстракции в иерархии [9] и может быть использована как для тестирования системы в целом (при фиксированном модуле принятия решений), так и для тестирования проблемно-ориентированной метрики сравнения алгоритмов стереозрения. Данный метод может быть легко обобщен на системы, использующие другие виды сенсоров, предоставляющие оптическое изображение сцены и тем или иным образом вычисляемую карту глубины. В работе не рассматривается оценка точности отслеживания перемещения препятствий во времени.

Для введения в контекст задачи сначала будет рассмотрен пример устройства системы

детекции препятствий, для настройки которой изначально был разработан описываемый подход к оценке. Рассматривается собственно подход к оценке, и, в заключении, приводится пример использования описанной методики как для настройки параметров алгоритма трехмерной реконструкции, так и для анализа поведения системы в целом.

2. Система обнаружения препятствий

Опишем архитектуру системы обнаружения препятствий (см. рисунок 1). В качестве входных данных системой используются карта диспаратности или карта глубины, RGB-изображение (опционально), параметры калибровки сенсора, а также информация о коридоре движения (задаваемая область дорожного полотна перед транспортным средством (в дальнейшем – ТС) в каждый момент времени, предназначенная для движения), полученная от подсистемы планирования траектории. Вообще говоря, предложенная архитектура позволяет использовать в качестве сенсора глубины стереосистемы видимого диапазона, времяпролетные камеры, системы, основанные на структурированном свете и тд.

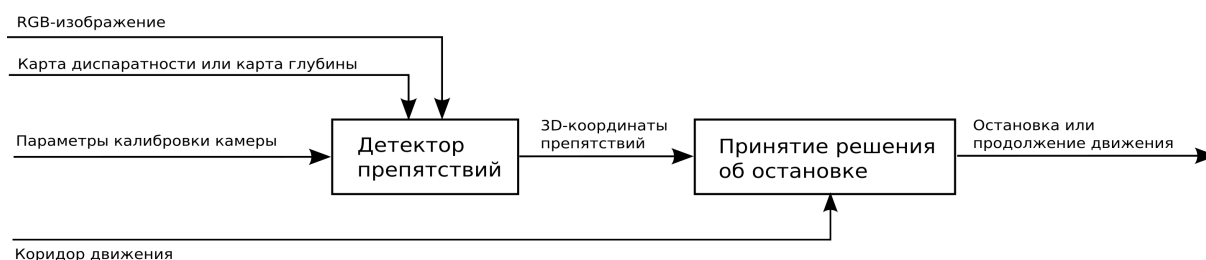


Рисунок 1. Структурная схема системы детектирования препятствий.

В работе в качестве сенсорной системы будет рассматриваться бинокулярная камера, закрепленная на ТС в направлении движения с известными параметрами калибровки. Карта глубины вычисляется с использованием алгоритма стереосопоставления с последующей фильтрацией полученной карты диспаратности. Детали реализации изложены ниже, в разделе 4.

Результатом работы системы является *бинарный ответ о наличии или отсутствии препятствия*. Таким образом, предлагаемая система может быть использована как на первых этапах разработки системы предотвращения столкновений, так и в качестве высокоуровневого детектора препятствий, запускающего процедуру принятия решения ТС.

Важной особенностью при разработки подобной системы является возможность учета ошибок алгоритма стереосопоставления с различными весами, в зависимости от удаленности объекта. Действительно, в контексте поставленной задачи нечувствительность к далеко расположенным объектам неважна, в то время как ошибка детекции близко расположенных объектов – фатальна, в то время как мера близости регламентируется целевыми показателями разрабатываемой автономной системы.

3. Метод оценки качества

Тестирование разрабатываемой системы подразумевает *оценку качества детекции препятствий относительно остановок* (см. рисунок 2), поскольку в случае, если в коридоре движения присутствует объект, то система должна сигнализировать о наличии препятствия, иначе – нет.

Возникает закономерный вопрос о способе разметки истинных ответов. Любой объект при наличии оценки трехмерной структуры мира может быть представлен окаймляющим параллелепипедом или набором стикселей [11]. Однако генерация разметки таких типов



Рисунок 2. Структурная схема системы оценки качества детекции препятствий относительно остановок.

весьма трудозатратна и может быть упрощена, как будет показано далее, без ущерба для качества решаемой задачи. Мы предлагаем представлять разметку изображения и результат детектора препятствий прямоугольниками в плоскости перпендикулярной плоскости земли. Достаточно разметить сцену только в требуемой для конкретной задачи зоне видимости, т.к. в первую очередь интересны срабатывания детектора препятствий именно в коридоре движения ТС.

В работе разметка объекта (далее будем его *размеченное препятствие*) выполняется по одному изображению со стереопары, полученным с использованием виртуального преобразования камеры в вид перпендикулярный плоскости дороги, с помощью прямоугольника со сторонами, параллельными сторонам изображения. Таким образом размечаются люди, автомобили, стены, сплошные заборы – все крупные объекты-препятствия. На рисунках 3а и 3б размеченные препятствия обозначены четырехугольниками. Также дополнительно могут быть размечены *зоны безразличия* (фиолетовые многоугольники на рисунке 3а) для случая, когда мы не ожидаем уверенного срабатывания детектора препятствий, например, если в коридоре движения есть сетчатый забор или кустарники). Как правило, зоны безразличия нужны при работе с широким коридором движения. С использованием информации о параметрах калибровки камеры и высоты её расположения над дорожным полотном можно вычислить трехмерные координаты прообраза размеченного четырехугольника и таким образом вычислить расстояние до него.

Аналогичное представление можно получить для ответа детектора препятствий: для всех выделяющихся объектов выполняется построение плоского четырехугольника, касающегося лицевой части объекта и параллельного плоскости изображения (далее будем называть *найденные препятствия*).

В предложенной схеме, показанной на рисунке 2, размеченные в кадре препятствия сопоставляются с найденными препятствиями. Подсчет сопоставленных ответов проводится только относительно тех препятствий, что попадают в коридор движения.

Для каждого отдельного размеченного препятствия (кроме зон безразличия) сопоставление производится только с теми найденными препятствиями, которые удовлетворяют критерию

$$\frac{|z_{ref} - z_{exp}|}{z_{ref}} < T,$$

где z_{ref} – расстояние до размеченного препятствия, z_{exp} – расстояния до найденного препятствия, T – пороговое значение (типичное значение 0.25). Сопоставление найденных препятствий с размеченными считается успешным (истинно-положительным), если прямоугольник размеченного препятствия имеет ненулевое пересечение с найденным препятствием. Если найденное препятствие не может быть сопоставлено ни с каким из размеченных, включая зоны безразличия, то оно считается ложно-положительным.

Правильность принятия решения об остановке вычисляется по следующему правилу:

- остановка считается истинно-положительной, если в коридоре движения есть хотя бы один истинно-положительный ответ (см. рисунок 3а),
- остановка считается ложно-положительной, если в коридоре движения есть только ложно-положительные ответы (см. рисунок 3б),
- остановка считается ложно-отрицательной, если в коридоре движения есть только ложно-отрицательные ответы,
- иначе остановка считается истинно-отрицательной.

4. Алгоритм детектирования препятствий

Для демонстрации применимости предложенного метода оценки качества был реализован алгоритм детектирования препятствий, схематически изображенный на рисунке 4.

Поступающая на вход детектора препятствий карта глубины фильтруется по пространственным координатам для отсекающей плоскости дороги (в допущении, что плоскость дороги может быть наклонена не более 10° относительно текущего положения ТС).

Высота фильтрации плоскости дороги является настраиваемым параметром детектора препятствий. Затем формируется проекция 3D-сцены на плоскость дороги в виде одноканального изображения, которое в свою очередь тоже фильтруется (здесь использовалась морфологическое закрытие), а после на полученном бинарном изображении выделяются компоненты связности и восстанавливаются 3D-координаты препятствий, соответствующие им. К полученным таким образом компонентам связности может быть применен фильтр по площади компонент.

Параметры фильтров являются настраиваемыми и подлежат оптимизации на размеченном наборе данных для повышения целевой метрики качества работы системы.

5. Результаты

Набор данных производился с бинокулярной камеры, установленной на транспортном средстве на высоте 2.2 м под углом 20° вниз от горизонтали. Угол обзора камеры около 80° . Размер изображения на выходе — 1280×1024 пикселей. Ширина стереобазы 75 см.

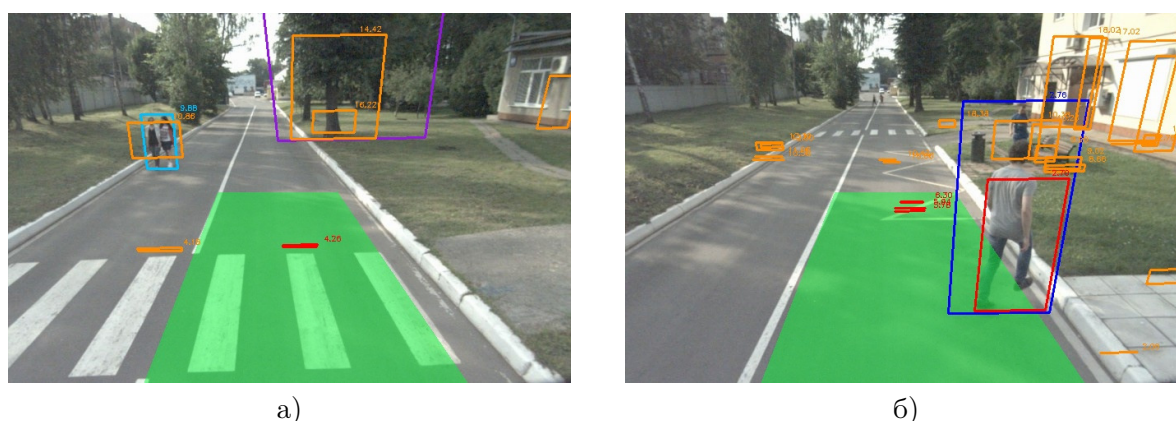


Рисунок 3. Результат сопоставления найденных препятствий (отмечены красным и оранжевым цветами внутри и вне коридора движения соответственно) с размеченными (отмечены синим и голубым цветами внутри и вне коридора движения соответственно): ложно-положительная остановка (а), истинно-положительная остановка (б). Зеленым цветом отмечен коридор движения, фиолетовым — зоны безразличия.

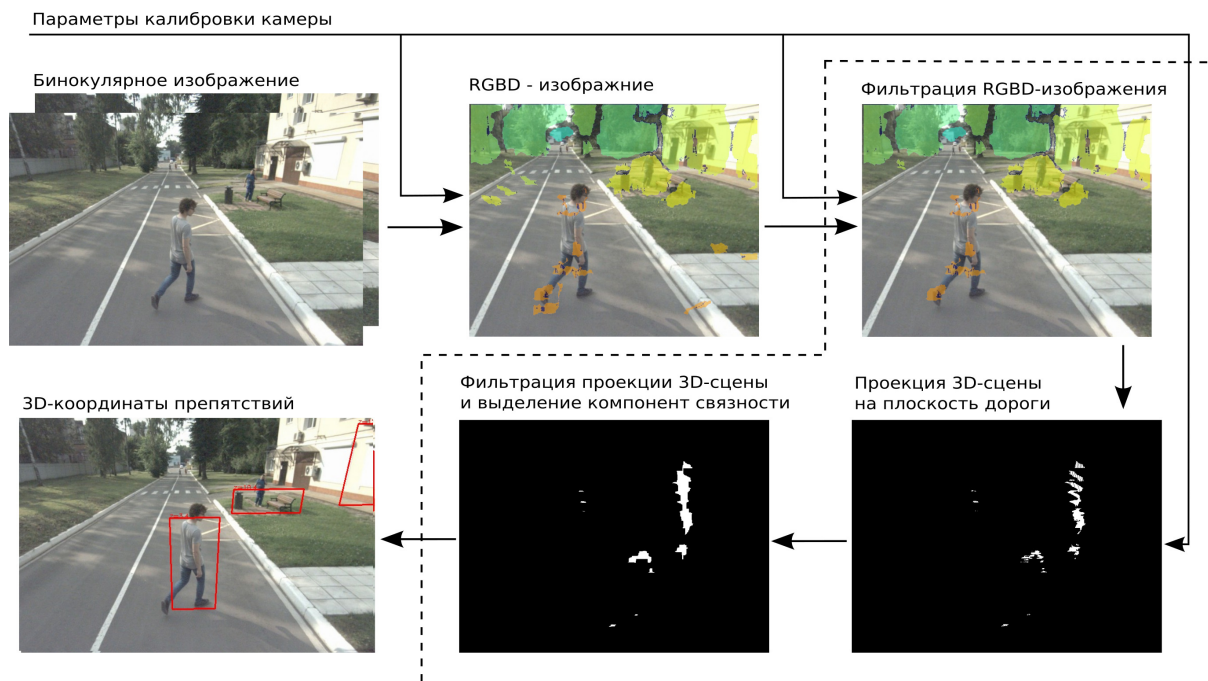


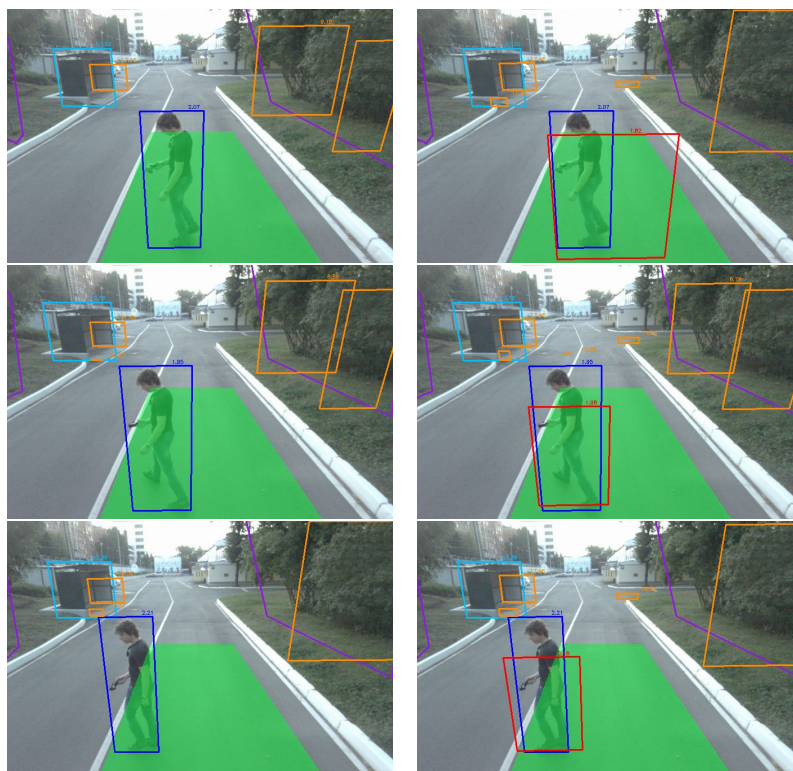
Рисунок 4. Поэтапная иллюстрация работы детектора препятствий. Пунктиром выделены блоки, относящиеся непосредственно к детектору препятствий.

Набор данных состоит из последовательностей следующих друг за другом кадров 5-20 кадров, записанных с частотой 3 Гц. Всего в наборе данных 1794 кадра, из них 65% кадров записаны в простых условиях (дневное освещение, без осадков) и 35% кадров в сложных условиях (дождливая погода, ночное освещение, передвижение в помещении со светоотражающим полом), на 840 кадрах в коридоре движения размечены препятствия. Проверилось срабатывание системы обнаружения препятствий в коридоре движения шириной 2.5 метра и длиной 7 метров.

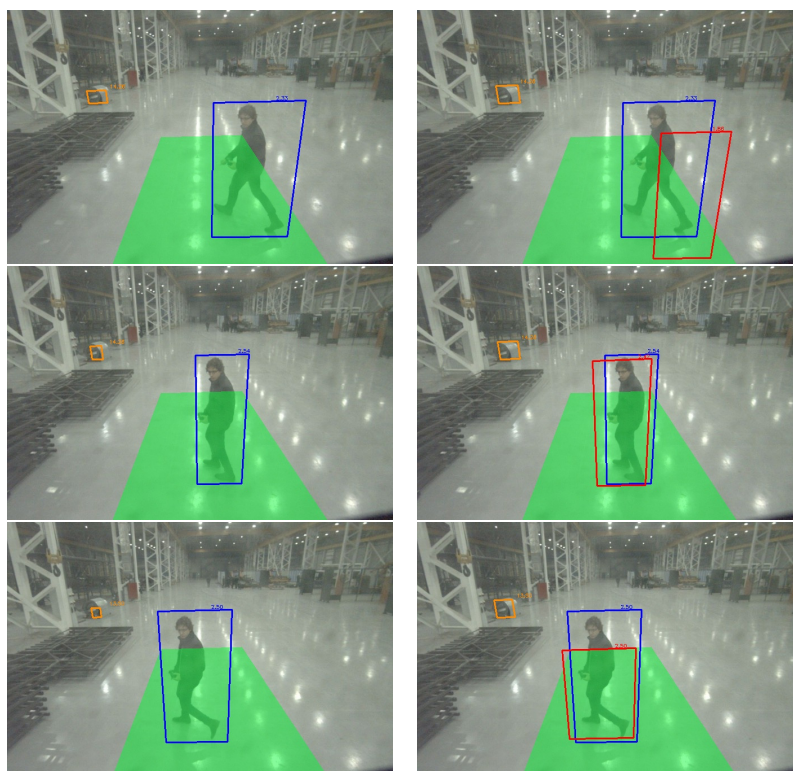
Для испытания предложенного метода оценки качества проводилась оптимизация системы по параметрам алгоритма стереосопоставления и/или алгоритма детектирования препятствий. Результаты приведены в таблице 1 и на рисунке 5. Для построения карты диспаратности использовался реализованный в библиотеке OpenCV алгоритм локального

Таблица 1. Качество детектирования препятствий относительно остановок при различных настройках параметров.

	Доля правильных остановок	Доля ложных остановок
Экспертная настройка параметров	0.677	0.000
Оптимизация параметров детектора препятствий	0.801	0.003
Оптимизация параметров стерео-алгоритма	0.819	0.013
Оптимизация всех параметров	0.822	0.011



а)



б)

Рисунок 5. Визуализация результатов детектирования препятствий в простых (а) и в сложных (б) условиях на примере последовательности из трех кадров. Слева – результаты детектирования с экспертной настройкой параметров, справа – после оптимизации параметров детектора препятствий и стерео-алгоритма.

стереосопоставления StereoBM [12].

Как показано в таблице 1, в данной задаче за счет оптимизации параметров детектора препятствий и стереоалгоритма может быть достигнуто качество работы всей системы более высокое, чем за счет настройки только параметров алгоритма стереосопоставления.

6. Заключение

В работе рассмотрен подход к разработке детектора препятствий на основе стереозрения в задачах анализа дорожной ситуации. Основное его отличие от имеющихся работ заключается в использовании метрики качества детекции препятствий относительно остановок. При таком подходе проверяется конечный ответ подсистемы. В рассмотренной задаче этот ответ бинарный, но предложенная схема может быть расширена и на случай большего числа ответов, например, когда подсистема детектирования препятствий принимает решение об объезде препятствия. Предложенная метрика может служить как характеристикой надежности детектора препятствий в целом, так и быть использована как проблемно-ориентированная оценка качества алгоритмов стереозрения в задачах анализа дорожной ситуации. Разметка правильных ответов в наборе данных сводится к обозначению прямоугольников объектов и многоугольников безразличных зон, имея невысокую трудоемкость и не требуя наличия специального оборудования.

Для демонстрации применимости предложенного метода оценки качества в работе была рассмотрена конкретная реализация алгоритма детектирования препятствий, которая, несмотря на свою простоту, показывает неплохую применимость даже в сложных условиях. В дальнейшем в предложенной системе может быть использован алгоритм детекции препятствий на основе стиксельного представления, что позволит закрыть вопросы о корректности обработки неровностей дороги и об отслеживании перемещений препятствий во времени.

7. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00150).

8. Литература

- [1] Mukhtar, A. Vehicle detection techniques for collision avoidance systems: A review / A. Mukhtar, L. Xia, T.B. Tang // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16(5). – P. 2318-2338.
- [2] Franke, U. Making Bertha See / U. Franke, D. Pfeiffer, C. Rabe, C. Knoepfel, M. Enzweiler, F. Stein, R.G. Herrtwich // *2013 ICCVW*. – 2013. – P. 221-241.
- [3] Шепелев, Д.А. О проблемах сопоставления пикселей стереопары с точки зрения линейной модели формирования цветного изображения / Д.А. Шепелев, А.А. Терешин, П.П. Николаев, Е.И. Ершов // *Сенсорные системы*, 2017. – Т. 31, №2. – 2017. – С. 150-160.
- [4] Pang, J. Cascade residual learning: A two-stage convolutional neural network for stereo matching / J. Pang, W. Sun, J.S.J. Ren, C. Yang, Q. Yan // *ICCVW 2017*. – 2017. – Vol. 3(9).
- [5] Saleem, N.H. Improved Stixel Estimation Based on Transitivity Analysis in Disparity Space / N.H. Saleem, H.-Chien, M. Rezaei, R. Klette // *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*. – Springer, Cham, 2017. – P. 28-40.
- [6] Scharstein, D.A. taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms / D. Scharstein, R. Szeliski // *International journal of computer vision*. – 2002. – Т. 47, №1-3. – P. 7-42.
- [7] Sidorchuk, D. Problem-oriented stereo vision quality evaluation complex / D. Sidorchuk, N. Gusamutdinova, I. Konovalenko, E. Ershov // *Proceedings SPIE. ICMV 2015*. – 2015, P. 1-5.
- [8] Geiger, A. Are we ready for autonomous driving the kitti vision benchmark suite / A. Geiger, P. Lenz, R. Urtasun // *CVPR 2012*. – IEEE, 2012. – P. 3354-3361.
- [9] Schneider, N. An Evaluation Framework for Stereo-Based Driver Assistance / N. Schneider, S. Gehrig, D. Pfeiffer, K. Banitsas // *Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis*. – 2012. – P. 27-51.
- [10] Marius, C. The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding / C. Marius, M. Omran, S. Ramos, T. Rehfeld, M. Enzweiler, R. Benenson, U. Franke, S. Roth, B. Schiele // *Proceedings of the*

- IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2016. – P. 3213-3223.
- [11] Pfeiffer, D. Towards a Global Optimal Multi-Layer Stixel Representation of Dense 3D Data / D. Pfeiffer, U. Franke // BMVC, 2011. – 2011. – P. 51.1-51.12.
- [12] Faugeras, O. Real time correlation-based stereo: algorithm, implementations and applications / O. Faugeras, B. Hotz, H. Matthieu, T. Vieville, Z. Zhang, P. Fua, E. Theron, L. Moll, G. Berry, J. Vuillemin, P. Bertin, C. Proy // RR-2013, INRIA. – 1993.

Obstacle Detection Quality as Problem-Oriented Approach to Stereo Vision Algorithms Estimation in Road Situation Analysis

A.A. Smagina¹, D.A. Shepelev¹, E.I. Ershov¹, A.S. Grigoryev¹

¹Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute) –
ИИТП РАН, Bolshoy Karetny per. 19, build.1, Moscow, Russia, 127051

Abstract. In this work we present a method for performance evaluation of stereo vision based obstacle detection techniques that takes into account the specifics of road situation analysis to minimize the effort required to prepare a test dataset. This approach has been designed to be implemented in systems such as self-driving cars or driver assistance and can also be also used as problem-oriented quality criteria for stereo vision algorithms.

Keywords: performance evaluation, road situation analysis, obstacle detection, stereo vision.