

## ОБНАРУЖЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ ПЕРЕД НАЗЕМНЫМ МОБИЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ В БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕРЕОЗРЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**О. В. Выголов, С. Ю. Желтов, Ю. В. Визильтер**

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП ГосНИИАС),  
125319, Москва, Викторенко, 7*

Предложен вычислительно эффективный метод обнаружения трёхмерных объектов на относительно гладкой поверхности по стереоскопическим изображениям сцены, получаемым с двух видеокамер наземного мобильного объекта. Суть метода заключается в том, что с построением в полярной системе координат ортогональных проекций стереоизображений на подстилающую поверхность задача обнаружения трёхмерных объектов сводится к более простой задаче обнаружения на синтезированных изображениях яркостно-геометрической структуры известной формы — совокупности вертикальных границ контрастности. Вертикальность границ позволяет организовать поиск этой структуры на основе «быстрых», аппаратно поддерживаемых процедур обработки изображений, таких как свёртка изображения с прямоугольной маской и вычисление интегральных проекций яркости изображения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Практическая применимость метода показана на примере создания бортовой системы технического стереозрения реального времени для обнаружения препятствий перед транспортным средством при его движении по скоростным автомагистралям.

*Ключевые слова:* обнаружение препятствий, стереозрение, реальное время, ортофото.

### Введение

Обнаружение препятствий можно отнести к одной из частных, но, безусловно, ключевых задач автономного управления наземными мобильными объектами. С её решением тесно связаны перспективы автоматизации целого ряда важных функций, таких как самопозиционирование, анализ достижимости целей управления, оперативное планирование маршрутов перемещения, построение карты исследованного пространства. Стремительное развитие средств получения цифровых изображений и прогресс вычислительной техники открыли новые возможности для решения задачи обнаружения препятствий на базе интеллектуальных систем технического зрения.

На сегодняшний день ощутимые успехи достигнуты в создании систем обнаружения препятствий при движении мобильного объекта в пределах стационарного пространства известной геометрии (офиса, здания) [Valls et al., 2006; Wang et al., 2004]. Поскольку скорости движения в таких задачах невелики, то для без-

---

**Выголов Олег Вячеславович** — начальник сектора, кандидат технических наук, e-mail: o.vygodov@gosniias.ru.

**Желтов Сергей Юрьевич** — член-корреспондент РАН, генеральный директор, доктор технических наук, профессор.

**Визильтер Юрий Валентинович** — начальник лаборатории компьютерного машинного зрения, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: viz@gosniias.ru.

опасного перемещения обычно достаточно обнаруживать препятствия лишь в непосредственной близости от мобильного объекта. В качестве препятствий в основном рассматриваются объекты, отвечающие предопределённым моделям, которые могут представлять собой как совокупность простых признаков, так и сложные структурные описания.

Другим востребованным классом систем являются системы обнаружения препятствий при движении мобильного объекта по скоростным, протяженным маршрутам в условиях априори неизвестной, динамично меняющейся окружающей обстановки, например, при движении транспортного средства (ТС) по автомагистралям. Данная задача является неоспоримо более сложной и её текущее состояние можно охарактеризовать как совокупность перспективных подходов, на базе которых созданы первые, тестовые прототипы систем обнаружения [Sun et al., 2006]. Специфика задачи заключается в высокой изменчивости фоноцелевой обстановки, практически не поддающейся формальному математическому описанию. При этом задача усложняется ещё и тем, что из-за высоких скоростей движения время реакции системы управления на изменение в окружающей обстановке должно быть минимальным, поэтому необходимо обрабатывать информацию в реальном масштабе времени.

Одним из перспективных путей решения задачи обнаружения препятствий средствами машинного зрения является подход на базе стереозрения. Важное преимущество стереоскопических систем заключается в возможности из-за различия в положении камер различать трёхмерные (3D) объекты, отстоящие от поверхности, и объекты, принадлежащие этой поверхности (блики, тени, специальный рисунок), что потенциально снижает вероятность ложных обнаружений. На сегодня основным фактором, ограничивающим применение стереозрения для обнаружения препятствий, является вычислительная сложность методов анализа стереоинформации. Как следствие, актуальной остается проблема разработки новых методов и алгоритмов обнаружения 3D-объектов, отличающихся, с одной стороны, корректностью с точки зрения стереофотограмметрии, с другой — использованием «быстрых» процедур обработки, ориентированных на архитектуру современных вычислительных платформ. Решению этой проблемы и посвящена настоящая работа.

## **1. МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ, ОСНОВАННЫЙ НА АНАЛИЗЕ РАДИАЛЬНЫХ ОРТОФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ**

Одним из робастных методов обнаружения 3D-объектов на относительно гладкой поверхности является метод «дифференциального ортофото» [Zhel'tov et al., 2002], основная идея которого заключается в следующем. Если известна аналитическая модель подстилающей поверхности, то с учётом этой модели строятся ортогональные проекции левого и правого изображений стереопары на вспомогательную (например, горизонтальную) плоскость. Будем называть такие проекции «ортофото». В отсутствие трёхмерного объекта, при условии, что модель идеально описывает наблюдаемую поверхность, ортофото левого и правого изображений совпадают. Наличие 3D-объекта приводит к возникновению отклонений от модели поверхности, в результате чего на ортофото объект оказывается «спроецированным» на загораживаемую им область (рис. 1, см. с. 204).

Из-за различия в положении камер стереосистемы на разности левого и правого ортофото (дифференциальном ортофото) в области границ 3D-объекта возникает

характерные яркостно-геометрические структуры угловой формы (рис. 2). Таким образом, задача обнаружения 3D-объектов может быть сведена к более простой — поиску на дифференциальном ортофото двумерной структуры угловой формы. Однако решение и этой задачи сопряжено с ощутимыми вычислительными затратами и трудно реализуемо в системах реального времени. В данной работе метод дифференциального ортофото получил свое дальнейшее развитие, позволившее преодолеть указанное выше ограничение.

Пусть на подстилающей поверхности выбрана внешняя система координат ( $OX_e Y_e Z_e$ ) такая, что ось  $OX_e$  направлена вперед по ходу движения мобильного объекта, ось  $OY_e$  перпендикулярна оси  $OX_e$  и ориентирована вправо, ось  $OZ_e$  направлена вверх по нормали к поверхности, плоскость  $OX_e Y_e$  совпадает с плоскостью подстилающей поверхности. Пусть также имеется пространственная модель подстилающей поверхности  $Z(X, Y)$ .

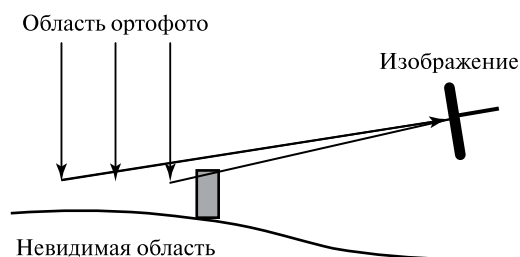


Рис. 1. На ортофото объект «проецируется» на загораживаемую им область

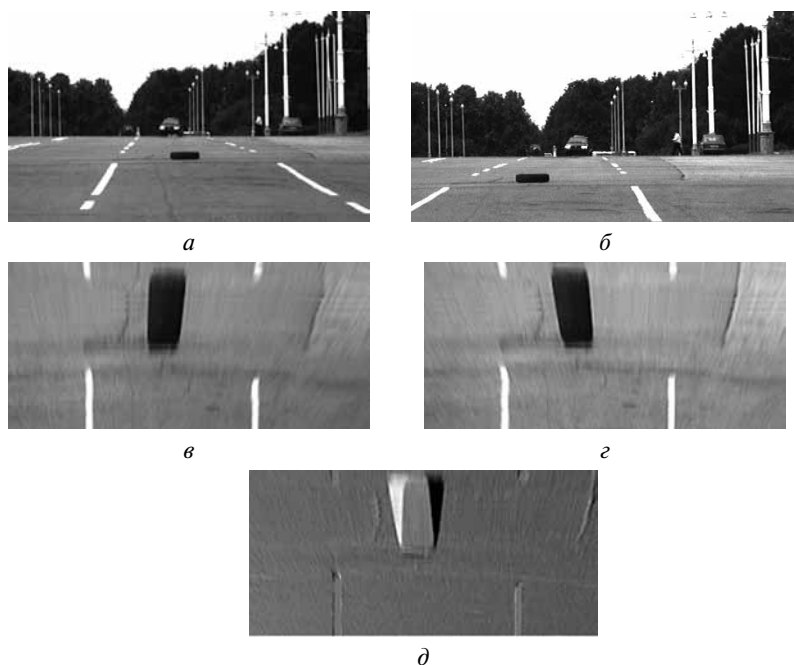


Рис. 2. Пример ортофото и их разности: а, б — левое и правое изображения; в, г — левое и правое ортофото; д — разность «в» минус «г» (дифференциальное ортофото)

Введем полярную систему координат  $(\alpha, R)$ :

$$R = \sqrt{(X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2}, \quad \alpha = \arctan \frac{Y - Y_s}{X - X_s},$$

где  $R$  — расстояние от фокальной плоскости камеры до 3D-точки  $(X, Y, Z)$ ;  $X_s, Y_s$  — координаты оптического центра камеры;  $\alpha$  — угол между проекциями на горизонтальную плоскость оптической оси камеры и линией, соединяющей оптический центр с точкой  $(X, Y, Z)$ .

Построим ортофотоизображение в полярной системе координат  $(\alpha, R)$ . В дальнейшем будем называть такое изображение «радиальным ортофото». Пиксельные координаты  $(i, j)$  точки радиального ортофото в системе координат  $(\alpha, R)$  соответствуют точке  $(\alpha_i, R_i)$ , вычисляемой как

$$\alpha_i = iS_\alpha, \quad R_i = jS_R,$$

где  $S_\alpha, S_R$  — масштабирующие коэффициенты вдоль осей  $\alpha$  и  $R$ .

Для получения значения яркости пиксела  $(i, j)$  определяются координаты точки  $(\alpha_i, R_i)$  в системе координат  $(OX_e Y_e Z_e)$ :

$$X_i = R_i \cos(\alpha_i) + X_s, \quad Y_i = R_i \sin(\alpha_i) + Y_s, \quad Z_i = Z(X_i, Y_i)$$

и полученная точка  $(X_i, Y_i, Z_i)$  проецируется на исходное изображение с помощью уравнений коллинеарности.

Важное преимущество радиального ортофото заключается в следующем. В отличие от ортофото, построенного в прямоугольной системе координат, на радиальном ортофото границы объекта не искажаются, т. е. невидимая область, загораживаемая объектом, имеет прямоугольную форму с вертикальными краями. Поскольку границы объекта есть области существенного перепада яркости, то в качестве характерного признака 3D-объекта на радиальном ортофото можно рассматривать яркостно-геометрическую структуру максимально простой формы — совокупность вертикальных границ контрастности (контуров). Поиск такой структуры может быть организован на базе вычислительно эффективных операций построения и анализа интегральных проекций яркости в вертикальном и горизонтальном направлении специального «признакового» изображения, т. е. уже на начальном этапе обработки выполняется переход от дорогостоящих в вычислительном плане операций анализа изображений к более быстрым операциям анализа одномерных массивов (проекций яркости).

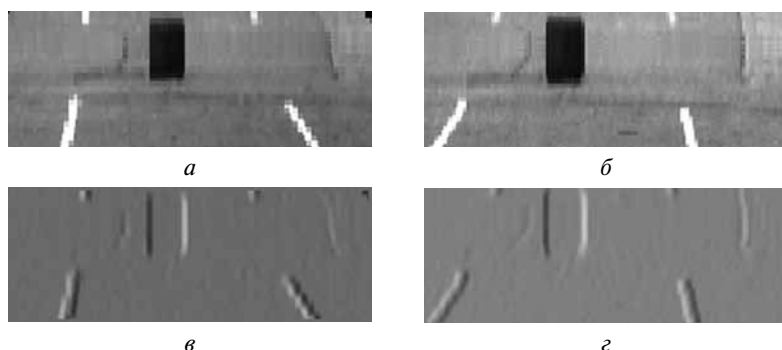
Признаковое изображение получается путём свёртки радиального ортофото с маской модифицированного оператора Собела для выделения вертикального края (рис. 3, см. с. 206).

Далее строится вертикальная проекция яркости  $V(x)$  признакового изображения:

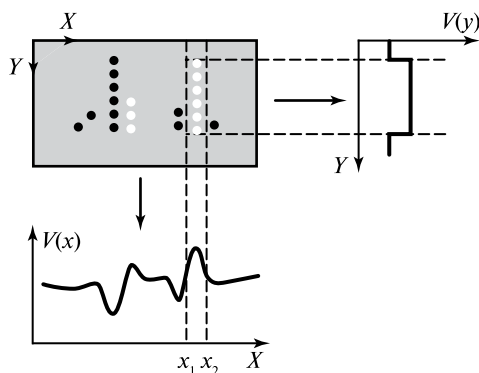
$$V(x) = \sum_{y=0}^{DY-1} I(x, y), \quad x = 0, \dots, DX-1,$$

где  $I(x, y)$  — яркость пиксела  $(x, y)$  признакового изображения,  $DX, DY$  — ширина и высота признакового изображения.

Из-за вертикальности контуров в проекции  $V(x)$  возникают области характерной формы — локальные пики, представленные комбинацией отрезков постоянного



**Рис. 3.** Пример радиальных ортофото, полученных по стереопаре на рис. 2, и соответствующих им признаков изображений: *а, б* — левое и правое радиальные ортофото; *в, г* — левое и правое признаковые изображения



**Рис. 4.** Схема, показывающая соответствие вертикальных контуров областям характерной формы на вертикальной и горизонтальной проекциях яркости признакового изображения

значения и линейного возрастания-убывания (рис. 4). По положению этих пиков определяется горизонтальное положение контуров и оценивается их ширина.

Далее для каждого выделенного пика  $x_i$  в области, соответствующей ширине контура, вычисляется горизонтальная проекция яркости признакового изображения (см. рис. 4):

$$H_{x_i}(y) = \sum_{x=x_1}^{x_2-1} I(x, y), \quad y = 0, \dots, DY - 1,$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты левой и правой границы контура.

Концевые точки контуров в проекции  $H_{x_i}(y)$  соответствуют перепадам, представленным комбинацией двух постоянных значений.

Таким образом, возникает задача поиска в одномерном массиве значимых перепадов известной формы. Приведем её решение на примере выделения локальных пиков на вертикальной проекции яркости.

Поскольку требуется не только выделить значимые перепады, но и оценить их форму, то подход на основе введения порогового значения в данном случае не

применим. Предложен метод, основанный на тестировании статистических гипотез о локальной форме сигнала. В окрестности каждой точки  $x$  близость формы сигнала к искомой модели оценивается как вероятностное отношение:

$$\rho(x) = \frac{S_{H_0}^2}{S_{H_1}^2},$$

где  $S_{H_0}^2$ ,  $S_{H_1}^2$  — несмещённые оценочные дисперсии наблюдаемого сигнала для моделей, описывающих гипотезы  $H_0$  (сумма гауссовского шума и постоянного сигнала) и  $H_1$  (сумма шума и полезного сигнала известной формы, представленной комбинацией отрезков постоянного значения и линейного возрастания-убывания).

Положение значимых пиков требуемой формы определяется путём поиска локальных максимумов в  $\rho(x)$ , превышающих пороговое значение.

Аналогичным образом определяется положение концевых точек отрезка на горизонтальной проекции яркости. Единственное отличие заключается в том, что в качестве искомой (гипотезы  $H_1$ ) рассматривается форма, представленная комбинацией двух постоянных значений.

После обнаружения вертикальных контуров на левом и правом изображении для определения пространственного положения объекта необходимо решить задачу их стереотождествления. Задача решается на основе сопоставления вертикальных проекций яркости левого и правого признаков изображений. Поскольку на проекциях яркости положение интервалов, соответствующих контурам, известно, отождествление проекций однозначно задает и отождествление контуров.

Основная идея метода заключается в установлении глобального стереосоответствия, максимизирующего суммарную меру сходства локальных интервалов вертикальных проекций яркости левого и правого признаков изображений, т. е. в пользу каждого варианта сопоставления контура на левом изображении с контуром на правом изображении «голосуют» не только локальные признаки этой пары контуров, но и признаки других информативных областей изображения. Это позволяет снизить вероятность ложного стереотождествления в особо сложных случаях, например, когда границы объекта не имеют достаточных признаков для их локального отождествления, или при наличии на изображении областей периодической структуры (различного рода теней, бликов).

Проблема максимизации суммарной меры сходства интервалов левой и правой проекций яркости рассматривается как нахождение пути на графе. Строится двумерная сетка, узлами (вершинами) которой являются пересечения вертикальных прямых, задаваемых точками левой проекции, и горизонтальных прямых, задаваемых точками правой проекции (рис. 5, см. с. 208). Каждая вершина обладает двумя важными характеристиками: угловой диспаратностью и стоимостью, вычисляемой как

$$c(m) = \frac{\sum_{i=x_{lm}-s}^{x_{lm}+s} \sum_{j=x_{rm}-s}^{x_{rm}+s} V_l(i) V_r(j) - N \bar{V}_l \bar{V}_r}{\left( \sum_{i=x_{lm}-s}^{x_{lm}+s} V_l^2(i) - N \bar{V}_l^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{j=x_{rm}-s}^{x_{rm}+s} V_r^2(j) - N \bar{V}_r^2 \right)^{1/2}},$$

где  $x_{lm}$  и  $x_{rm}$  — положение точки на левой и правой проекциях яркости, соответствующее вершине графа;  $\bar{V}_l$  и  $\bar{V}_r$  — среднее значение на интервалах  $[x_{lm} - s, x_{lm} + s]$  и  $[x_{rm} - s, x_{rm} + s]$  левой и правой проекций соответственно;  $N = 2s + 1$ ,  $s$  — средняя ширина контуров, выделенных на этапе первичной сегментации.

Максимизация суммарной меры сходства интервалов проекций достигается нахождением на сетке глобального пути, такого, что суммарная стоимость входящих в него вершин максимальна. Для нахождения такого пути применяется метод динамического программирования. Выполняется обход вершин в направлениях слева направо, сверху вниз. Стоимость пути от начальной вершины до вершины  $m$  определяется как:

$$C(m) = c(m) + \max_{n_i < m} \{C(n_i)\}, \quad i = 1, \dots, 3,$$

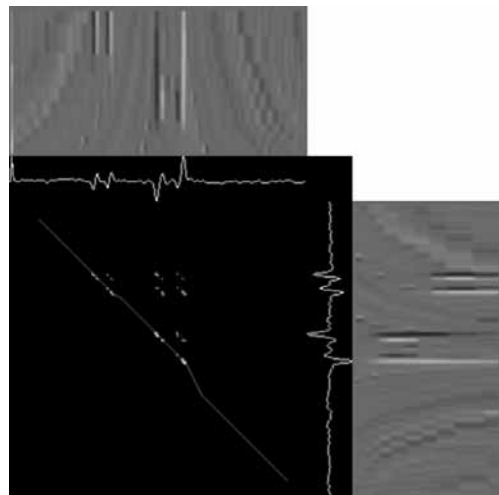
где  $c(m)$  — стоимость вершины  $m$ ;  $C(m)$  — стоимость пути от начальной вершины до вершины  $n_i$ .

Таким образом, на каждом шаге решение принимается так, чтобы суммарная стоимость пути на данном шаге плюс суммарная стоимость на всех предыдущих шагах была максимальной. Максимум суммарной стоимости достигается на последней итерации, и оптимальный глобальный путь определяется посредством обратного «развертывания» пути от конечной к начальной вершине.

После установления стереосоответствия могут выполняться различные процедуры вторичной обработки для удаления контуров, заведомо не принадлежащих объекту, например, с высотой, меньшей порогового значения, или находящихся вне исследуемого диапазона дальностей. Также весьма эффективна независимая временная (межкадровая) фильтрация отдельных контуров с выявлением устойчивых кластеров, которые могут соответствовать реальным объектам сцены.

В следующем разделе будет показана возможность практического применения метода радиального ортофото и предложены конкретные пути его реализации в современных вычислительных средах на примере создания системы реального времени для обнаружения препятствий перед автомобилем.

**Рис. 5.** Стереотождествление вертикальных проекций яркости признаков изображений как поиск пути на графе. На чёрном поле показаны вертикальные проекции яркости признаков изображений: вверху — левого, справа — правого. Яркость точки поля соответствует стоимости вершины графа. Показан путь, проходящий через вершины и задающий стереосоответствие



## 2. СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕРЕОЗРЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ПЕРЕД ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

### 2.1. Технические параметры задачи

К системе обнаружения препятствий (СОП) предъявляются следующие требования:

- 1) необходимо обнаруживать движущиеся и неподвижные непрозрачные препятствия различной формы с прямолинейными или закругленными краями, высотой над уровнем дороги не менее 10 см, шириной от 20 см до 1,5 м, находящиеся в диапазоне дальности от 5 до 100 м, в собственной полосе движения ТС;
- 2) необходимо отличать препятствия от контрастных объектов, лежащих в плоскости дороги (линии разметки, тени, блики);
- 3) система обнаружения должна быть круглосуточной и всепогодной;
- 4) обработка информации должна осуществляться в масштабе реального времени;
- 5) система обнаружения должна выдавать в систему управления ТС сигнал о наличии препятствия, а также его характеристики: дальность и положение в полосе движения ТС, ширину и высоту над уровнем дороги, относительную скорость сближения с ТС.

В состав аппаратного обеспечения СОП входит стереовидеосистема на базе двух CCD-видеокамер, устанавливаемых в области ветрового стекла ТС на высоте 106,5 см с базой 113,6 см, бортовой компьютер с платами оцифровки ТВ-изображений и спецвычислителем, поддерживающим набор функций обработки изображений на аппаратном уровне.

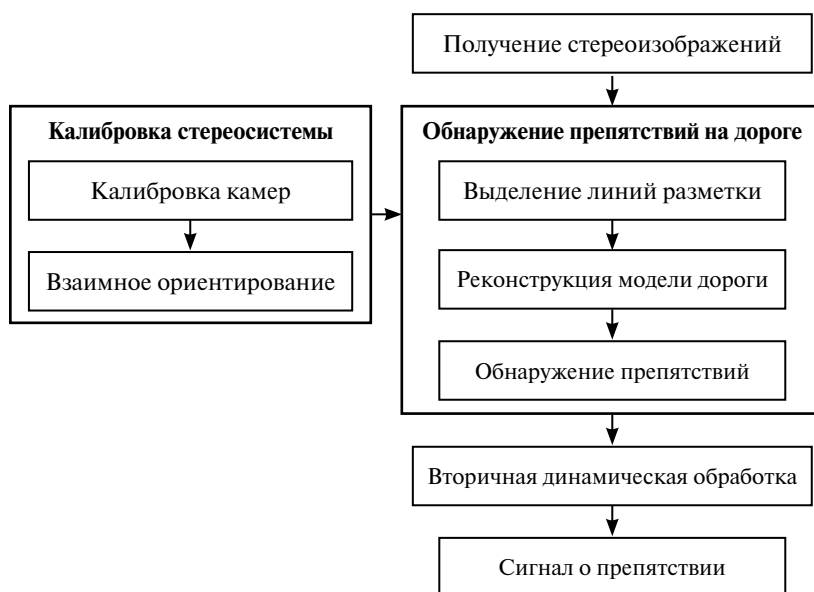


Рис. 6. Структура алгоритма обнаружения препятствий



## 2.2. Обобщенная структура алгоритма обнаружения препятствий

Общий подход к проблеме обнаружения препятствий на дороге, предлагаемый в настоящей работе, базируется на следующих основных принципах:

- 1) калибровка и ориентирование стереовидеосистемы осуществляется средствами цифровой фотограмметрии по оригинальной методике, предложенной в работе [Клуаз et al., 1999];
- 2) алгоритм обнаружения препятствий использует трёхмерную модель поверхности дороги;
- 3) трёхмерная модель поверхности дороги восстанавливается использованием продольных линий разметки, ограничивающих полосу движения автомобиля.

Структура алгоритма обнаружения препятствий представлена на рис. 6 (см. с. 209).

## 2.3. Выделение линий дорожной разметки

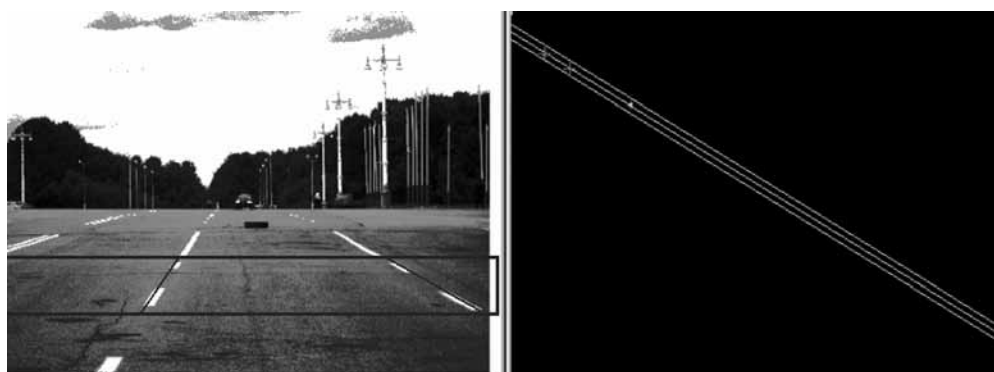
Алгоритм выделения линий дорожной разметки разработан в рамках так называемого подхода событийного анализа изображений, предложенного авторами ранее [Visilter et al., 1996]. Характерной особенностью процедур событийного анализа изображений является то, что яркостно-геометрическая модель объекта используется непосредственно в ходе низкоуровневого анализа изображения; при этом каждая значимая характеристика изображения рассматривается как событие, свидетельствующее в пользу гипотезы (ряда гипотез) о наличии и свойствах искомого объекта, а процесс проверки гипотез управляется событиями в том смысле, что каждое выявленное событие инициирует обработку лишь тех гипотез, на апостериорную вероятность которых данное событие может повлиять.

Ниже приводятся основные этапы процедуры выделения разметки.

1. *Первичное выделение сегментов разметки* — процедура основана на статистическом анализе профилей яркости в построчных горизонтальных сечениях изображения. Сегмент любой линии разметки на профиле соответствует существенному положительному яркостному контрасту относительно фона и возникновению резкого ступенчатого края. Сегменты с данными свойствами находятся методом сигма-фильтрации.

2. *Монокулярное обнаружение продольных линий разметки*. Обнаружение линий разметки основано на модификации алгоритма преобразования Хафа (Hough Transform). Суть предлагаемой процедуры заключается в голосовании пар сегментов разных строк, входящих в зону поиска, в пользу набора гипотез о положении и направлении линии разметки, представленных в виде массива-аккумулятора. Параметризация аккумулятора соответствует натуральной параметризации прямых линий, при которой линия определяется парой лежащих на ней точек. Однако вместо параметризации ( $x_{Top}$ ,  $x_{Horizont}$ ), где  $x_{Top}$  — точка пересечения прямой с верхней границей зоны;  $x_{Horizont}$  — точка пересечения прямой с линией предполагаемого горизонта, используется параметризация ( $x_{Top}$ ,  $x_{Bottom}$ ), где  $x_{Top}$  — точка пересечения прямой с верхней границей зоны;  $x_{Bottom}$  — точка пересечения прямой с нижней границей (основанием) зоны.

Такая параметризация позволяет учитывать проективную геометрию. Пучку параллельных прямых в 3D-пространстве, лежащих в одной плоскости и на изображении сходящихся в одной точке, в пространстве ( $x_{Top}$ ,  $x_{Bottom}$ ) соответствует



**Рис. 7.** Процедура монокулярного обнаружения линий разметки. Слева — исходное изображение. Показаны прямоугольная зона поиска и линии разметки, соответствующие локальным максимумам в аккумуляторе. Справа — аккумулятор модифицированного преобразования Хафа. Показана прямая, соответствующая предсказанию точки схода. Отмечены границы области точек, отстоящих от этой прямой не более чем на пороговое число пикселей

множество точек, лежащих на одной прямой (рис. 7). Поэтому при голосовании любая пара отрезков «голосует» в пользу множества прямых, таких что:

- а) прямые пересекают эти отрезки;
- б) их образы в пространстве ( $x_{Top}$ ,  $x_{Bottom}$ ) отстоят от прямой, соответствующей текущей гипотезе о нулевой плоскости, не более чем на заданное число пикселей.

3. *Стереотождествление линий разметки.* Для всех возможных пар линий, относящихся к разным изображениям, проверяются следующие условия: тангенсы углов наклона стереолинии относительно плоскостей  $Z_e - Y_e$  и  $X_e - Y_e$  и высота сдвига её стартовой точки от нулевой плоскости по оси  $Z_e$  не должны превышать пороговых значений. Пары линий, удовлетворяющие этим условиям, заносятся в список стереолиний. Линии разметки определяются на основе анализа взаимного расположения стереолиний из сформированного списка.

## 2.4. Обнаружение препятствий

В основе алгоритма обнаружения препятствий лежит метод радиального ортофото. На первом этапе выполняется пространственная реконструкция подстилающей поверхности (дороги). В предположении об относительной гладкости дороги для её описания была выбрана аналитическая модель:

$$Z(X, Y) = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Y^2,$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — координаты точки поверхности в системе координат ( $OX_e Y_e Z_e$ ).

Параметры  $a_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$  модели  $Z(X, Y)$  определяются методом наименьших квадратов по набору трёхмерных точек дорожной разметки, которые принадлежат поверхности и заведомо не относятся к обнаруживаемому объекту.

Для построения радиального ортофото в масштабе реального времени авторами предложен вычислительно эффективный алгоритм, основанный на аппаратно поддерживаемой процедуре кусочно-билинейной трансформации изображений. Суть алгоритма состоит в следующем. Область дороги разбивается на участки

с фиксированным шагом по дальности. Каждый участок имеет четыре угловые точки, задаваемые положением дорожной разметки на текущей дальности. Для каждой точки указанного набора определяется соответствующая ей точка на трансформированном изображении.

Преобразование набора из четырёх точек исходного изображения в набор из четырёх точек трансформированного изображения, будучи записано в виде

$$x = x(u, v), \quad y = y(u, v),$$

где  $(x, y)$  — координата точки на исходном изображении;  $(u, v)$  — координата точки на трансформированном изображении, может быть реализовано в рамках билинейной формы вида:

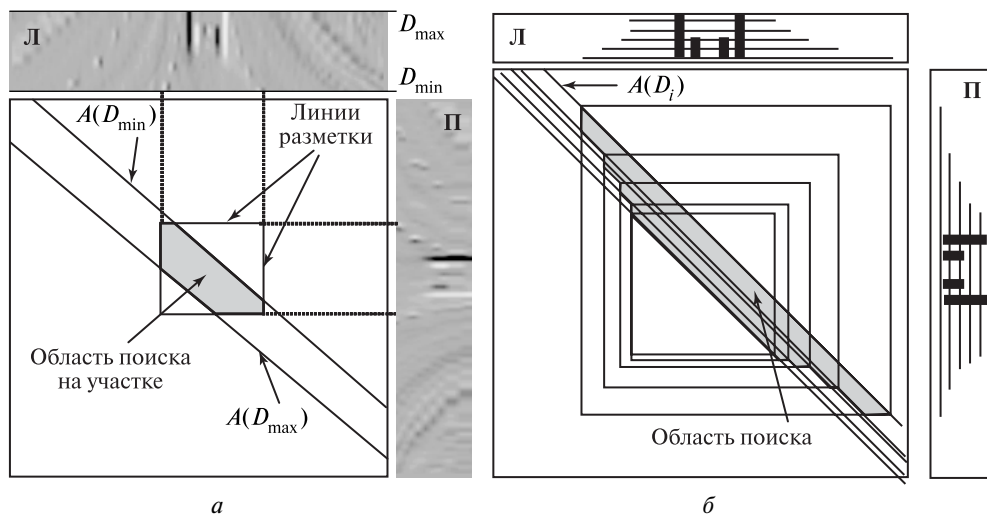
$$x = Bu + Cuv + Ev + F, \quad y = Hu + Kuv + Mv + N,$$

где  $B, C, E, F, H, K, M, N$  — коэффициенты преобразования.

Алгоритм стереооттождествления вертикальных контуров использует условие расположения препятствия в собственной полосе движения ТС, что позволяет существенно уменьшить область поиска пути, задающего стереосоответствие. По аналогии с алгоритмом построения радиального ортофото область дороги разбивается на участки, ограниченные линиями дорожной разметки. На каждом участке область поиска пути, задающего стереосоответствие, ограничивается:

- прямыми, отвечающими значениям угловой диспаратности  $A(D_{\min})$  и  $A(D_{\max})$  на минимальной  $D_{\min}$  и максимальной  $D_{\max}$  дальности участка;
- положением собственной полосы движения ТС на минимальной дальности участка (рис. 8а).

В качестве результирующей области поиска рассматривается объединение областей, полученных на отдельных участках (рис. 8б). На форму искомого пути



**Рис. 8.** Построение области поиска пути, задающего стереосоответствие: *а* — для интервала дальностей  $[D_{\min}, D_{\max}]$  (показаны фрагменты левого (Л) и правого (П) признаковых изображений для  $[D_{\min}, D_{\max}]$  и положение линий дорожной разметки); *б* — для всего диапазона дальности

дополнительно накладываются геометрические ограничения, вытекающие из условий однозначности отождествления и упорядоченности отрезков.

Полученные стереоконтуры передаются в блок многоканальной вторичной обработки информации, отличительной особенностью которой является сопровождение отдельных стереоконтуров, а не объектов в целом. Преимущество такой обработки проявляется в том, что в результирующей сборке гипотез участвуют только те контуры, информация о которых подтверждена последовательностью кадров и динамические атрибуты которых укладываются в рамки реально возможных перемещений исследуемых объектов.

## 2.5. Примеры работы системы

На рис. 9–13 (см. также с. 214) приведены примеры работы системы в различных условиях. Показаны левое и правое изображения. Обнаруженные линии разметки показаны чёрным цветом. Найденное препятствие — белый прямоугольник.



Рис. 9. Пример работы системы



Рис. 10. Пример работы системы при маневре препятствия

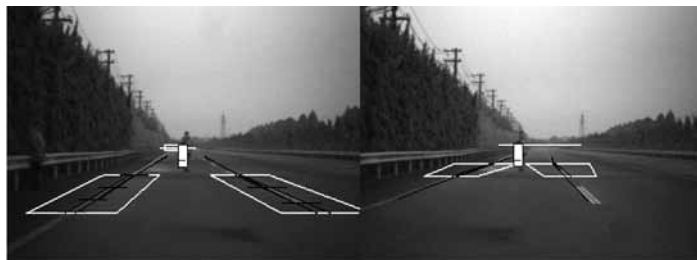
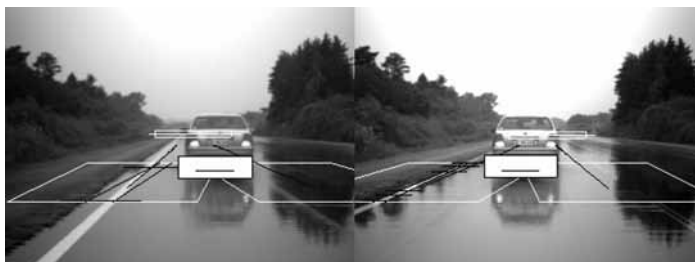
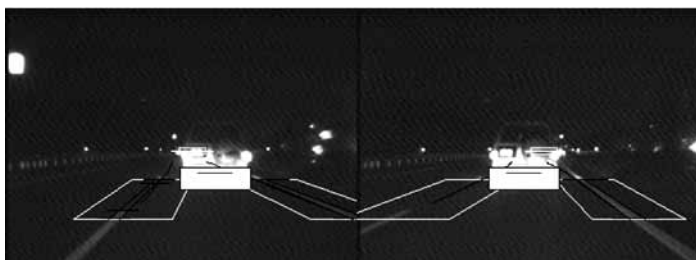


Рис. 11. Пример обнаружения пешехода



**Рис. 12.** Пример работы системы в сложных условиях мокрой дороги



**Рис. 13.** Пример работы системы в ночных условиях

### Выводы

Предложенный в работе метод обнаружения трёхмерных объектов на основе анализа радиальных ортофотоизображений был протестирован на обширной базе реальных дорожных сцен в системе обнаружения препятствий перед транспортным средством. Достоинства метода наиболее ярко проявились при работе системы в особо сложной информационной обстановке: при наличии различного рода засветок, бликов и теней на подстилающей поверхности, загораживании части препятствия, его резком маневрировании, ускорении или торможении. На имеющейся базе регистраций, включающей и указанные выше сложные случаи, вероятность обнаружения препятствий составила 0,97, вероятность ложного срабатывания — 0,02.

Алгоритмическая реализация метода полностью согласуется с архитектурой современных платформ обработки изображений, что позволяет выполнять наиболее затратные в вычислительном плане процедуры обработки изображений на аппаратном уровне, а также распараллеливать процесс вычислений и избегать хранения промежуточных результатов. Показатели быстродействия разработанных алгоритмов полностью отвечают требованиям систем реального времени.

Всё вышесказанное позволяет сделать положительный вывод о практической применимости предложенного метода и алгоритмов в перспективных системах управления сложными техническими объектами, имеющими видеодатчики.

### Литература

- Knyaz V. A., Zheltov S. Yu., Stepanyants D. G.* (1999) Method for accurate camera orientation for automobile photogrammetric system // Proc. Intern. Workshop on Mobile Mapping Technology. Bangkok, Thailand. Apr. 21–23, 1999. P. 4-3-1–4-3-6.

- Valls M., Zhou W., Dissanayake G.* (2006) Towards vision based navigation in large indoor environments // Proc. 2006 IEEE / RSJ Intern. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), 2006. P. 2096–2102.
- Vizilter Yu., Zheltov S., Stepanov A.* (1996) Events-based Image Analysis for Machine Vision and Digital Photogrammetry // SPIE Proc. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1996. V. 31. Pt. 5.
- Wang J., Kimura H., Sugisaka M.* (2004) Intelligent control for the vision-based indoor navigation of an A-life mobile robot // Artificial Life and Robotics. 2004. V. 8. N. 1. P. 29–33.
- Sun Z., Bebis G., Miller R.* (2006) On-Road Vehicle Detection: A Review // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. May 2006. V. 28. N. 5. P. 694–711.
- Zheltov S. Yu., Sybiryakov A. V., Vygolov O. V.* (2002) Car collision avoidance system based on orthophoto transformation // Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Greece, 2002. V. 34. Pt. 5. P. 125–130.

### **MOBILE ROBOT STEREOVISION SYSTEM FOR REAL-TIME OBSTACLE DETECTION**

**O. V. Vygolov, S. Yu. Zheltov, Yu. V. Vizilter**

*The Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”,  
Russia, Moscow*

In this paper the computationally efficient method of 3D-objects detection is proposed. The object is located on a relatively smooth surface of known analytical model and registered stereoscopically by stereovision system of mobile robot. The key idea of proposed method is to reduce the problem of 3D-objects detection to the problem of simple 2D-structure detection on special orthogonal projections of stereo images to the underlying surface. Projections are generated in polar coordinate system (polar orthophoto). 3D-object raised above the surface corresponds to simple cluster of vertical straight-line edges on polar orthophotos. To find these edges the hardware supported image processing procedures are proposed such as image convolution and brightness projections. Implementation of the method is considered for real-time car collision avoidance system.

*Keywords:* obstacle detection, stereovision, real-time, orthophoto.

---

**Vygolov Oleg Vyacheslavovich** — Head of Group, Candidate of Technical Science, e-mail: o.vygolov@gosniias.ru.

**Zheltov Sergey Jurevich** — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, General Director, Doctor of Technical Science, Professor.

**Vizilter Yuriy Valentinovich** — Head of the Laboratory of Computer Machine Vision, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Scientist, e-mail: viz@gosniias.ru.