

# МЕТОД ГЕОЛОКАЦИИ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ БЕЗЭКИПАЖНОГО КОРАБЛЯ

С.А. Алёшин, И.А. Беланов, Р.В. Леоненков, А.И. Сидоренко, А.И. Ким

Предлагается метод обработки информации, получаемой с цифровой видеокамеры и датчиков положения в составе навигационного комплекса безэкипажного корабля (БЭК), который позволяет определять дистанцию, направление, а также относительную скорость и ускорение относительно объекта наблюдения. Этот метод может найти широкое применение в морской робототехнике для определения расстояния до объектов в надводной и подводной среде. Для обработки матрицы изображения используются математические операции, позволяющие получить сведения о движении относительно объекта наблюдения. Подобные системы можно комбинировать с машинным зрением, для увеличения автономности средств морской робототехники, а также для повышения безопасности управления наземными и надводными видами транспорта. Предлагаемая система обработки информации является модульной, позволяющей при увеличении пространственных параметров от дополнительных измерительных систем и датчиков расширить возможности системы управления БЭК. Основными преимуществами данного метода являются недорогой исходный комплект датчиков, относительная простота математических расчётов, не требующая мощных вычислительных систем. Пассивный метод измерения обеспечивает высокую энергоэффективность и скрытность относительно наблюдаемого объекта. Все эти особенности могут иметь решающее значение для времени автономной работы и возможности скрытной работы БЭК.

**Ключевые слова:** машинное зрение, инерциальная навигация, безэкипажный корабль

## Введение

Системы определения расстояния до объектов наблюдения могут как служить вспомогательным инструментом для пилота (водителя) какого-либо транспорта, так и стать основной системой безопасности в навигации, предупреждая об опасности или автоматически корректируя движение. Целью работы является разработка специального программного обеспечения БЭК для определения расстояния до объекта наблюдения, внесенного в базу данных системы, при минимальном комплекте оборудования.

Известные системы распознавания графических образов имеют следующие недостатки:

- сложность реализации – такие системы необходимо обучать перед эксплуатацией, используя набор признаков (Хаар, HOG, SURF и т.д.) [1];
- первоначальное обучение требует больших временных затрат как для подбора материалов и выделения интересующих признаков (если не имеется готовых библиотек для задачи), также и время, потраченное на обучение на обычном компьютере, может

длиться часами, днями или даже неделями, в зависимости от потребностей;

- для решения подобных задач требуется достаточно мощная вычислительная система.

Предлагаемая система является модульной и может расширить свои функциональные возможности за счёт дополнительных датчиков, таких как гироскоп, акселерометр, модуль GPS, компас и т.д. Например: акселерометр можно использовать для уточнения расстояния до объекта в надводной среде, во время качки, используя проекцию кажущегося ускорения для пересчёта значений.

Основным ядром системы является её аналитическая составляющая – в минимальной сборке достаточно откалибровать цифровую видеокамеру (ЦВК) и ввести параметры ЦВК и объектов распознавания для того, чтобы система начала работать.

## ■ Алгоритм работы системы распознавания образов

Для распознавания образов целесообразно использовать наиболее отлаженную библиотеку с

открытым исходным кодом OpenCV [2] (в .Net используется Emgu.CV), в которой для идентификации используется каскад Хаара. После обучения система способна довольно точно выполнять обнаружение всех объектов, которым обучил её пользователь.

Обнаруженные объекты интерпретируются как прямоугольник, у которого по умолчанию нам известны левая верхняя точка, а также ширина и высота объекта относительно неё, и необходимо найти центр основания объекта.

Изображения ЦВК можно представить в виде матрицы размерностью  $x \times y$ , где для каждого обнаруженного объекта необходимо найти координату центра основания. Искомые координаты обозначим как  $x_1$  и  $y_1$ , а высоту и ширину как  $h$  и  $w$  соответственно, где  $x_1 = x + w / 2$  и  $y_1 = y + h$ .

Зная внешние или внутренние данные, можно определить, на каком расстоянии от наблюдателя находятся обнаруженные объекты. Для простоты при работе с внешними данными анализируется информация о видимых объектах и определяется расстояние. При работе с внутренними данными известно положение наблюдателя в пространстве, в том числе расстояние до горизонта, что в совокупности с данными ЦВК позволяет определить расстояние до объектов.

## ■ Методы определения расстояния по изображению

Существуют различные способы определения расстояния по изображению, среди них: алгоритмы стереозрения, метод определения по ширине (высоте) объекта [3], анализ размытия объекта [4]. В данной работе будут рассмотрены использование одной ЦВК в совокупности с датчиками положения и возможные алгоритмы обработки данных.

### Метод аппроксимации

Рассмотрим частный случай, в котором для получения изображения используется одна ЦВК, расположенная на мачте корабля (или в любом другом месте, имеющем неизменное положение), также предположим, что нам известно, на какой высоте над уровнем моря она расположена. Тогда можем узнать расстояние до горизонта (первая опорная точка для нахождения расстояния до надводных объектов):

$$d = \sqrt{(R + h)^2 - R^2}, \quad (1)$$

где  $d$  – расстояние до видимого горизонта, м;  
 $R$  – радиус Земли (примем за 6371000 м);

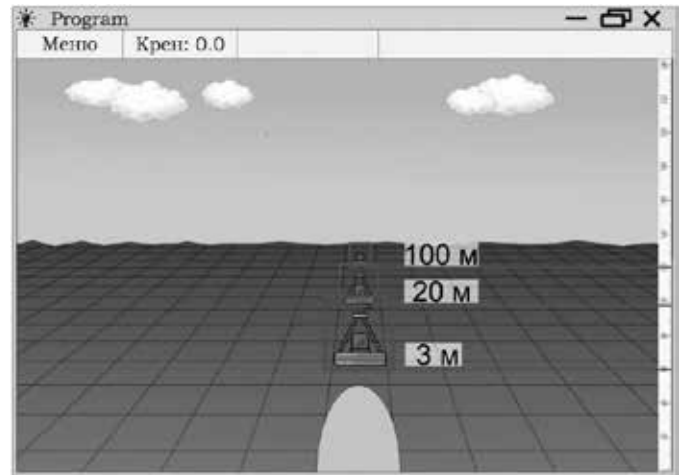


Рис. 1. Вариант расположения объектов вдоль одной линии

$h$  – высота точки наблюдения относительно поверхности (в данном случае воды), м.

Рассмотрим случай, когда все объекты находятся на одной линии (рис. 1). В этом случае матрица состоит из значений, одно из которых – это ордината, а второе – глубина (расстояние до объекта), и применим для такой зависимости гиперболическое уравнение регрессии.

Рассмотрим конкретную задачу с исходными данными (табл. 1), приближенными к реальным данным, приняв размерность матрицы  $320 \times 240$ . Допустим, что известно расстояние до пяти объектов (пяти горизонтов). Найдем отношения значения ординаты (пикселя) и глубины (расстояние до объекта) с учётом высоты наблюдателя 0,5 м (табл. 1).

Даже имея относительно небольшое количество данных, но зная какой метод аппроксимации наиболее верно описывает физическую модель, можно достаточно точно построить функцию расстояния до объекта (рис. 2).

При перемещении объекта лишь по одному вектору от центра абсциссы (рис. 3) его расстояние до

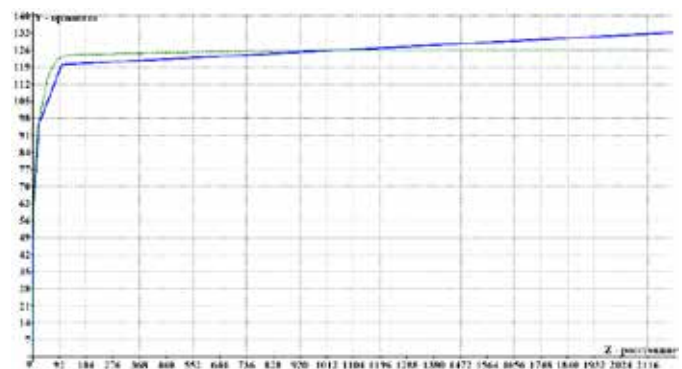


Рис. 2. Графическое представление соотношения значения ординаты матрицы изображения и расстояния до объекта (сплошная линия – табличные значения; пунктирная линия – полученная функция)

Таблица 1. Данные объектов вдоль одной линии

у (пиксель)	z (метр)
50	0
60	3
95	20
120	100
135	2524

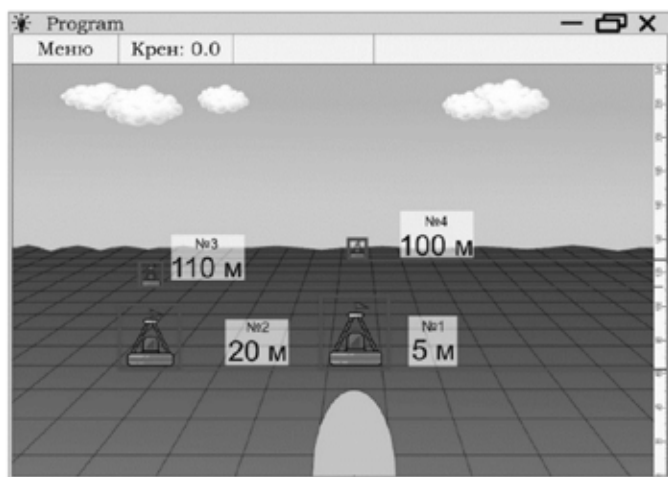


Рис. 3. Вариант отображения объектов, расположенных случайным образом

ЦВК будет изменяться. Для решения задачи можно использовать любую функцию нелинейной аппроксимации.

### Метод интерполяции

В данном случае не строится общая функция по точкам, а находятся промежуточные значения. Этот способ интересен тем, что можно не производить многократные расчёты по функции, а обращаться к таблице с уже рассчитанными значениями по координатам при условии, что высота ЦВК и угол обзора не изменяются.

Нет необходимости интерполировать все данные таблицы, достаточно использовать одну ее половину относительно абсциссы. Представим данные (табл. 2), которые схематично изображены на рис. 3 в виде таблицы сопряжённости с четырьмя известными трёхмерными координатами (табл. 3).

Таблица 2. Данные объектов в трёхмерном представлении

x – абсцисса (пиксель)	y – ордината (пиксель)	z – глубина (метр)
48	16	20
48	112	110
160	16	5
160	128	100

Таблица 3. Отображение глубины в виде таблицы сопряжённости (ячейки с фоном – известные величины, по которым производилась интерполяция)

у (пиксель)	Дистанция, м							
	128	112	96	80	64	48	32	16
128	126	122	118	114	109	106	102	100
112	110	113	109	104	99,9	96,2	93,3	91,8
96	106	102	98	93,8	89,9	86,7	84,4	83,1
80	90,6	87,4	84	80,5	77,4	74,8	72,9	71,9
64	73,6	70,7	67,8	64,9	62,3	60,1	58,5	57,7
48	55,8	53,1	50,3	47,7	45,3	43,3	41,8	41,1
32	37,8	35,1	32,4	29,8	27,4	25,4	23,9	23
16	20	17,4	14,8	12,2	9,88	7,83	6,2	5
x (пиксель)	48	64	80	96	112	128	144	160

Для большей наглядности используем трёхмерные графики представления поверхности (рис. 4). В данном случае присутствует недостаток исходных данных: внешний вид плоскости при большем количестве точек имеет более «правильную форму». Требование большого количества исходных данных является одним из недостатков данного метода.

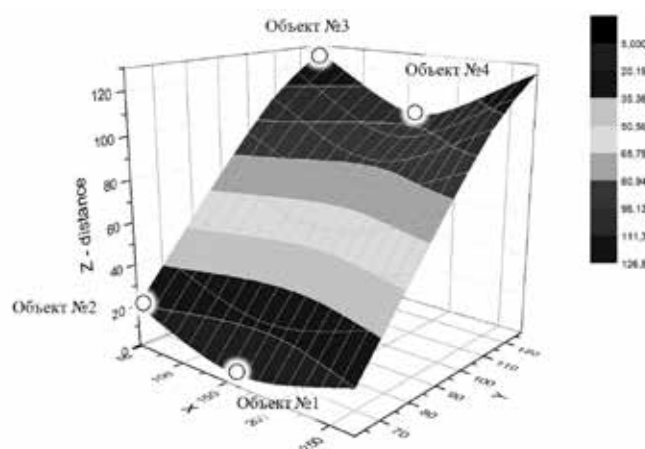


Рис. 4. Отображение глубины в виде трёхмерного графика

### Метод тригонометрических функций с уточнением

Основная идея метода – нахождение расстояния при помощи тригонометрических расчетов и аффинных преобразований. В частном случае, когда объекты находятся вдоль одной прямой:

$$d = h \times y / \tan \left( \frac{y}{h_m \alpha^{-1}} + \left( 90^\circ - \left( \beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где  $d$  – расстояние до объекта на одной прямой, м;  
 $h$  – высота на которой находится ЦВК, м;  
 $y$  – искомое значение по ординате;  
 $h_m$  – высота матрицы;  
 $\alpha$  – угол обзора ЦВК по вертикали, градус;

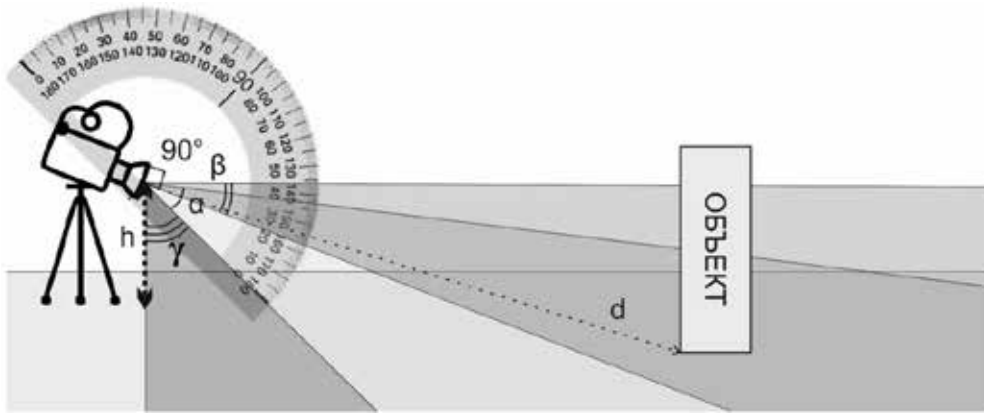


Рис. 5. Пояснения к формуле (2)

$\beta$  – угол, под которым находится ЦВК относительно поверхности (дифферент), градус (рис. 5).

Рассмотрим вариант определения дистанции в трёхмерном пространстве. Расстояние до объекта, находящегося не на одной прямой с ЦВК (рис. 6):

$$d_s = d / \cos\left(\frac{(w_m - x)\varepsilon}{w_m}\right), \quad (3)$$

где:  $d_s$  – искомое расстояние, м;

$w_m$  – ширина матрицы;

$x$  – искомое значение по горизонтали (абсциссе);

$\varepsilon$  – угол обзора ЦВК по горизонтали (абсциссе), определяется возможностями ЦВК, градус.

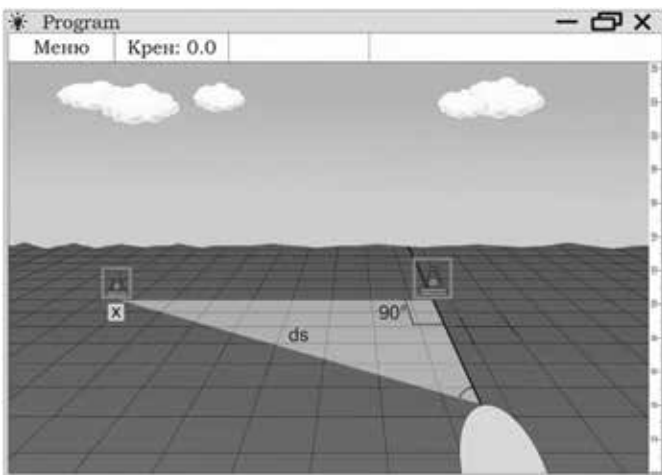


Рис. 6. Пояснения к определению расстояния по формуле (3)

Далее рассмотрим вариант определения расстояния, когда в условиях морского волнения изменяется дифферент.

При условии, когда ЦВК меняет свой дифферент и объект попадает в объектив и идентифицируется, необходимо учесть поправки в расчётах. Примем, что «точка объекта» — это середина его основания, и для того чтобы отображаемое расстояние не изме-

нилось, создадим новую виртуальную точку, которая будет находиться в том же месте, где она находилась бы при нулевом дифференте. Выразим эти предположения в виде:

$$y = y_0 + \frac{h_m}{\alpha} \times \beta, \quad (4)$$

где:  $y_0$  – начальное значение по ординате, при нулевом дифференте.

Для пересчёта координат объекта при изме-

нении крена ( $\theta$  – угол, под которым находится ЦВК относительно поверхности (крен), градус) используем аффинные преобразования и представим матрицу преобразований в виде отдельных формул коррекции для абсциссы и ординаты.

Рассмотрим поворот фигуры вокруг произвольной точки на произвольный угол с помощью матрицы. Чтобы произвести любое сложное преобразование, необходимо разложить его на базовые операции. Поворот фигуры или в данном случае точки вокруг другой произвольной точки  $(x_0, y_0)$  на угол  $\theta$  состоит из трёх базовых операций:

- 1) перенос точки на вектор  $A(-x_0, -y_0)$  для совмещения точки  $(x_0, y_0)$  с началом координат,
- 2) поворот точки на угол  $\theta$ ,
- 3) перенос точки на вектор  $B(x_0, y_0)$  для возвращения её в исходное положение.

Пусть мы хотим повернуть точку с координатами  $A(x, y)$  вокруг точки  $D(x_0, y_0)$  на угол  $\theta$ . Пусть  $P_s$  – матрица переноса точки на вектор  $A(-x_0, -y_0)$ ,  $V_\theta$  – матрица поворота на угол  $\theta$ ,  $P_s$  – матрица переноса точки на вектор  $B(x_0, y_0)$  [5]:

$$(x \ y \ 1) \times P_s \times V_\theta \times P_s = (x \ y \ 1) \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_0 & -y_0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_0 & y_0 & 1 \end{pmatrix} = (x \ y \ 1) \times \quad (5)$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ x_0 \cos \theta - y_0 \sin \theta - x_0 & x_0 \sin \theta - y_0 \cos \theta - y_0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для удобства представления и адаптации матрицы под численные методы представим её в виде формулы для  $x$  и  $y$ . Исходя из полученной матрицы:

$$x = x_0 + (x - x_0) \cos \theta - (y - y_0) \sin \theta;$$

$$y = y_0 + (y - y_0) \cos \theta + (x - x_0) \sin \theta. \quad (6)$$

Координаты  $(x, y)$  являются центром основания обнаруженного объекта, угол  $\beta$  является креном и определяется акселерометром. Необходимо определить координату точки вращения. Обратимся к рис. 6, где прямая, расположенная перпендикулярно плоскости, на которой находится ЦВК, и является точкой  $(x_0, y_0)$ . В данном примере точка вращения находится за пределами матрицы ЦВК (не попадет в объектив камеры), в таком случае координата будет иметь отрицательное значение. В общем виде можно представить:

$$x_0 = \frac{w_m}{2};$$

$$y_0 = (90 - (\gamma + \alpha))c, \quad (7)$$

где  $\gamma$  – угол между перпендикуляром к поверхности и начальным углом обзора ЦВК, градус; (присутствует на рис. 5);  $c$  – отношение одного градуса угла к высоте пикселей.

## Заключение

Для определения дистанции до объекта наилучшим методом является использование тригонометрических функций и аффинных преобразований. Этот метод не требует большого количества исходных данных и легко адаптируется под новое оборудование и условия эксплуатации. Таким образом, система, имеющая лишь цифровую камеру и акселерометр, может определять расстояние до объектов.

В настоящее время в рамках работ СКБ САМИ ДВО РАН по созданию безэкипажного корабля – носителя высокоточного батиметрического комплекса, разрабатывается специальное программное обеспечение, основанное на изложенном методе. Использование такой системы необходимо для автоматической работы безэкипажных средств в навигационно-сложных условиях: в прибрежных зонах, в портах, вблизи шельфовой добычной инфраструктуры.

## Об авторах

**АЛЁШИН Сергей Андреевич**, ведущий инженер-программист ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: автоматизация морских исследований (automation of marine researches)

Тел. +79004281838, Факс: +74242236966

E-mail: sergey.crusher@gmail.com

**БЕЛАНОВ Игорь Арсенович**, ведущий инженер-программист ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: автоматизация морских исследований (automation of marine researches)

Тел.: +79241886176, Факс: +74242236966

E-mail: belanov.igor@mail.ru

**ЛЕОНЕНКОВ Роман Викторович**, младший научный сотрудник ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: автоматизация морских исследований

Тел.: +79625804776, Факс: +74242236966

E-mail: roma1313@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9360-2849

**СИДОРЕНКО Артем Игоревич**, младший научный сотрудник ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Алексея Максимовича Горького, д. 25

Область научных интересов: автоматизация морских исследований

Тел.: +79147653781, Факс: +74242236966

E-mail: sidorenko.artem@mail.ru

**КИМ Алексей Иванович**, младший научный сотрудник ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: автоматизация морских исследований

Тел.: +79140967557, Факс: +74242236966

E-mail: 79140967557@yandex.ru

## ЛИТЕРАТУРА

1. Половинкин П.Н. Детекторы и дескрипторы ключевых точек. Алгоритмы классификации изображений. Задача детектирования объектов на изображениях и методы её решения: Учебный курс «Разработка мультимедийных приложений с использованием библиотек OpenCV и IPP». Нижний Новгород: Нижегородский гос. университет им. Н.И. Лобачевского, 2013. 38 с.
2. Официальный сайт библиотеки OpenCV – <https://opencv.org/>.
3. Локтев Д.А., Алфимцев А.Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга // Наука и инновации. 2013. № 11 (23). С. 4. doi: 10.18698/2308-6033-2013-11-996.
4. Локтев А.А., Локтев Д.А. Метод определения расстояния до объекта путем анализа размытия его изображения // Вестн. МГСУ. 2015. № 6. С. 140–151.
5. Демин А.Ю., Кудинов А.В. Компьютерная графика: учеб. Пособие. Томск: Том. политехн. ун-т., 2005. 160 с.