

## СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ОТНОСИТЕЛЬНО РАЗМЕТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

П.С. Сорокоумов (*petr.sorokoumov@gmail.com*)  
НИЦ “Курчатовский институт”, Москва

**Аннотация.** Цель данной разработки — обеспечить позиционирование мобильного робота относительно края контрольной площадки при наличии строгих требований по ориентации и расстоянию до края по данным видеокамеры. Контрольная площадка по цвету резко контрастирует с окружающей местностью, что можно использовать для её распознавания. Позиционирование выполняется по данным видеокамеры с известными параметрами, установленной на роботе в известном положении, причём для упрощения формулировки задачи применены средства нечёткой логики.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** позиционирование, нечеткая система управления, PID-регулятор.

### Введение

Дистанционное зондирование Земли – это процесс постоянной спутниковой съёмки планеты для сбора информации о различных процессах природного и антропогенного характера. Для достижения высококачественных результатов необходим постоянный контроль качества работы спутников. Помимо прочих методов, часто используется сравнение параметров участков поверхности (контрольных площадок), измеренных спутником, с их же значениями, но измеренными приборами на Земле, что позволяет корректировать результаты спутниковой съёмки, повышая достоверность собранных данных. Этот процесс осложняется тем, что измерительная аппаратура весьма дорого стоит, и оборудовать ею каждую из множества площадок невыгодно, поэтому до сих пор перенос и настройку этой аппаратуры выполняют люди-операторы. В связи с этим возникла задача разработки беспилотного транспортного средства,

которое позволит автоматически переносить аппаратуру к нужной контрольной площадке и располагать её в соответствии с требованиями задачи.

## 1 Постановка задачи

Для функционирования обслуживающего беспилотного транспортного средства необходимо обеспечить его автоматическое перемещение в нужное положение относительно некоторой заданной заранее области (далее — контрольной площадки). Эта площадка выделяется на окружающей местности своей окраской, однородной с высокой степенью точности; её края высоко контрастны с грунтом как при естественном, так и при искусственном освещении. При этом характерные размеры площадки значительно больше характерных размеров робота, и вся доступная для движений робота местность считается горизонтальной. Нужное положение робота определяется не в абсолютных географических координатах, а по параметрам положения относительно края площадки ( $d, \Theta$ ), где  $d$  — расстояние от центра симметрии робота до края площадки,  $\Theta$  — угол между линией края площадки и передним направлением робота (рис. 1). При этом требуется обеспечить среднеквадратическое отклонение  $d$  менее 2 см,  $\Theta$  — менее  $1^\circ$ .

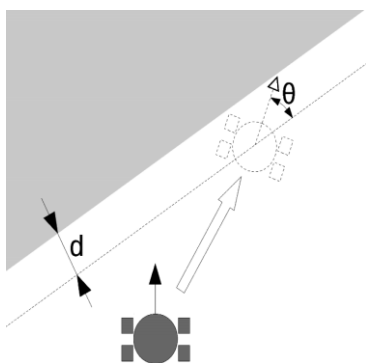


Рис. 1. Условия задачи.

Для позиционирования робота можно использовать различные подходы. Использование спутниковых систем навигации в данном случае осложнено тем, что полигоны с контрольными площадками часто располагаются в горной местности, где сигналы от части созвездия спутников недоступны либо искажены. В связи с этим возникла необходимость разработать автономную навигационную систему, частью

которой и является реализуемая вспомогательная система позиционирования для беспилотного транспортного средства.

Известно много подходов к решению задач позиционирования (весьма полный обзор приводится, например, в [Borenstein, 1997]). Для задачи позиционирования робота по контрольной площадке оказалось целесообразным использовать изображение контрольной площадки, получаемое установленной на мобильный робот откалиброванной камерой. Для облегчения интеграции в существующую систему управления реализация готовой системы выполнена в виде компонента под управлением ROS.

Решение задачи можно разделить на этапы:

- Распознавание края контрольной площадки по данным видеокамеры;
- Определение положения края контрольной площадки относительно робота;
- Управление перемещением робота для получения точной ориентации относительно контрольной площадки.

Рассмотрим различные варианты решения данной задачи.

## **2 Алгоритм распознавания положения края контрольной площадки**

Контрольная площадка имеет вид многоугольника, нарисованного на ровной горизонтальной поверхности краской, контрастной с этой поверхностью. Характерные размеры элементов контрольной площадки намного превосходят характерные размеры используемого робота, поэтому при позиционировании можно считать край прямой линией.

### **2.1 Обзор методов распознавания края контрольной площадки**

Для определения границ контрольной площадки по изображению могут быть использованы методы одной из 2 групп – распознающие сплошные области (сегментация) либо их границы (распознавание края).

При сегментации изображение (целиком или полностью) разделяется на отдельные части, в данной задаче — контрольную площадку, грунт и, возможно, посторонние предметы. Из границ выделенных областей далее выбирается та, которая лучше всего подходит под некоторое заранее составленное описание искомой границы. Достоинство этих методов в том, что они позволяют с высокой надёжностью определить верную границу [Singh, 2014], так как сегментация через кластеризацию в рассматриваемых условиях должна, скорее всего, дать весьма качественные результаты (площадка и грунт примерно однородны, резко

контрастируют друг с другом, переходных областей между ними нет). Однако, эти методы приводят к неоднократной обработке значительного числа точек по всей площади изображения для формирования и обновления кластеров, что может плохо сказаться на скорости работы. Кроме того, при работе в реальных условиях могут появиться факторы, нарушающие однородность областей: отражение солнечного/лунного света, тени от облаков, загрязнения площадки и т.п.

Выделение границ, в данном случае — прямых линий, позволяет выделить участки изображения с перепадами яркости (либо другой характеристики) и затем сгруппировать их так, чтобы они составляли искомую фигуру. В поставленной задаче это означает, что после выделения всех прямых линий изображения остаётся только выбрать из них ту, которая наилучшим образом удовлетворяет условию задачи. Эти методы лучше подходят для поставленной задачи, так как требуют только различимой границы между областями, а не однородности самих областей [Jahne, 2005].

Известно множество методов выделения границ. Наиболее простые из них – алгоритмы, основанные на линейной фильтрации (методы Собеля, Прюитт, Шарра, Робертса), определяющие «толстую границу» без выделения векторных примитивов. Существуют методы дополнительной обработки, позволяющие выявить «тонкую границу» анализом малых окрестностей точек (детектор Кэнни и его вариации). Однако, в нашем случае (искомая прямая только одна, количество посторонних краевых точек мало) возможно не подавлять локальные экстремумы, а сразу решать задачу поиска.

Для выделения прямых часто применяют преобразование Хафа и основанные на нём техники. Однако, оно требует выделения памяти для хранения промежуточных результатов, причём с ростом числа искомых угловых коэффициентов (что может повысить точность) требования к памяти нарастают линейно. Предлагаемый метод лишён этого недостатка, так как требует память только для хранения граничных точек, что может быть желательно для реализации на встроеном компьютере целевого робота. К недостаткам предлагаемого метода относится непостоянное время работы на постоянных данных, однако, как будет видно из результатов моделирования, в условиях рассматриваемой задачи это не приводит к значительным задержкам.

## **2.2 Описание простейшего алгоритма распознавателя линий**

Первый вариант алгоритма распознавания линий основан на выделении границ путём RANSAC. Последовательность действий при обработке следующая:

- отфильтровать ВЧ-шум;

- выделить границы одним из примитивных методов линейной фильтрации (пока использован фильтр Собеля);
- отделить точки границы от фона (например, пороговой фильтрацией с фиксированным порогом);
- для какой-нибудь пары разных точек границы:
  - рассчитать уравнение линии, проходящей через эту пару точек;
  - рассчитать евклидово 2–расстояние от каждой граничной точки до этой линии;
  - если вблизи этой линии оказалось достаточно много граничных точек, сделать вывод, что линия найдена; рассчитать её концевые точки;
  - иначе выбрать новую пару граничных точек;
- вернуть линию, если она найдена

Как видно, у этого алгоритма весьма много дополнительных параметров (фильтр ВЧ шума, фильтр выделения границы, метод расчёта близости точек к линии), однако, для простейшей реализации системы оценить данные параметры достаточно просто. Вопрос о калибровке камеры при этом следует решать отдельно.

Достоинством этого алгоритма является его производительность для данных условий. Число неудачных повторов обработки при наличии границы в кадре редко превосходит 1–2 (рис. 2).

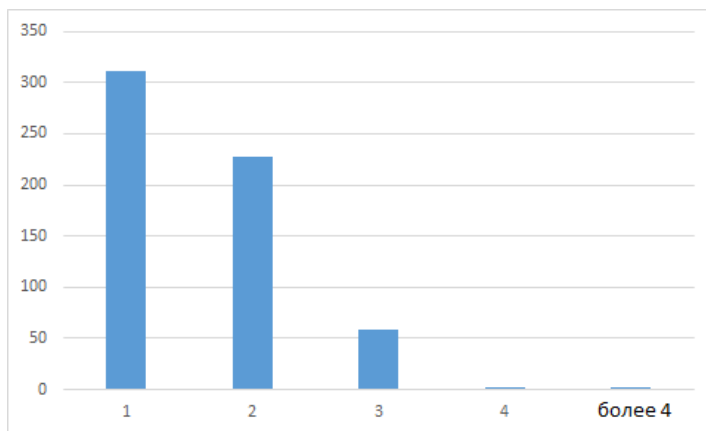


Рис. 2. Гистограмма числа повторов выбора граничной точки для успешного поиска линии на тестовой выборке.

Алгоритм был промоделирован с помощью Octave и проверен на наборе сгенерированных изображений (6 серий по 100 изображений с границей между чёрной и белой областью, гауссов шум по сериям:  $\sigma=0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$  от амплитуды яркости) и полученных фотокамерой в лабораторных условиях (рис. 3). Выяснилось, что данный метод работает достаточно надёжно при наличии резкой границы между тёмной и светлой областями (рис. 4, A); перепады текстуры без перепадов яркости не выявляются, что логично.

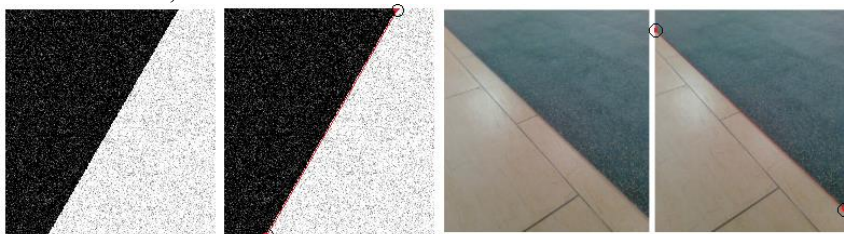


Рис. 3. Результаты распознавания линий на тестовом (слева) и полученном в лабораторных условиях (справа) изображениях.

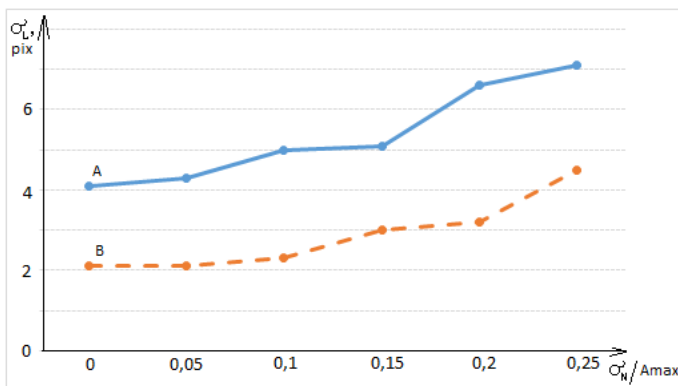


Рис. 4. Зависимость среднеквадратического отклонения положения конца найденной линии от шума на тестовом изображении (шум выражен через отношение среднеквадратического отклонения к амплитуде яркости) для исходного алгоритма (A) и дополненной версии (B)

Полученный метод оказался вполне работоспособным. Однако, в реальных условиях при управлении роботом проявилась нестабильность алгоритма RANSAC. Для повышения стабильности работы оказалось возможным дополнить алгоритм путём дополнительного поиска максимума градиента исходного изображения в малой локальной окрестности выбранных точек (размеры данной окрестности были

выбраны на основе результатов моделирования начальной версии алгоритма, показанных на рис. 4). Эксперименты показали, что данный алгоритм работает стабильнее исходного (рис. 4, В).

### 3 Определение положения края площадки относительно робота

В данной задаче по известным геометрическим параметрам мобильного робота с камерой требуется определить положение линии края площадки относительно робота. При этом также известны характеристики камеры (размеры изображения, а также фокусное расстояние либо обозреваемый угол) и наблюдаемое положение 2 точек, лежащих на краю площадки.

Задача в такой формулировке элементарно решается из геометрических соображений. Зададим локальную систему координат робота так, что ось  $X$  направлена по переднему направлению робота, ось  $Z$  — вверх, ось  $Y$  образует с ними правую тройку, то есть направлена влево; начало координат совпадает с центром симметрии робота. Пусть  $\mathbf{c}$  — оптический центр камеры,  $\mathbf{d}$  — направление её оптической оси,  $\mathbf{t}$  и  $\mathbf{r}$  — векторы, задающие плоскость кадра, имеющего размеры  $w$  и  $h$  (рис. 5).

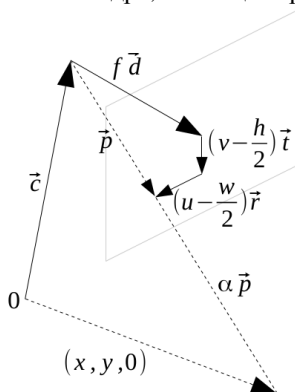


Рис. 5 Определение положения края площадки по его изображению

Направление  $\mathbf{p}$  на точку кадра  $(u, v)$  в координатах робота можно рассчитать как

$$\mathbf{p} = f\mathbf{d} + (v - 0.5h)\mathbf{t} + (u - 0.5w)\mathbf{r}, \quad (1)$$

из чего получаем её декартовы координаты:

$$x = \mathbf{c}_x - \mathbf{c}_z \mathbf{p}_x / \mathbf{p}_z, \quad y = \mathbf{c}_y - \mathbf{c}_z \mathbf{p}_y / \mathbf{p}_z \quad (2)$$

Зная декартовы координаты 2 точек линии, можно легко найти её положение относительно робота.

#### 4 Управление движением робота

На основе изложенных ранее результатов распознавания был разработан алгоритм управления роботом. В его основе лежит PID-регулятор, позволяющий успешно привести робота в заданное положение; никакого запоминания местности роботом не проводится [Jazar, 2010]. Однако, так как область наблюдения камеры ограничена, то возможны положения камеры, при которых прямолинейное использование PID-регулятора приведёт к выходу границы из поля зрения. Например, если робот должен подойти к границе точно боком (т.е.  $\Theta=0$ ), а камера смотрит в боковом направлении для точного позиционирования, то, когда робот увидит линию, он не должен двигаться к ней по кратчайшей траектории — ведь это приведёт к тому, что камера отвернётся от линии, и задача не будет решена. Поэтому оказалось целесообразным разделить пространство в окрестностях линии на две части — зону приближения и зону ориентации. Данные зоны было решено моделировать нечёткими множествами точек пространства в окрестностях границы. Графики функций принадлежности приведены на рис. 6.

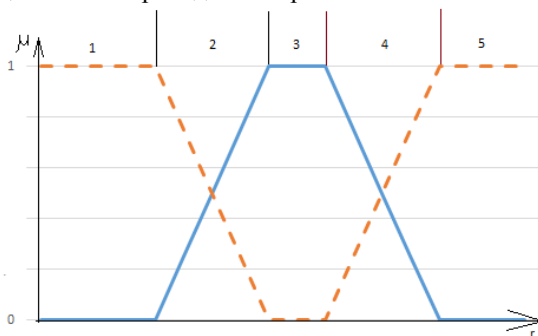


Рис. 6. Функции принадлежности точек пространства к зонам приближения (пунктир) и ориентации (сплошная линия); целевое расстояние находится в середине зоны ориентации.

Ширина зон приближения и ориентации определяется положением камеры на роботе таким образом, чтобы внутри зоны ориентации робот гарантированно не потерял из вида линию границы при условии, что он её увидел. Размеры переходных областей (2 и 4 на рис. 6) определяются заранее по скоростным характеристикам робота.



Нечёткое описание областей позволяет свести задачу к работе нечеткой системы управления [Seising, 2007].

Таким образом, алгоритм формирования управляющих сигналов можно описать следующим образом:

- сформировать управляющие сигналы системы, отвечающей за приближение робота к краю площадки.
- сформировать управляющие сигналы системы, отвечающей за правильную ориентацию робота.
- получить сумму сигналов первой и второй систем, взвешенных в соответствии с функциями принадлежности.

## 5 Реализация системы позиционирования

Система реализована в виде набора модулей ROS с применением средств библиотеки OpenCV. Моделирование тестового робота осуществлялось в среде Gazebo (внешний вид модели показан на рис. 7а, вид с камеры модели в её крайнем положении – 7б); в качестве реальной тестовой платформы использован DrRobot X80 с установленной видеокамерой.

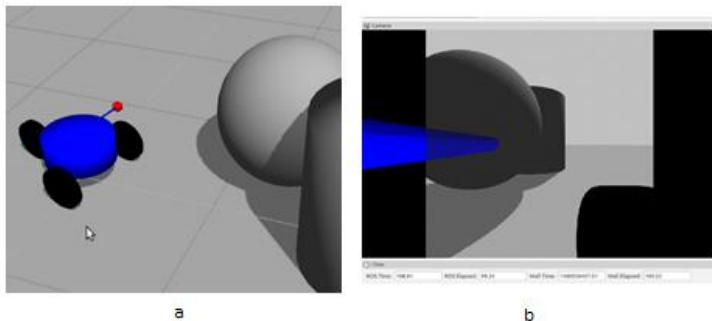


Рис. 7. Внешний вид модели (а) и вид с её камеры (б)

Тестирование алгоритма на модели показало, что при надлежащем подборе коэффициентов модель способна достичь требуемых показателей точности позиционирования за приемлемое время. Рис. 8 отражает некоторые зависимости результатов моделирования от его параметров.

Тестирование алгоритма выявления линий на реальном роботе показало, что данный алгоритм и в этом случае позволяет успешно решать поставленную задачу. В частности, обработка видеоданных с тестовой камеры (кадр 640x480, 30 кадров в секунду) проводилась в реальном времени; при этом система управления позволяла достичь заданной позиции за 2-4 секунды при начальной ошибке позиции 1.5-2м. Проблемы

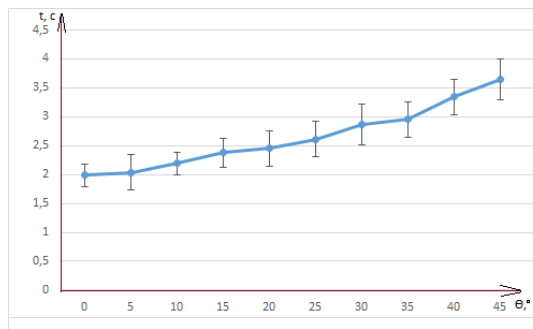


Рис. 8. Пример зависимости времени достижения цели от начальной ориентации робота при прочих равных условиях (для каждого угла выполнено 50 повторов моделирования)

с работой (устойчивые отказы распознавания линии) возникают при наличии на изображении длинных лишних границ (например, из-за посторонних предметов), в том числе не пересекающих искомую границу, а также при наличии бликов на контрольной площадке. Однако эти проблемы при соблюдении режима эксплуатации целевой системы окажутся незначительными (съёмка будет проводиться преимущественно в безлюдных местностях и в темное время суток).

### Заключение

В данной работе описаны разработка и реализация системы позиционирования мобильного робота с применением средств нечёткой логики. Данная система успешно решает поставленную задачу, обеспечивая позиционирование с требуемой точностью и скоростью.

### Список литературы

- [Borenstein, 1997] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, D. Wehe. Mobile robot positioning — sensors and techniques // Invited paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots. Vol. 14 No. 4, pp. 231 – 249, 1997.
- [Jahne, 2005] B. Jahne, Digital Image Processing. Springer Science & Business Media, 2005.
- [Jazar, 2010] R.N. Jazar. Theory of Applied Robotics. 2nd edition. Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1749-2.
- [Seising, 2007] Seising, R. The Fuzzification of Systems. The Genesis of Fuzzy Set Theory and Its Initial Applications . Springer-Verlag.
- [Singh, 2014] I. Singh, D. Kumar. A Review on Different Image Segmentation Techniques // Indian Journal of Applied Research, v. 4, Issue 4, Apr 2014.