

---

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

---

УДК 519.722

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР СО ЗРИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ  
ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА НА ОРИЕНТИРЫ***К.И. КИЙ<sup>1</sup>, М.В. СЕРЕДИНСКИЙ<sup>2</sup>, А.М. СМОРНОВ<sup>2</sup>*<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук (ИПМ РАН)*<sup>2</sup> *Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ)*

Описывается интеллектуальный контроллер для управления автономным движением робота “Амур” (международная лаборатория “Сенсорика”) на зрительные ориентиры. Контроллер содержит блоки поиска кандидатов на ориентиры, оценки качества ориентиров и отсеивания ложных ориентиров, определения координат ориентиров, управления моторами робота при движении к ориентирам с обратной связью по зрению, тактического управления роботом при их потере. В качестве ориентиров используются цветные метки или естественные ориентиры в помещениях, такие как двери в коридорах. Ориентиры могут быть как неподвижные, так и подвижные (например, размещенные на другом роботе или находящиеся в руках человека).

Проведены успешные испытания робота в автономном движении к ориентирам с системой управления, основанной на предложенном контроллере. Приводятся результаты испытаний.

*Ключевые слова:* компьютерное зрение, навигация автономных роботов, управление движением автономных роботов.

Кий Константин Иванович – старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: kikip\_46@mail.ru

Серединский Максим Владимирович – аспирант, e-mail: randommind@mail.ru

Смирнов Александр Михайлович – аспирант, e-mail: smirnov48@gmail.com

**INTELLIGENT CONTROLLER WITH VISUAL FEEDBACK FOR IMPLEMENTING THE  
MOTION OF A ROBOT TO LANDMARKS***K.I. KIY<sup>1</sup>, M.V. SEREDINSKIY<sup>2</sup>, A.M. SMIRNOV<sup>2</sup>*<sup>1</sup> *Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS (IAM RAS)*<sup>2</sup> *Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics MSUIEI)*

In this paper, an intelligent controller for implementing the autonomous motion of a robot Amur (International Sensorika laboratory) to visual landmarks is described. The controller contains blocks for finding candidates for landmarks, estimating the quality of landmarks and eliminating false landmarks, determining coordinates of the landmark, controlling the robot motors in the motion to landmarks with visual feedback, and tactic actions of the robot when the landmark leaves the frame. As landmarks color labels or natural indoor landmarks, such as doors in corridors, are employed. Landmarks can be both stationary and moving (e.g., they may be mounted on another robot or be in the hands of a human). The robot with

a control system based on the proposed controller has been successfully tested in the mode of autonomous motion to landmarks. The results of tests are presented.

*Key words:* computer vision, image segmentation, autonomous robot navigation, motion control for autonomous robots.

Kiy Konstantin Ivanovich – Senior Researcher, Ph.D, e-mail: kikip\_46@mail.ru

Seredinskiy Maksim Vladimirovich – Postgraduate Student, e-mail: randommind@mail.ru

Smirnov Aleksandr Mikhailovich – Postgraduate Student, e-mail: smirnov48@gmail.com

## Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию систем реального времени для автономной навигации роботов во внешней среде, включая поиск ориентиров и предметов с заданным описанием [1]. В [2] были предложены алгоритмы для решения задачи поиска ориентиров, основанные на методе геометризованных гистограмм [3]. В [4] описаны алгоритмы выделения метки, состоящей из трех окрашенных треугольников, намечены методы управления моторами робота "Амур" при движении к метке данного типа и приведены первые результаты экспериментов. За прошедшее время обобщен опыт движения робота за меткой в сложных средах. Полученные в предыдущей работе результаты были доработаны для применения их в более общей ситуации, использования ориентиров другого типа (например, открытые или закрытые двери при движении в помещении) и в присутствии возможных фальшивых целей (меток или ориентиров). Особенно много интересных примеров принесли попытки движения на ориентиры во время демонстрации на форумах роботов, когда движение осуществлялось в присутствии большого числа людей, плакатов на стенах, разных предметов в большом зале, похожих на разыскиваемые ориентиры.

В данной работе будет предложена достаточно общая форма контроллера с обратной связью по зрению для движения на ориентиры, характеризующиеся цветом и формой. С целью парирования ложных ориентиров разработаны методы отслеживания движения ориентира по кадрам и изменение его формы и цветовых характеристик от кадра к кадру. Предложены правила действий в случае выхода ориентира из кадра (например, при быстром перемещении метки человеком, несущим ориентир). Данные методы реализованы в СТЗ робота "Амур".

## 1. Постановка задачи и связанные с ней публикации

Ставится задача обнаружения ориентира и организации движения автономного робота на этот ориентир. С целью решения задачи достижения ориентира или следования за ним, если ориентир движется, строится интеллектуальный контроллер, который осуществляет управление роботом. Ориентир может быть размещен в произвольном месте помещения (без предварительных условий по расположению в нем предметов), вообще говоря, в незнакомой среде. Цветовая мишень может двигаться, совершая большие маневры (в том числе, быстрые, с выходом из кадра). Поиск ориентира осуществляется с движущегося робота с использованием камеры, установленной на нем. Ориентир отыскивается без участия оператора в автономном режиме с помощью разработанных программ. На основе экранных координат ориентира вырабатывается набор управляющих команд для движения на ориентир.

В большинстве работ по навигации роботов с помощью поиска ориентиров выделяются те или иные типы характерных точек (например, Harris corner points, SIFT features). Выделенные ориентиры используются для навигации робота (привязки местоположения) [5, 6]. Однако эти методы будут плохо работать на фоне текстур, например на фоне книжной полки или толпы людей (на форуме роботов), при большом расстоянии до метки и, следовательно, малом ее размере на экране. Возможные заслонения могут исказить форму метки. Такое часто случается на демонстрациях на форумах роботов, когда зрители активно вмешиваются в происходящее. Что-

бы обеспечить решение поставленной задачи в сложных условиях, нами используются устойчивые методы поиска меток, основанные не только на оценке границ, но и на учете информации об областях по обе стороны от них [3, 4]. При этом поиск меток ведется на структурном графе цветовых сгустков  $STG(F_i)$  [3], где  $F_i$  – кадр заданной видеопоследовательности с номером  $i$ , являющийся некоторым цветным изображением. Структурный граф  $STG(F_i)$  строится за один проход массива изображения с линейной сложностью вычислений. Решение задачи на основе структурного графа без обращений к массиву изображения дает реальное время. Процедура поиска образов цветовых меток на  $STG(F_i)$  детально описана в [4]. В данной работе будут рассмотрены процедуры выбора “настоящей” метки при наличии в кадре нескольких объектов, похожих на метку. Для этих целей вводится определение функции качества метки. Нахождение образов кандидатов на метки на  $STG(F_i)$ , вычисление функции качества для каждого из них, а также алгоритм выбора “правильной” метки и алгоритмы отбрасывания ложных меток в разных ситуациях подробно описываются в разд. 2. В разд. 3 описывается собственно контроллер для управления моторами робота при движении на условно прямоугольный ориентир. Экспериментальные результаты приведены в разд. 4.

## 2. Обнаружение и анализ кандидатов на ориентиры в кадре

Все операции по обнаружению ориентиров выполняются на  $STG(F_i)$ . Для получения  $STG(F_i)$  изображение разбивается на узкие полосы одинаковой ширины, параллельные вертикальной или горизонтальной осям изображения.  $STG(F_i)$  разбивается на слои, каждый из которых соответствует некоторой полосе разбиения. С помощью процедур, приведенных в [3, 7], каждая полоса сжато описывается посредством системы цветовых сгустков. Цветовому сгустку  $b$  ставятся в соответствие  $[beg_b, end_b]$  – начало и конец  $b$  на оси  $O_s$ ;  $\Delta_H^b = [H_{min}^b, H_{max}^b]$  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 значение полутоновой компоненты  $B$  и мощность сгустка  $Card^b$  (приблизительное 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  $O_s$  и описание значений численных характеристик этой части объекта.  $STG(F_i)$  можно интерпретировать геометрически путем наложения его отрезков на центральную линию соответствующей полосы. На рис. 1 и 2 приведены примеры графов цветовых сгустков.

Среди цветовых выделяются сгустки, имеющие наибольшую мощность. Они называются доминирующими. Между соседними доминирующими цветовыми сгустками устанавливаются отношения контрастности. Таким образом, на множестве доминирующих цветовых сгустков задается отношение порядка. Для любого доминирующего цветового сгустка определяется соседний левый и правый доминирующий цветовой сгусток и уточняется, являются ли данные “соседи” контрастными или подобными исходному цветовому сгустку. При достаточно узких полосах разбиения изображения заметные его детали порождают в соответствующих полосах доминирующие цветовые сгустки. Контрастные соседние доминирующие цветовые сгустки определяют возможные переходы между контрастными соседними реальными объектами на изображениях. Разработанная техника позволяет организовывать поиск контрастных предметов на изображениях, используя только  $STG(F_i)$ , не обращаясь к пиксельному изображению. Детали разработанной техники могут быть найдены в [3, 8]. Указанные методы позволяют решать сложные задачи поиска предметов с заданными формой и цветовым описанием в реальном времени на обычном персональном компьютере.

Каждая метка, состоящая из трех цветных прямоугольников, приложенных друг к другу, в пересечении с полосами изображения дает три серии контрастных цветовых сгустков (отрезков), следующих друг за другом. С помощью разработанной техники начало поиска данных

троек сводится к поиску контрастной границы между двумя соседними доминирующими цветовыми сгустками с показаниями контраста, похожими на ожидаемые. Данная процедура реализуется перебором сгустков в полосе и анализом их цвета и цвета соседних сгустков. Далее, используя отношение соседства, найденная пара сгустков наращивается влево и вправо за счет границ без контраста. Если центральный сгусток достиг справа контрастного сгустка, то проверяется, соответствуют ли его цветовые характеристики цветовым характеристикам третьего прямоугольника. Если соответствуют, то происходит наращивание третьего сгустка на основании отношения соседства.

Если метка пересекается с несколькими полосами изображения, то такие тройки серий цветовых сгустков возникают в нескольких соседних полосах. Объединим серии цветовых сгустков в единые интегрированные цветовые сгустки  $(b_1, b_2, b_3)$ . Предположим, что в  $STG$  имеется  $n$  троек интегрированных цветовых сгустков  $Tr^i = (b_1^i, b_2^i, b_3^i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Эти тройки расположены в различных полосах, на которые разбито изображение. Опишем процедуру группировки этих троек для образования кандидатов образов меток в  $STG$ . Каждому центральному интегрированному цветовому сгустку  $b_2^i$  соответствует интервал  $[beg_2^i, end_2^i]$  на оси  $Ox$ . Тройки  $Tr^i$ , расположенные в соседних полосах, такие, что интервалы  $[beg_2^i, end_2^i]$  имеют сильное пересечение, объединяются в кластеры  $Cl_j$ . Данные кластеры троек объявляются кандидатами на метки.

Каждому кандидату на метку (кластеру  $Cl_j$ ) присваивается значение функции качества

$$Cost(Cl_j) = \sum_k Col(Tr^k) + \sum_m \sum_k Sim(b_m^k) + Sh(Cl_j),$$

где  $Col(Tr^k)$  – компонента, отвечающая за соответствие цветов в метке и в  $Tr^k$ ;  $\sum_k Sim(b_m^k)$  – компонента, оценивающая, насколько последовательности интервалов  $[beg_1^k, end_1^k]$ ,  $[beg_2^k, end_2^k]$ ,  $[beg_3^k, end_3^k]$  соответствуют образам прямоугольников, и компонента  $Sh(Cl_j)$ , которая оценивает, насколько соблюдаются соотношения размеров сторон прямоугольников и соседних прямоугольников метки. Чем выше значения компонент, тем больше соблюдаются ограничения на цвет и форму. Все компоненты строятся следующим образом. Выделяется ряд свойств и мер их выполнения, принимающих некоторые дискретные значения от 0 до 1. За каждое значение меры выполнения назначается определенное число очков, растущее при увеличении этих значений.

Так как мы работаем в условиях возможных заслонений и пересветок, то полное выполнение свойств возможно далеко не всегда. Однако когда реальная метка видна достаточно хорошо, полное значение ее функции качества существенно превосходит значение этой функции для ложных целей. Это объясняется тем, что для правильной метки большой вклад вносят все компоненты функции качества. Как правило, вначале роботу предьявляется метка с достаточно близкого расстояния. Она имеет максимальное значение функции качества. Далее выбирается метка с параметрами, близкими к той, которая была найдена в предыдущих кадрах. Более сложный алгоритм применяется при выходе метки из кадра. Анализируется ряд последних значений функции качества для тех положений метки, когда она целиком находилась в кадре. Выбирается метка, значение функции качества которой превосходит некоторый порог, вычисленный на основе ряда последних значений функции качества. Определение функции качества основано на многих экспериментах, включая эксперименты с двумя метками в кадре. На рис. 1 представлены результаты одного из них.

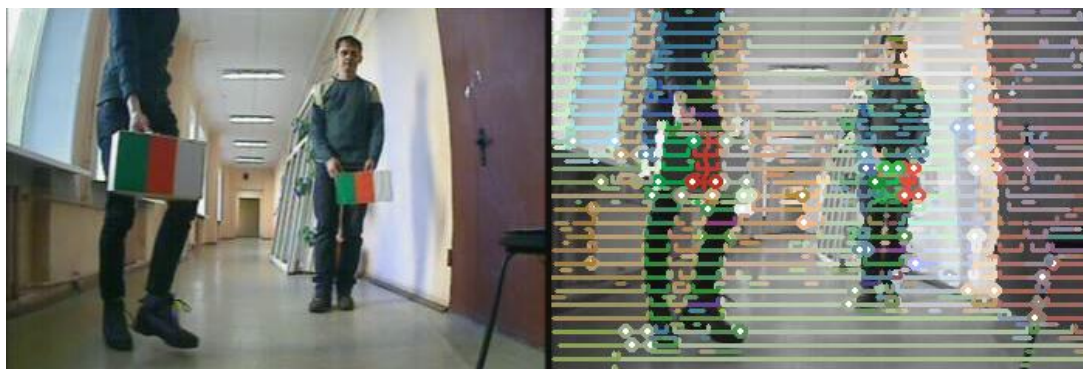


Рис. 1. Сегментация изображения, полученного с робота, и выделение двух меток

Разработаны также алгоритмы обнаружения такого ориентира, как дверь в коридоре. Для выделения дверей используется техника построения непрерывных левых и правых контрастных кривых на графе *STG*. Детали этой техники изложены в [8].

Опишем неформально алгоритмы поиска дверей. На *STG* строятся последовательности цветовых сгустков в соседних полосах, у которых левые (правые) концы меняются "непрерывно" на оси *O<sub>s</sub>*. Таким образом, получаем множества левых и правых непрерывных контрастных кривых на *STG*. Далее отыскиваются пары левых и правых непрерывных контрастных кривых, которые соединяются цветовыми сгустками на *STG* без контраста. В [8] разработаны методы нахождения таких пар, в которых левая и правая непрерывная контрастные граничные кривые близки к вертикальным прямым, что, возможно, указывает на объект типа двери. Для таких объектов построена функция качества, которая учитывает их относительные размеры (с учетом калибровки камеры) и соотношение горизонтальных и вертикальных размеров выделенных прямоугольников. На рис. 2 показаны левые и правые непрерывные контрастные кривые, объединенные в один объект.



Рис. 2. Левые и правые контрастные кривые, объединенные в один объект

### 3. Управление движением к ориентиру

В случае рассмотренных ориентиров мы имеем дело с организацией движения на прямоугольник. Когда рассматривается цветная метка – это центральный прямоугольник метки, в случае двери – прямоугольник самой двери. Управление ведется по зрительной обратной связи по параметру уклонения центра прямоугольника от центра экрана. Для управления ведущими колесами робота предпринят ряд мер.

- Используются два типа прямолинейного движения – быстрое и медленное, и два типа левых и правых поворотов – быстрые и медленные.
- Установлена зона нечувствительности  $\alpha_0$ , которая изменяется в зависимости от расстояния до метки.

- Выбран размер метки останова  $L_0$ , размер метки  $L_1$  для ускоренного движения и размер метки  $L_2$  для применения только слабых поворотов.

- Выбраны две границы уклонения метки от центра:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Зона нечувствительности зависит от размера метки. При движении робота за меткой используется только обратная связь по зрению (как это делают люди и животные). Датчики положения робота и скоростей вращения ведущих колес робота не применялись. Высокая скорость обработки видео позволяла устойчиво двигаться за меткой, используя только зрительную обратную связь. Применяются следующие правила управления:

1. Если  $|\text{Dev}| < \alpha_0$ , то выполняется прямолинейное движение.

2. Если  $|\text{Dev}| < \alpha_1$ , то в зависимости от знака выполняется левый или правый медленный поворот.

3. Если  $\alpha_1 \leq |\text{Dev}| < \alpha_2$ , то в зависимости от знака выполняется левый или правый быстрый поворот.

4. Если  $L \leq L_0$ , то робот останавливается.

5. Если  $L_0 < L \leq L_2$ , то только медленные повороты.

6. Если  $L_1 < L$  и  $|\text{Dev}| < \alpha_0$ , то робот выполняет ускоренное движение вперед.

Отслеживается траектория движения при выходе метки из кадра. При уходе метки вверх или вниз робот отъезжает назад, а влево или вправо – робот пытается догнать метку. Допускается намеренный быстрый уход метки из кадра.

#### 4. Экспериментальные исследования

Система реализована в C++ (Linux, Ubuntu) с использованием средств OpenCV. Скорость обработки для цветных изображений  $640 \times 480$  более 20 fps на процессоре Intel Core i5. Проведены многочисленные заезды робота при движении к цветным меткам. Испытания проводились в сложных средах, а также при наличии большого числа людей в кадре, причем некоторые из них пытались мешать роботу, заслоняя ориентиры (форум роботов в МГУПИ в апреле 2014 г.). Контроллер и система управления, основанная на нем, подтвердили свою работоспособность. Видеозаписи движения за меткой и на дверь могут быть найдены в [7].

#### Заключение

Разработаны методы устойчивого нахождения цветовой метки на изображении в условиях сложной среды при наличии "фальшивых" меток и возможных заслонений частей метки другими объектами. СТЗ робота доработана, чтобы обеспечить нахождение метки при ее выходе из кадра. Проведены первые испытания системы при нахождении естественных ориентиров в помещениях (дверей) и осуществлении движения к ним. В дальнейшем предполагается продолжить работы по движению в помещениях с использованием ориентиров (закрытых или открытых дверей, стен, окон и т.д.) и выделять и анализировать действия людей в кадре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. MEGER D. et al. Curious George: An Integrated Visual Search Platform. – Canadian Robot Vision, 2010.

2. КИЙ К.И. Автоматическая система реального времени для обнаружения объектов и ориентиров на изображении, основанная на обработке цветных изображений: Труды конференции "Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010"/МГУ, 2011, с. 268 – 276.

3. KIY K.I. A New Real-time Method for Description and Generalized Segmentation of Color Images. – Pattern Recognition and Image Analysis, 2010, No. 2, p. 169 – 178.

4. КИЙ К.И., СМИРНОВ А.М. Автономная навигация в помещениях робота “Амур” по цветовым меткам. – Техническое зрение, 2013, N. 2, с. 30 – 35.
5. BONIN-FONT F. et al. Visual Navigation for Mobile Robots: a Survey. – J. Intell. Robot Syst. 2008, 53 (1), p. 263 – 296.
6. LI X. et al. A Visual Navigation Method of Mobile Robot using a Sketched Semantic Map. – International Journal of Advanced Robotic Systems, 2010.
7. [http://video.mail.ru/mail/kikip\\_46/\\_myvideo/](http://video.mail.ru/mail/kikip_46/_myvideo/).
8. KIY K.I. Segmentation and Detection of Contrast Objects and Their Application in Robot Navigation. – Pattern Recognition and Image Analysis, 2015, No. 2.