

УДК 519.722

## АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ РОБОТА “АМУР” ПО ЦВЕТОВЫМ МЕТКАМ

*К.И. КИЙ<sup>1</sup>, А.М. СМІРНОВ<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)*

Описываются система планирования и реализация автономного движения робота “Амур” (Международная лаборатория “Сенсорика”) в помещениях с использованием цветowych меток, размещенных в произвольных местах помещений, включая следование за движущейся меткой. Предложенная система дает комплексное решение проблемы и состоит из подсистем обработки и анализа изображений, планирования движения к метке и управления двигателями ведущих колес для реализации последовательности запланированных базисных движений в режиме обратной связи по зрению. Система реализована в виде комплекса программ, установлена на удаленном компьютере, управляющем роботом, и первые эксперименты были проведены по автономному движению робота с ее помощью.

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

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

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

## INDOOR AUTONOMOUS NAVIGATION OF ROBOT “AMUR” USING COLOR VISUAL LANDMARKS

*K.I. KIY<sup>1</sup>, A.M. SMIRNOV<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Keldysh institute of applied mathematics RAS (IAM RAS)*

<sup>2</sup> *Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics (MSUIEI)*

In this paper, a control system for planning and implementation of indoor autonomous motion of a robot “Amur” (produced by International Sensorika Laboratory) using color visual landmarks, placed in arbitrary places of rooms and corridors, including the motion to a moving landmark, is described. The proposed system provides an integrated problem solution and consists of a subsystem for image processing and analysis, a subsystem for planning the motion to visual marks, and a subsystem for controlling motors of robot leading wheels for implementation of a sequence of planned basic motions in the visual-feedback mode. The addressed system was implemented as a program system, installed on the computer controlling the robot, and experiments on autonomous robot motion under its control have been conducted.

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

Kiy Konstantin Ivanovich – Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: kikip\_46@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 – 3]. В этой связи разработка методов реального времени для поиска ориентиров и управления движением роботов при движении к этим ориентирам представляется актуальной задачей. В [4] были описаны алгоритмы для решения задачи поиска ориентиров, основанные на методе геометризованных гистограмм [5]. В настоящее время проводятся работы по реализации этих алгоритмов в виде программ системы технического зрения для автономной навигации робота "Амур", разработанного Международной лабораторией "Сенсорика". Робот снабжен телекамерой и управляется через сеть Wi-Fi с удаленного компьютера. С робота на компьютер поступают оцифрованные изображения, полученные через телекамеру, установленную на нем, а в обратном направлении поступают команды на управление моторами ведущих колес робота. Данные работы проводятся Институтом прикладной математики им. Л.В.Келдыша и лабораторией "Сенсорика" совместно с Московским государственным университетом приборостроения и информатики.

В предложенной работе будут описаны подсистема технического зрения робота для нахождения цветной метки, размещенной в помещении, и подсистема управления движением к заданной метке на основе компьютерного зрения. Метка может двигаться, быть расположенной на другом роботе или находиться в руках человека.

### 1. Метод обнаружения визуальных меток в естественной среде помещений

Различные метки и указатели, размещенные в помещении, помогают людям при поиске нужного места ("Кафедра математики," "Столовая" и т.д.) или предписывают порядок действий в чрезвычайных ситуациях ("Аварийный выход," "Пожарный гидрант" и т.д.). Не менее полезными могут быть метки в помещениях и при навигации автономных роботов. Известно, что системы спутниковой навигации в помещениях не действуют. Установка радиомаяков стоит значительных средств. Поэтому использование меток (табличек) будет гораздо более дешевым вариантом, не требующим квалифицированного персонала для эксплуатации. Сама метка и методы ее обнаружения должны быть таковы, чтобы можно было надежно находить ее при любом окружении (фоне) и при изменяющемся освещении. (Невозможно полагать, что персонал, эксплуатирующий систему, будет думать, видна ли метка роботу на выбранном фоне.) Наши метки составлены из окрашенных прямоугольников, примыкающих друг к другу. Задача системы технического зрения состоит в обнаружении метки в помещении и обеспечении данных о положении метки и ее размерах в экранной системе координат в реальном времени. Задача усложняется тем, что метка может быть расположена в среде с большим числом других предметов и возможны сложные случаи неоднородного (слабого) освещения, типичного для помещений, и частичного заслонения другими объектами. В большинстве работ по навигации роботов с помощью поиска ориентиров выделяются те или иные типы характерных точек (в частности, Harris corner points, SIFT features) [3, 6]. Однако эти методы будут плохо работать на фоне текстур, например для метки на фоне книжной полки при большом расстоянии до нее и, следовательно, малом ее размере на экране. Возможные объекты, заслоняющие метку, могут исказить ее форму, поэтому нами предлагаются устойчивые методы поиска меток, основанные на методе геометризованных гистограмм [5]. При этом поиск меток ведется на структурном графе цветных сгустков  $STG(F_i)$ , где  $F_i$  – кадр видеопоследовательности с номером  $i$ , задаваемый некоторым цветным изображением. Определение структурного графа цветных изображений с необходи-

мыми деталями может быть найдено в [7]. Опишем неформально эту структуру. Для получения  $STG(F_i)$  изображение разбивается на узкие полосы одинаковой ширины, параллельные вертикальной или горизонтальной оси изображения.  $STG(F_i)$  разбивается на слои, каждый из которых соответствует некоторой полосе разбиения. С помощью процедур, приведенных в работах [4, 5, 7], каждая полоса сжато описывается посредством системы цветowych сгустков – отрезков на оси системы координат плоскости изображения  $O_s$ , которой параллельны стороны полос разбиения, снабженных числовыми характеристиками. Цветовому сгустку  $B$  ставятся в соответствие  $[IntBeg_B, IntEnd_B]$  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 цветowego оттенка  $B$ ;  $\Delta_S^B = [S_{min}^B, S_{max}^B]$  и  $S_{mean}^B$  – диапазон и среднее значение цветowego насыщения;  $\Delta_I^B = [I_{min}^B, I_{max}^B]$  и  $I_{mean}^B$  – диапазон и среднее значение полутоновой компоненты  $B$  и мощность сгустка  $Card^B$  (приблизительно число точек в прообразе интервала в полосе, которые имеют цветowe характеристики, принадлежащие диапазонам цветowego 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 с помощью наложения его отрезков на центральную линию соответствующей полосы.  $STG(F_i)$  дает абстрактное описание некоторой предварительной сегментации (pre-segmentation) изображения  $F_i$ . На рис. 1 дан пример графа цветowych сгустков.



Рис. 1. Сегментация изображения, полученного с робота, и выделение составляющих метки

При сильной вариации геометрических ракурсов (следовательно, освещенности) каждая метка, состоящая из трех цветных прямоугольников, приложенных друг к другу, в пересечении с полосами изображения дает три серии цветowych сгустков (отрезков) на графе цветowych сгустков, следующих друг за другом. Каждая серия имеет соответствующий цвет (но параметры сгустков внутри серии могут существенно варьироваться) и соответствует пересечению одного из прямоугольников метки с данной полосой. Если метка пересекается с несколькими полосами изображения, то такие тройки серий цветowych сгустков возникают в нескольких соседних полосах.

Пересечение прямоугольника с полосой из-за пересветок и неоднородного освещения распадается на несколько более или менее однородных частей. Каждой части соответствует один из цветowych сгустков серии одного цвета. В идеальном случае каждая серия состоит из одного цветowego сгустка заданного цвета. При довольно обширных перекрытиях, скрывающих форму метки, наличие указанных троек, детектирующих метку, на графе цветowych сгустков сохраняется. Также сохраняются тройки при значительных вращениях метки. На основе данной техники удастся определить наличие метки на изображениях даже при сильном изменении цветов при вариации освещения. Строится процесс сегментации, который, объединяя цветowe сгустки одного цвета, восстанавливает геометрию пересечения метки с полосой. Сегментация внутри серий отрезков одного цвета основана на эвристических процедурах поиска контрастных (подобных) отрезков, определенных в [4, 8]. Так как мы знаем геометрические пропорции метки, то по размерам ее пересечения с горизонтальной полосой можем определить ее вертикальные размеры и понять, со сколькими полосами метка должна пересекаться. Поэтому в соседних по-

лосах должны быть такие же тройки серий цветowych сгустков, в некотором смысле продолжающие найденную тройку на соседние полосы, с тем, чтобы соответствовать реальному геометрическому объекту. Цветовые сгустки, принадлежащие прямоугольникам метки, строятся как целое с помощью процедуры построения непрерывных контрастных граничных кривых. Таким образом, мы восстанавливаем глобальную геометрию метки и отбраковываем метки-фантомы, не соответствующие реальным меткам.

Описанные процедуры есть частный случай некоторой общей процедуры сегментации контрастных объектов, возможно имеющих гораздо более сложную природу и форму, которой будет посвящена отдельная статья.

На рис. 1 приведены структурный граф цветowych сгустков для изображения, полученного при реальном заезде робота (справа), и непрерывные структуры цветowych сгустков, представляющие части метки. Сгустки графа нанесены на средние линии полос полутонового изображения, соответствующего цветному изображению. Короткие вертикальные отрезки на концах сгустка означают, что граница контрастна. Вертикальный отрезок на центральном прямоугольнике метки означает, что метка распознана. Специальные алгоритмы разработаны для определения формы и размеров деталей метки, которые являются частными случаями общих процедур определения формы границ непрерывных последовательностей цветowych сгустков.

## 2. Объект управления и его свойства, интеллектуальный контроллер

В качестве объекта управления использовался робот "Амур", разработанный Международной лабораторией "Сенсорика". Робот имеет два ведущих передних колеса и пассивное заднее шаровое роульное колесо. В первоначальном виде задние колеса были ведущими и спереди были два пассивных роульных колеса небольшого диаметра.

Нами была поставлена задача разработать такое управление, при котором робот будет двигаться на зрительные ориентиры (*visual landmarks* в современной англоязычной терминологии) с обратной связью по зрению, выполняя некоторые стандартные маневры с тем, чтобы отработать отклонения от цели. Так как мы применяли очень быстрый метод сегментации и детектирования ориентиров (более 20 fps на современных ноутбуках), то имелась возможность не использовать датчики положения робота в пространстве, а работать только по зрительным отклонениям, как это делают люди и животные.

При таком способе управления существенным моментом является возможность выполнять отработку малых отклонений путем поворотов робота на небольшие углы. При пассивных передних роульных колесах, имеющих сильную инерцию при поворотах, эта возможность практически отсутствует. Наличие датчиков оборотов ведущих колес совершенно не спасает ситуацию, так как движение существенным образом зависит от положения пассивных колес. При непредсказуемых поворотах на большие углы происходит постоянная потеря ориентира, и движение с обратной связью по зрению становится труднореализуемой задачей. Для отработки стандартных наборов маневров при движении на ориентир мы использовали феноменологическую модель реакции робота на режимы управления. Создание точной механической модели для моделирования реакций робота на управляющие воздействия является непростой задачей. Заметим, что установка новых устройств на робот в процессе эксплуатации будет менять эту модель, и непредсказуемый момент в виде роульных колес вводит в модель элемент неопределенности. Экспериментальным путем были подобраны управления двигателей, которые позволяли совершать небольшой поворот влево (вправо), прямолинейное движение после поворота и затем поворот вправо (влево). Специальным образом был подобран режим одинакового управления ведущих колес, который приводит к выпрямлению заднего роульного колеса. Каждый поворот заканчивался одинаковым управлением ведущих колес, которое выравнивало положение пассивного колеса.

Для управления роботом с обратной связью по зрению разработан интеллектуальный контроллер. Исходными данными для контроллера являются три массива:  $CoorX(n)$ ,  $CoorY(n)$ ,

$Numb(n)$ ,  $0 \leq n \leq 32$ , содержащих экранные координаты ОХ, ОУ центра центрального сгустка нижнего пересечения метки с некоторой горизонтальной полосой разбиения изображения и номера последних 32 кадров видеопоследовательности, в которых эти результаты были получены. Данные массивов позволяют определять выход метки из кадра, его направление и скорость, а также построить логический контроллер для отработки уклонения метки от центрального положения.

Положение нижней части метки взято за основу, так как робот имеет небольшие размеры и камера расположена невысоко. При приближении робота метка в кадре уходит вверх, при этом верхняя ее часть может выйти из кадра. На основе массивов координат определяются отклонения значений массива  $CoorX(n)$  от центрального положения, а также величина и направление скорости ухода или приближения метки к центральному положению, которое зависит от внутренних параметров камеры. Для контура управления выбирается зона нечувствительности, зависящая от линейных размеров центрального сгустка метки в нижней полосе (а значит, от расстояния до метки). Для отработки уклонения метки от центрального положения используются наборы сигналов, реализующие режимы вращения колес с разностью в числе оборотов. Заданная разность определяется скоростью ухода (приближения) метки к центральному положению. Подробно контур управления будет описан в отдельной публикации.

### 3. Экспериментальные исследования и программная реализация

Система реализована в C++ (Linux Ubuntu) вместе со средствами сопряжения с вводом изображений из телекамер с использованием средств Linux и OpenCV. Скорость обработки для цветных изображений 640x480 более 20 fps на процессоре Intel Core i5. Были проведены эксперименты по следованию робота за человеком, идущим с меткой и перемещающим ее в разные стороны, чтобы проверить реакцию робота на изменение позиции метки. Эксперименты показали, что робот уверенно обрабатывает изменение позиции метки. Заезд (как его видит робот) размещен на сайте [9]. Ниже показаны кадры движения робота за человеком (рис. 2).



Рис. 2. Движение за меткой, кадры из видеопоследовательности

### Выводы

Разработаны методы нахождения цветовой метки на изображении и система управления движением робота по направлению к ней. В дальнейшем предполагается ввести широкий набор цветowych меток и решать задачи обхода помещений при наличии большого числа меток разных типов. Последующими целями исследования являются распознавание естественных ориентиров на изображении, восстановление их пространственного положения и движение к распознанным ориентирам. Предполагается также реализовать в реальном времени поиск предметов, заданных эталонами и словесными описаниями.

### Литература

1. MEGER D. et al. Curious George: An Integrated Visual Search Platform. – Canadian Robot Vision, 2010.
2. DIVVALA S. Unsupervised patch-based context from millions of images. – In CMU Tech Report, 2010, p. 59.
3. LI X. et al. A Visual Navigation Method of Mobile Robot Using a Sketched Semantic Map. – International Journal of Advanced Robotic Systems, 2010.
4. КИЙ К.И. Метод геометризованных гистограмм, дуальное описание сцен и его применение: Доклады 15-й Всероссийской конференции "Математические методы распознавания образов-2011". – М.: МАКС ПРЕСС, 2011, с. 451 – 454.
5. КИЙ К.И. Модифицированный метод геометризованных гистограмм и его применение: Доклады 8-й Международной конференции "Интеллектуализация обработки информации ИОИ-2010". – М.: МАКС ПРЕСС, 2010, с. 367 – 370.
6. CHEN Z., BIRCHFIELD S.T. Qualitative Vision-Based Path Following. – IEEE Transactions on Robotics, 2009, No 25(3), p. 749 – 754.
7. КИЙ К.И. A New Real-Time Method for Description and Generalized Segmentation of Color Images. – Pattern Recognition and Image Analysis, 2010, No. 2, p. 169 – 178.
8. КИЙ К.И. Структурный граф цветовых сгустков: структуры контрастов и их применение: Труды конференции "Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2011". – Механика, управление, информация/Институт космических исследований РАН, 2012, с. 157 – 161.
9. [https://dl.dropbox.com/u/33284791/captue\\_24.avi](https://dl.dropbox.com/u/33284791/captue_24.avi).