

Никулина Анастасия Юрьевна – Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики; e-mail: a.nikulina@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89112294800; техник первой категории 931 СКТБ.

Smirnova Ekaterina Yurievna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: eus@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79214401814; deputy head of the Research Center.

Serov Danila Konstantinovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.serov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79110804189; postgraduate student; engineer of 911 laboratory of “Digital simulation”.

Pelmenev Denis Kirillovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: d.pelmenev@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79084423980; technician of the 1st category of 911 laboratory of “Digital simulation”.

Korenko Nikita Pavlovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: n.korenko@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79215922140; engineer of 911 laboratory of “Digital simulation”.

Nikulina Anastasiya Yurievna – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.nikulina@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79112294800; technician of the 1st category of 931 SDB.

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-129-140

С.М. Соколов, А.А. Богуславский

МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПОВЫШЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Тенденции развития современной робототехники и потребности практики требуют повышения степени автономности робототехнических комплексов. Повышение степени автономности, в свою очередь, требует увеличения ситуационной осведомлённости и, как следствие, увеличение объёма данных и эффективности их обработки в масштабе реального времени на бортовых ресурсах. При этом сохраняется требование экономической целесообразности предлагаемых решений. С учётом того, что в отечественной практике в большинстве случаев используются телеуправляемые роботы, возникает необходимость наращивания их автономности, с использованием уже имеющихся технических решений. Такое направление развития робототехнических комплексов называется переходом от телеуправления к супервизорному управлению. На этом пути осуществляется передача всё большего количества информационно-управляющих функций от оператора к бортовой информационно-управляющей системе. На основе анализа мирового и собственного опыта разработок робототехнических комплексов, авторской методики создания роботов с повышенной степенью автономности, нами выделен ключевой элемент обеспечения интеллектуальной автономности мобильных средств. Предложен унифицированный программно-аппаратный модуль информационного обеспечения мобильных роботов. Основу модуля образует система технического зрения с открытой программно-аппаратной архитектурой. Этот модуль позволяет наращивать степень автономности наземных робототехнических комплексов в части интеллектуальной автономности постепенно, оставаясь в рамках экономической целесообразности. Открытая программная архитектура модуля учитывает имеющееся де-факто разнообразие аппаратных решений в существующих телеуправляемых подвижных средствах и позволяет производить увеличение степени автономности – переходить от режима телеуправления к супервизорному управлению пошагово, сообразно решаемым задачам и доступным средствам. Предлагается методика создания новых или реинжиниринга уже существующих образцов РТК. Методика включает анализ общей компоновки РТК с акцентом на программно-алгоритмическую часть бортовой информационно-управляющей системы. При этом учитываются условия согласования требований к сенсорной и вычислительной частям. В работе рассмотрены примеры применения этой методики к усовершенствованию уже существующих образцов наземных РТК. Приводятся постановки практических задач и примеры их решения с помощью предлагаемого модуля.

Автономность роботов; степень автономности; информационное обеспечение; система технического зрения; интеллектуальная автономность; унификация решений в области автономии.

S.M. Sokolov, A.A. Boguslavsky

METHODOLOGY AND PRACTICE OF INCREASING THE AUTONOMY OF GROUND-BASED ROBOTIC COMPLEXES

Trends in the development of modern robotics and the needs of practice require an increase in the degree of autonomy of robotic complexes. Increasing the degree of autonomy, in turn, requires an increase in situational awareness and, as a result, an increase in the volume of data and the efficiency of their processing in real time on on-board resources. At the same time, the requirement of economic feasibility of the proposed solutions remains. Taking into account the fact that in domestic practice, in most cases, remote-controlled robots are used, it becomes necessary to increase their autonomy using existing technical solutions. This direction of development of robotic complexes is called the transition from remote control to supervisory control. Along this path, an increasing number of information management functions are transferred from the operator to the on-board information management system. Based on the analysis of the world and our own experience in the development of robotic complexes, the author's methodology for creating robots with an increased degree of autonomy, we have identified a key element in ensuring the intellectual autonomy of mobile devices. A unified software and hardware module for information support of mobile robots is proposed. The module is based on a vision system with an open software and hardware architecture. This module allows increasing the degree of autonomy of ground-based robotic complexes in terms of intellectual autonomy gradually, while remaining within the framework of economic feasibility. The open software architecture of the module takes into account the de facto variety of hardware solutions in existing remote-controlled mobile vehicles and allows for an increase in the degree of autonomy - to switch from remote control mode to supervisory control step by step, according to the tasks being solved and the available means. A technique for creating new or reengineering existing RTK samples is proposed. The methodology includes an analysis of the overall layout of the RTK with an emphasis on the software and algorithmic part of the on-board information and control system. This takes into account the conditions for matching the requirements for the sensor and computing parts. The paper considers examples of the application of this technique to the improvement of existing samples of ground-based RTCs.. Practical tasks and examples of their solution using the proposed module are presented.

Robot autonomy; degree of autonomy; information support; vision system; intellectual autonomy; unification of solutions in the field of autonomy.

Введение. Одной из тенденций в развитии современной подвижной робототехники является переход от телеуправления к автономным беспилотным средствам. Эта тенденция в перспективе должна привести к созданию технических систем, которые могут воспринимать, понимать и взаимодействовать с окружающей средой, а также развиваться для достижения результатов, подобных человеческим, в деятельности, требующей знаний, специфичных для контекста (ситуации и задачи). Признано, что достижение таких возможностей выходит за рамки современного уровня техники и будет оставаться таковым в течение многих лет. Особенно сложной является ситуация в наземной робототехнике, т.к. объём необходимой информации и частота выработки управляющих воздействий для реализации целенаправленных перемещений особо высоки для наземных систем, осуществляющих перемещение в заранее неопределённых условиях. Исходя из этого видения, европейским научным сообществом было определено несколько промежуточных целей [1]. В существующих НРТК ситуационная осведомлённость, необходимая для функционирования, обеспечивается оператором, дистанционно снабжаемым данными о текущей ситуации (это режим телеуправления). В перспективном НРТК с повышенной степенью автономности (ПСА) ситуационную осведомлённость должны обеспечивать бортовые информационные системы (ИС) и системы технического зрения (СТЗ) как их центральная часть. Чем больше задач и чем более сложные задачи ситуационной осведомлённости возлагаются на бортовую ИС, тем большей степенью интеллектуальной автономии обладает соответствующий НРТК. Анализ существующей практики показывает, что стоимость дооснащения каждого из уже существующих типов подвижных платформ своей персонифицированной системой информационного обеспечения существенно удорожает весь РТК и тормозит движение на пути повышения степени автономности РТК. Опыт наших исследований и разработок в области информационного обеспечения робототехнических систем позволил выделить ключевые моменты в формировании программно-аппаратных информационных комплексов и разработать унифицированный информационный модуль, на основе СТЗ, который может быть оперативно включен в состав уже существующих подвижных платформ,

функционирующих в режиме телеуправления и обеспечит переход от телеуправления к супервизорному управлению эффективно с точки зрения стоимости (использовать существующие средства), с возможностью постепенного наращивания степени автономности. В этой работе мы предлагаем методический подход к анализу существующих или созданию новых наземных РТК с ПСА и приводим примеры использования и реализации этой методики для повышения степени автономности наземных РТК с помощью предложенного унифицированного информационного модуля.

Методика анализа системы информационного обеспечения РТК. В нашей практике для анализа имеющихся решений и разработки новых робототехнических комплексов мы используем так называемое конфигурационное пространство [2]. В этом пространстве (рис. 1) укрупнённо представлены основные компоненты, определяющие состав и функционал информационной системы РТК. Такое рассмотрение позволяет сделать конструктивно обозримым большое количество взаимосвязанных технологий, используемых при создании РТК, и постепенно наращивать возможности уже существующих РТК.

Степень автономности, метрики для которой задаются в так называемом пространстве автономии, предложенном и развитом группой ALFUS в США [3–8] (рис. 2), хорошо согласуется с рассмотрением плоскости модели – алгоритмы введённого нами конфигурационного пространства. Сложность окружения определяется по оси моделей заданием модели (описанием свойств) окружающего пространства, в котором необходимо функционировать РТК, Сложность миссии определяется постановкой задачи перед РТК. Зависимость от оператора – пропорцией, распределением алгоритмов решения поставленной задачи между бортовой информационно-управляющей системой и оператором.

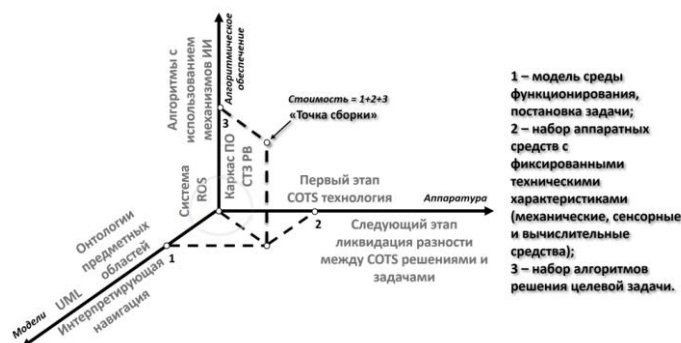


Рис. 1. Пространство конфигураций/архитектур систем информационного обеспечения робототехнических комплексов с указанием ряда технологий, используемых при определении, задании координат по осям этого пространства



Рис. 2. Показатели для определения уровня автономности, предложенные группой ALFUS («пространство автономии»)

Укажем два возможных варианта анализа, выбора вариантов решения задачи с использованием конфигурационного пространства.

Первый – разработка информационной системы для нового РТК («с нуля»). В этом варианте рассмотрение начинается с оси моделей, по которой формируется постановка целевой задачи, далее, по оси аппаратуры фиксируются имеющиеся, доступные средства аппаратной поддержки (регистрирующая аппаратура, вычислительные средства, каналы связи и т.п.). После этого в последовательном рассмотрении плоскостей модели – алгоритмы и алгоритмы – аппаратура, по оси алгоритмов фиксируются отрезки возможных алгоритмических решений бортовыми средствами.

Второй – развитие, доработка существующего телеуправляемого РТК с целью повышения степени автономности. В этом варианте рассмотрение начинается с плоскости модели – алгоритмы и фиксации на оси алгоритмов соотношения борт/оператор – доли алгоритмического обеспечения, выполняемой бортовой информационно-управляющей системой (БИУС) по отношению к алгоритмам, реализуемым оператором. Здесь же указывается желаемая величина этого отношения или перечисление тех алгоритмов, которые необходимо передать БИУС на пути повышения степени автономности рассматриваемого РТК. После этого рассматривается плоскость алгоритмы – аппаратура с целью определения какие аппаратные средства потребуются для реализации желаемых алгоритмов на борту. И в одном, и в другом варианте после фиксации координат или отрезков по осям конфигурационного пространства определяется стоимость соответствующих точек сборки и необходимые временные и другие ресурсы.

Унифицированный информационный модуль для наземных робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности. Основой разработанного модуля является унифицированный каркас программного обеспечения (ПО) систем технического зрения реального времени, подробно описанный в [9–11]. Разработка каркасов ПО для решения задач определенного класса является распространенной практикой, в частности, в области автовождения на дорогах общего пользования [12–17].

Рассматриваемый каркас ПО СТЗ предназначен для упрощения процесса разработки ПО СТЗ реального времени посредством повторного использования решений однотипных задач обработки зрительных данных. Однотипные задачи были выделены в результате анализа опыта проектирования и разработки прикладных СТЗ. Каркас ПО СТЗ содержит повторно используемые программные компоненты в виде классов и их наборов (подсистем). Этот каркас используется в качестве заготовки для разработки новых СТЗ и дополняется компонентами, спроектированными применительно к решению конкретной прикладной задачи. Каркас ПО СТЗ представляет собой программу, обеспечивающую ввод зрительных данных от различных источников и передачу этих данных на программную обработку, которая реализуется с учетом требований конкретной задачи. Ряд программных компонент характеризуются высокой степенью повторного использования. К ним относятся компоненты, связанные с организацией ввода и зрительных данных, а также с представлением этих данных, промежуточных и окончательных результатов их обработки.

В целом, под программным каркасом понимается многократно используемая ведущая часть программы, которая в соответствии с программной логикой при необходимости обращается к различным модулям (в т.ч. повторно используемым) для решения частных подзадач. В таком случае при разработке конкретной программы разработчику необходимо заново написать лишь некоторые из модулей, заполняющих предусмотренные места готового каркаса. Применение программных каркасов при решении однотипных задач направлено на повышение степени повторного использования (как на уровне проектирования, так и на уровне реализации), упрощения модификации ПО, сокращения времени разработки и усилий в области поддержки разработанного ПО. Следует отметить следующие основные достоинства применения каркасов при разработке ПО на основе объектно-ориентированного подхода [18, 19]:

- ♦ Обеспечение модульности – модульность ПО обеспечивается за счет скрытия деталей реализации устойчивых интерфейсов. Таким образом удается локализовать влияние прогнозируемых изменений на этапах проектирования и реализации ПО. Эта локализация упрощает поддержку разработанного ПО.

♦ Повторная используемость – за счет построения общих компонентов, которые без изменений могут использоваться в новых приложениях, а также за счет использования готовой архитектуры с предопределенным поведением компонентов ПО.

♦ Расширяемость – в каркасе явно предусматриваются точки роста, позволяющие приложениям расширять функциональность с использованием устойчивых интерфейсов. Эти точки роста позволяют отделить устойчивые интерфейсы и поведение системы от изменяемых частей, которые требуется разработать для приложений в конкретных задачах.

♦ Инверсия программного управления – архитектура каркаса на этапе выполнения имеет свойство инверсии управления. Это архитектурное решение характеризуется тем, что добавляемые модули содержат обработчики событий, которые вызываются каркасом, непосредственно реагирующим на возникающие события. Когда возникает какое-либо событие, диспетчер в каркасе вызывает соответствующий обработчик или цепочку обработчиков. Таким образом, добавляемые модули не реагируют непосредственно на возникающие события, что позволяет диспетчеру каркаса выполнять обработку событий с использованием цепочек не связанных между собой модулей.

Каркас ПО СТЗ представляет собой программу, обеспечивающую основные действия СТЗ рассматриваемых категорий. В каркасе ПО определены набор абстрактных классов, общая для рассматриваемых СТЗ реального времени программная архитектура, общее поведение, общие структуры данных и общий интерфейс пользователя. Кроме наборов классов в каркасе предусмотрена и реализована определенная модель взаимодействия объектов этих классов. Эта модель реализована так, что в ней предусмотрены места для добавления новых компонентов – «точки роста» программной системы. Таким образом, каркас ПО СТЗ включает в себя реализованные типичные подсистемы ПО СТЗ, содержащие как окончательно реализованные объекты классов, так и объекты, которые должны быть доработаны с учетом требований конкретной прикладной задачи.

В качестве аппаратной составляющей рассматривается формируемая под задачу комбинация регистрирующих блоков (РБ) и вычислительно-управляющих блоков (ВУБ). На рис. 3 представлен пример схемы компоновки аппаратной части модуля.

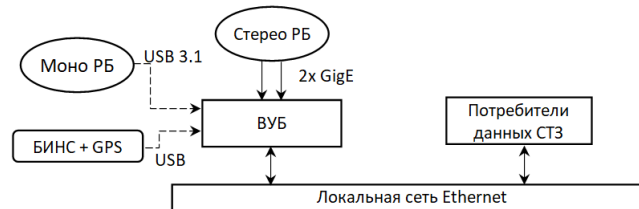


Рис. 3. Пример аппаратной компоновки информационного модуля для решения задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений – определения траектории движения и определения положения платформы относительно полосы движения и информационного обеспечения полезной нагрузки – определение направления движения на ориентир и сопровождение объекта интереса

На рис. 4 и 5 показаны примеры результатов обработки зрительных данных в информационных модулях, выполняющих определение движения на ориентир и сопровождение объекта интереса.

Унифицированные информационные модули, создаваемые на основе описанного программного каркаса, позволяют оперативно выбирать и настраивать аппаратную часть СТЗ для конкретной подвижной платформы или РТК, учитывая желаемую степень автономности и стоимость предлагаемых решений. Характеристики регистрирующих блоков (РБ) (видеокамер с объективами) и мощность вычислительно-управляющих блоков (ВУБ) хорошо (пропорционально) согласуются с обеспечиваемой степенью автономности, характеризуемой как доля алгоритмического обеспечения в решении всей поставленной задачи, выполняемая бортовыми средствами. Здесь же просматривается корреляция стоимости предлагаемых решений и степени автономности, более подробно эти соотношения опишем на примерах в следующей части.



Рис. 4. Пример обработки изображения информационным модулем обеспечения движения на ориентир (отмечен крестообразным маркером).
Изображения взято из набора данных [20]



Рис. 5. Пример обработки изображения информационным модулем сопровождения объекта интереса (отмечена рамкой). Изображения взято из набора данных [21]

В табл. 1 приведены характеристики основных комплектующих минимальной и расширенной комплектации ВУБ в составе информационных модулей. Минимальная комплектация предназначена для решения задач информационного обеспечения с использованием монокулярного РБ, расширенная – с использованием монокулярного и стерео РБ.

Таблица 1

Характеристики минимальной и расширенной комплектации ВУБ в составе информационных модулей

Наименование комплектующих	Минимальная комплектация	Расширенная комплектация
Процессор	Четырёхъядерный, тактовая частота 3 ГГц (пример: Intel N100)	Восьмиядерный, 4 ГГц (пример: Intel i7 13700)
Оперативная память	16 Гб	32 Гб
Накопители	1 Тб для общего и специального ПО	1 Тб для общего и специального ПО, 2 Тб для хранения зрительных данных
Коммуникационные каналы	Gigabit Ethernet – 1 шт., USB 3.0 – 1 шт.	Gigabit Ethernet – 2 шт., USB 3.0 – 1 шт.

Для использования ВУБ на базе отечественных микропроцессоров семейства «Эльбрус» [22] в качестве базового процессора желательно использование Эльбрус-16С для минимальной комплектации и Эльбрус-32С для расширенной комплектации (с целью компенсации пониженной тактовой частоты, по сравнению с характеристиками в таблице, за счет количества доступных ядер).

Информационные модули, построенные на основе описанного каркаса, легко сопрягаются, встраиваются в системы управления существующих РТК, построенных на принципах ROS. На рис. 6 и 7 приведены схемы включения модулей блоков каркаса СТЗ РВ в бортовую информационно-управляющую систему на основе концепции ROS [23–25].

В реализации ПО СТЗ с целью интеграции с ROS возможно применение двух подходов. Первый заключается в декомпозиции ПО СТЗ как совокупности программных компонентов, каждый из которых оформляется в виде узла ROS. Возможная реализация такого подхода показана на рис. 6. Ограничением данного подхода является необходимость применения ROS для функционирования ПО СТЗ. В качестве второго подхода возможно использование дополнительного слоя программных абстракций, обеспечивающих взаимодействие между ПО СТЗ и ROS. В данном случае узлы, показанные на схеме на рис. 6, заменяются несколькими (или одним) узлами, выполняющими ретрансляцию данных, поступающих от ПО СТЗ. Такие промежуточные (прокси) узлы получают данные от ПО СТЗ по протоколу TCP/IP и передают их в формате сообщений ROS (рис. 7). Ограничением данного подхода является внесение коммуникационных задержек на передачу данных между ПО СТЗ и прокси-узлами. При исполнении на одном компьютере величина задержки, как правило, не превышает 1 мс (при отключении буферизации сетевого протокола). Такая задержка может считаться приемлемой, если сообщения ПО СТЗ не используются в качестве высокочастотных сигналов управления исполнительными устройствами.

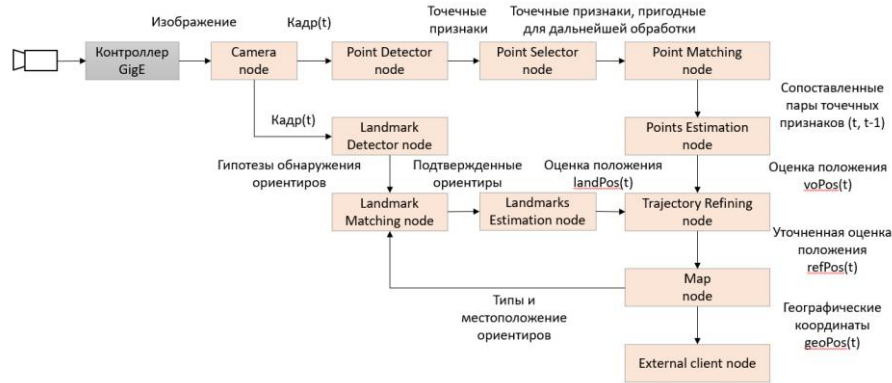


Рис. 6. Схема построения ПО СТЗ в виде совокупности узлов ROS (на примере задачи определения собственного движения ТС на основе монокулярной визуальной одометрии [26–30] и обнаружения ориентиров)

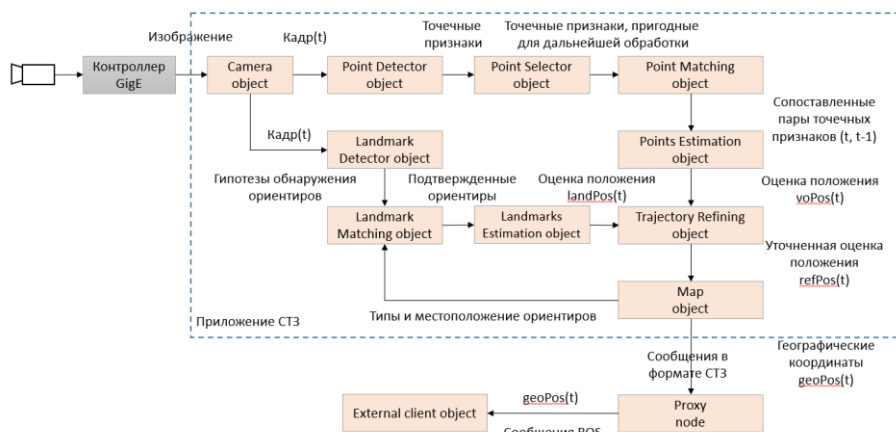


Рис. 7. Схема взаимодействия ПО СТЗ с программными клиентами на базе ROS (на примере задачи определения собственного движения ТС на основе монокулярной визуальной одометрии и обнаружения ориентиров)

Примеры реализации описанной методики и информационного модуля. Повышение степени автономности РТК ВН реализуется поэтапно, исходя из существующего состояния РТК ВН. В настоящее время констатируем активное использование дистанционно управляемых РТК. При такой организации управления вся нагрузка по организации сбора и обработки поступающих данных, ложится на оператора РТК и требует непрерывного использования широкополосного быстродействующего канала связи оператор – борт РТК. Повышение степени автономности РТК, в свою очередь, требует повышения интеллектуальной автономности, подразумевающей передачу части функций оператора по получению информации, необходимой для обеспечения функционирования РТК, бортовой информационно-управляющей системе (БИУС). Такой режим управления называется супервизорным. Наиболее перспективным средством обеспечения БИУС необходимой информацией представляются системы технического зрения (СТЗ). В этих системах выделяются две основных части: регистрирующие блоки (РБ) – различные виды видеокамер, реализующие сбор зрительных данных и вычислительно-управляющие блоки (ВУБ), управляющие сбором и обработкой зрительных данных. При этом чем большее количество задач ставится перед РТК и чем более сложные эти задачи, тем большее количество данных требуется собрать и обработать в масштабе реального времени.

В режиме телеуправления на борту РТК устанавливаются РБ, а функции ВУБ возлагаются на оператора, получающего данные от РБ по каналам связи. В супервизорном режиме часть функций обработки зрительных данных передаётся на борт, здесь необходимо установить ВУБ, обладающий вычислительной мощностью и программным обеспечением, способный собрать и обработать необходимый объём зрительных данных. ВУБ необходимой мощности вместе с ПО на основе каркаса ПО СТЗ РБ образует информационный модуль. В соответствии с объёмом действий по сбору и обработке зрительных данных, который может быть обработан в масштабе реального времени, информационные модули разделяются на модули малой и большой мощности. По относительному объёму задач, решение которых информационный модуль может выполнить на борту, возможно указать степень автономности, обеспечиваемой этим модулем. (Например, низкая: от 5 до 20% всех задач, решаемых в процессе выполнения миссии; средняя: от 20 до 50%; высокая: от 50 до 100%). Отдельным и в ряде случаев принципиально важным обстоятельством, как для принятия решений о снабжении РТК степенью автономности, так и для определения ниши использования РТК (РТК с ограниченным сроком эксплуатации; РТК с длительным сроком), является отношение стоимости предлагаемых решений по повышению степени автономности к стоимости исходной платформы РТК, подвергаемой модернизации. Из имеющегося опыта наиболее приемлемым соотношением является стоимость информационного модуля в пределах 15–50% от стоимости существующего телеуправляемого НРТК. Увеличение стоимости от 50 до 100% также находит применение, но является менее употребительным. Возрастание стоимости более чем на 100%, как правило переводит НРТК в класс редких, особо оберегаемых технических устройств.

Приведём примеры задач, решаемых представителями каждого из классов информационных модулей. На первых этапах повышения степени автономности выделены задачи, выполнение которых на борту позволяет снять или облегчить оператору решение таких задач, как определение положения и траектории РТК в процессе движения, обнаружение препятствий указанного вида, определение объектов интереса в полях зрения бортовых видеокамер.

В конфигурационном пространстве фиксируем постановку задачи (ось моделей), на оси аппаратуры фиксируем имеющуюся на борту подвижной платформы систему управления (СУ). Если СУ реализована в концепции ROS, то процесс встраивания информационного модуля происходит быстрее – примерно 1 человеко-месяц, если нет, то дополнительные трудозатраты на оформление программных интерфейсов (примерно ещё 1 человеко-месяц). По оси алгоритмов определяем какое алгоритмическое обеспечение может выполнить поставленную задачу (рассмотрение плоскости модели – алгоритмы). А в плоскости алгоритмы – аппаратура определяем требуемые вычислительные ресурсы. Общее рассмотрение позволяет определить стоимость полученного решения. Например, для наземного РТК с ограниченным сроком эксплуатации – достаточно выполнить в режиме телеуправления выдвижение в заданное местоположение, после чего перейти в режим супервизорного управления для решения задачи наблюдения за заданной областью

пространства с целью обнаружения кандидатов на объекты интереса их идентификации с участием оператора и сопровождения или «обслуживания», также по указанию оператора. В такой постановке стоимость дооснащения существующей платформы, укомплектованной поворотным устройством для крепления полезной нагрузки, дополнительным информационным модулем составляет от 10 до 15% исходной стоимости. Та же конфигурация может быть снабжена большей степенью автономности с увеличением решаемых на борту задач без изменения всей системы, а наращиванием аппаратной части по количеству регистрирующих блоков и вычислительным ресурсам. Стоимость дооснащения возрастает до 20-25% исходной стоимости. На данный момент получены и опробованы на практике решения следующих задач.

С помощью информационного модуля, использующего в своей аппаратной составляющей две видекамеры с разрешением 1600x1200 пикселей, объективами с трансфокаторами и ВУБ минимальной комплектации (см. табл. 1) были решены такие задачи информационного обеспечения целенаправленных перемещений в помощь водителю, как: удержание в полосе движения, предупреждение о препятствиях известного типа, сохранение направления на указанный ориентир. Для информационного обеспечения полезной нагрузки тот же информационный модуль выполняет задачи наблюдения заданной области с целью обнаружения объектов интереса заданного класса; автоматическое сопровождение указанного объекта интереса. Стоимость такой модернизации существующего НРТК составила 15 % стоимости исходного варианта.

С помощью более мощного информационного модуля, использующего в своей аппаратной составляющей три видекамеры: стерео систему с разрешением 2464x2056 пикселей, видекамеру с разрешением 4000x3000 пикселей, объективом с трансфокатором и ВУБ расширенной комплектации (см. табл. 1) в дополнение к указанным выше были решены такие задачи информационного обеспечения целенаправленных перемещений в помощь водителю, как: определение положения и траектории РТК относительно исходного положения; определение неровностей на впередилежащей поверхности движения; предупреждение о препятствиях типа значительные отклонения от горизонтальной поверхности». Для информационного обеспечения полезной нагрузки – обнаружение подвижных объектов интереса и информационное обеспечение взаимодействия с ними.

Заключение. Предложенные в статье методика и программно-аппаратные решения могут быть успешно применены для решения различных народнохозяйственных задач. Например, отдельные решения уже опробовались для повышения степени автономности сельскохозяйственной техники. Система информационного обеспечения целенаправленных перемещений, была реализована на экспериментальном образце интеллектуального трактора. Здесь же была показана возможность обеспечения контроля функционирования разнообразного навесного оборудования.

Другой областью применения предложенного модуля информационного обеспечения подвижных средств может стать беспилотная авиация. В этой сфере применения дополнительным ограничивающим фактором выступают массо-габаритные и энергетические ограничения, но для БЛА с взлётной массой 5 кг и больше уже имеются примеры успешного применения подобного информационного модуля для решения задач возврата без использования спутниковой навигационной системы и информационного обеспечения автономной посадки – соблюдения глиссады по видеоданным. Диапазон возможных аппаратных решений, совместно с унифицированной программно-аппаратной архитектурой открывают большие возможности для выбора экономически целесообразной компоновки средств наращивания степени автономности разнообразной подвижной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Christensen H.I., Sloman A., Kruijff G.-J., Wyatt J. Cognitive Systems. Reports on the European Union project on Cognitive Systems. – Свободный режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/50369027_Cognitive_Systems (дата обращения: 01.02.2025).
2. Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А., Павловский В.Е., Соколов С.М. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2019.
3. Huang H. et al. Autonomy Measures for Robots // Proc. of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California, November 2004.

4. Huang H., Messina E., Albus J. Autonomy Level Specification for Intelligent Autonomous Vehicles: Interim Progress Report // PerMIS Workshop, Gaithersburg, MD. – 2003.
5. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update // SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida, March 2005. – 2005.
6. Barbera A. et al. Software Engineering for Intelligent Control Systems // KI Journal Special Issue on AI and Software Engineering, Germany. – 2004. – No. 3.
7. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework // NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. – 2004. – Vol. I: Terminology.
8. Huang H., Pavek K., Novak B., Albus J., Messina E. A Framework for Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) // Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America June 2005, Baltimore, MD. – 2005.
9. Бозулавский А.А., Соколов С.М. Технология изготовления программного обеспечения СТЗ автономных РТК // Тр. 34-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 23-24 ноября 2023. – СПб.: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 27-35.
10. Соколов С.М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 65-76.
11. Соколов С.М. Технологии технического зрения и военно-технические задачи боевой робототехники // Вооружение и экономика. – 2023. – № 3 (65). – С. 51-59.
12. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. – Свободный режим доступа: <https://www.intel.com/content/www/us/en/automotive/overview.html> (дата обращения: 01.02.2025).
13. Лю Ш. и др. Разработка беспилотных транспортных средств. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 246 с.
14. Panayiotou K. et al. A Framework for Rapid Robotic Application Development for Citizen Developers // Software Magazine. – 2022. – P. 53-79.
15. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. – Свободный режим доступа: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains/> (дата обращения: 01.02.2025).
16. Apollo Open Platform. – Свободный режим доступа: <https://developer.apollo.auto/> (дата обращения: 01.02.2025).
17. NVIDIA DRIVE Hyperion Autonomous Vehicle Development Platfor. – Свободный режим доступа: <https://developer.nvidia.com/drive/hyperion-7.1> (дата обращения: 01.02.2025).
18. Serrano D. Middleware and Software Frameworks in Robotics. Applicability to Small Unmanned Vehicles. – STO-EN-SCI-271, STO/NATO, 2015. – 8 p.
19. Tsardoulis E., Mitkas P. Robotic frameworks, architectures and middleware comparison // arXiv:1711.06842v1. – 2017.
20. Wigness M., Eum S., Rogers J., Han D., Kwon H. A RUGD Dataset for Autonomous Navigation and Visual Perception in Unstructured Outdoor Environments // Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 03-08 November 2019. – 2019.
21. Albl C. et al. Multi-view drone tracking datasets. – Свободный режим доступа: <https://github.com/CenekAlbl/drone-tracking-datasets/tree/master> (дата обращения: 01.02.2025).
22. Бочаров Н.А. и др. Математические и программные модели задач технического зрения робототехнических комплексов на основе микропроцессоров «Эльбрус» // Тр. ИСП РАН. – 2022. – Т. 34. – Вып. 6. – С. 82-99.
23. Newman W. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. – CRC Press, 2018.
24. Fregin A. et al. Building a Computer Vision Research Vehicle with ROS. – Свободный режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/348769946_Building_a_Computer_Vision_Research_Vehicle_with_ROS (дата обращения: 01.02.2025).
25. Hu T. et al. ROS-based ground stereo vision detection: implementation and experiments // Robotics and Biomimetics. – 2016. – No. 3.
26. Nister D., Naroditsky O., Berge J. Visual odometry // Proc. Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. – 2004. – P. 652-659.
27. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry // IEEE Robotics and Automation Magazine. – 2011. – No. 12. – P. 80-92.
28. Konolige K., Agrawal M., Sol J. Large scale visual odometry for rough terrain // Proc. Int. Symp. Robotics Research. – 2007.
29. Tardif J., Pavlidis Y., Daniilidis K. Monocular visual odometry in urban environments using an omnidirectional camera // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. – 2008. – P. 2531-2538.
30. Agostinho L. et al. A Practical Survey on Visual Odometry for Autonomous Driving in Challenging Scenarios and Conditions // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10.

REFERENCES

1. Christensen H.I., Sloman A., Kruijff G.-J., Wyatt J. Cognitive Systems. Reports on the European Union project on Cognitive Systems. Available at: https://www.researchgate.net/publication/50369027_Cognitive_Systems (accessed 01 February 2025).

2. Boguslavskiy A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A., Pavlovskiy V.E., Sokolov S.M. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. IPM im. M.V. Keldysya RAN, 2019.
3. Huang H. et al. Autonomy Measures for Robots, *Proc. of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Anaheim, California, November 2004*.
4. Huang H., Messina E., Albus J. Autonomy Level Specification for Intelligent Autonomous Vehicles: Interim Progress Report, *PerMIS Workshop, Gaithersburg, MD, 2003*.
5. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: An Update, *SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, Florida, March 2005, 2005*.
6. Barbera A. et al. Software Engineering for Intelligent Control Systems, *KI Journal Special Issue on AI and Software Engineering, Germany, 2004, No. 3*.
7. Huang H. et al. Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework, *NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004, Vol. I: Terminology*.
8. Huang H., Pavek K., Novak B., Albus J., Messina E. A Framework for Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS), *Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America June 2005, Baltimore, MD, 2005*.
9. Boguslavskiy A.A., Sokolov S.M. Tekhnologiya izgotovleniya programmnogo obespecheniya STZ avtonomnykh RTK [Technology of software development for vision systems of autonomous robotic systems], *Tr. 34-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 23-24 noyabrya 2023* [Proc. of the 34th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", November 23-24, 2023. Saint Petersburg: TSNII RTK, 2023, pp. 27-35].
10. Sokolov S.M. Sravnitel'nyy analiz stepeni avtonomnosti robototekhnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of the degree of autonomy of robotic systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 65-76.
11. Sokolov S.M. Tekhnologii tekhnicheskogo zreniya i voenno-tehnicheskie zadachi boevoy robototekhniki [Technologies of technical vision and military-technical tasks of combat robotics], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics], 2023, No. 3 (65), pp. 51-59.
12. Intel Corp. Accelerate Automotive with Intel. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/automotive/overview.html> (accessed 01 February 2025).
13. Lyu Sh. i dr. Razrabotka bespilotnykh transportnykh sredstv [Creating autonomous vehicle systems]. Moscow: DMK Press, 2022, 246 p.
14. Panayiotou K. et al. A Framework for Rapid Robotic Application Development for Citizen Developers, *Software Magazine*, 2022, pp. 53-79.
15. Shnkland S. Tesla self-driving car computer. Available at: <https://www.cnet.com/news/meet-tesla-self-driving-car-computer-and-its-two-ai-brains> (accessed 01 February 2025).
16. Apollo Open Platform. Available at: <https://developer.apollo.auto/> (accessed 01 February 2025).
17. NVIDIA DRIVE Hyperion Autonomous Vehicle Development Platfor. Available at: <https://developer.nvidia.com/drive/hyperion-7.1> (accessed 01 February 2025).
18. Serrano D. Middleware and Software Frameworks in Robotics. Applicability to Small Unmanned Vehicles. STO-EN-SCI-271, STO/NATO, 2015, 8 p.
19. Tsardoulis E., Mitkas P. Robotic frameworks, architectures and middleware comparison, *arXiv:1711.06842v1*, 2017.
20. Wigness M., Eum S., Rogers J., Han D., Kwon H. A RUGD Dataset for Autonomous Navigation and Visual Perception in Unstructured Outdoor Environments, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS) 03-08 November 2019, 2019*.
21. Albl C. et al. Multi-view drone tracking datasets. Available at: <https://github.com/CenekAlbl/drone-tracking-datasets/tree/master> (accessed 01 February 2025).
22. Bocharov N.A. i dr. Matematicheskie i programnye modeli zadach tekhnicheskogo zreniya robototekhnicheskikh kompleksov na osnove mikroprotessorov «El'brus» [Mathematical and software models of technical vision tasks of robotic complexes based on "Elbrus" microprocessors], *Tr. ISP RAN* [Proc. ISP RAS], 2022, Vol. 34, Issue 6, pp. 82-99.
23. Newman W. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. CRC Press, 2018.
24. Fregin A. et al. Building a Computer Vision Research Vehicle with ROS. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348769946_Building_a_Computer_Vision_Research_Vehicle_with_ROS (accessed 01 February 2025).
25. Hu T. et al. ROS-based ground stereo vision detection: implementation and experiments, *Robotics and Biomimetics*, 2016, No. 3.
26. Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry, *Proc. Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004, pp. 652-659.

27. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2011, No. 12, pp. 80-92.
28. Konolige K., Agrawal M., Sol J. Large scale visual odometry for rough terrain, *Proc. Int. Symp. Robotics Research*, 2007.
29. Tardif J., Pavlidis Y., Daniilidis K. Monocular visual odometry in urban environments using an omnidirectional camera, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 2531-2538.
30. Agostinho L. et al. A Practical Survey on Visual Odometry for Autonomous Driving in Challenging Scenarios and Conditions, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10.

Соколов Сергей Михайлович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: sokolsm@list.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с., зав. сектором.

Богуславский Андрей Александрович – Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук; e-mail: anbg74@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; в.н.с.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@list.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; professor; principal researcher, chief division.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences; e-mail: anbg74@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; leading researcher.

УДК 004.896; 303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-140-150

Н.М. Чернышов, И.К. Романова-Большакова

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ С РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ

Целью исследования является разработка методики идентификации и определения местоположения объектов в условиях низкой видимости и возможного изменения их формы, с акцентом на извлечение деталей, созданных методом селективного лазерного спекания (SLS), из порошковой среды. В работе рассматриваются два принципиально разных подхода к формированию алгоритмов управления роботизированным манипулятором. Первый подход, доверительный, основан на предположении о минимальном смещении объекта в процессе манипуляций. Манипулятор движется по траектории, рассчитанной на основе предварительной трехмерной модели, без коррекции до момента захвата. Этот метод отличается высокой скоростью выполнения операции и минимальными вычислительными затратами. Однако он сопряжен с рисками: деформация объекта из-за сопротивления среды, смещение детали при контакте с инструментом, а также невозможность захвата при значительных отклонениях от номинального положения. Второй подход, осторожный, предполагает поэтапное удаление слоев порошка для визуализации объекта и корректировки траектории до захвата. Этот метод включает несколько этапов: удаление верхнего слоя среды до частичного обнажения детали, анализ данных для уточнения положения объекта, а также построение адаптивной траектории с учетом возможного смещения. Отдельное внимание в статье уделено генерации данных для обучения нейронных сетей, которые используются для идентификации объектов в условиях зашумленности. Рассмотрены два метода искусственного моделирования порошковых покрытий. Примитивный метод заключается в расширении вершин трехмерной модели вдоль нормалей с добавлением случайного шума. Усовершенствованный метод предполагает дифференцированное распределение порошка с учетом локальной кривизны поверхности. Последующие экспериментальные результаты показали, что обучение нейронной сети с использованием реальных данных имеет низкую эффективность. Точность распознавания составила 60–75%, что связано с малым объемом выборки и влиянием внешних факторов, таких как освещение и помехи. В то же время использование синтетических данных, подготовленных по представленной в исследовании методике, позволило повысить точность распознавания до 92%. Практическая значимость работы заключается в разработке методики поиска, обнаружения и определения детали, погруженной в порошок, что может быть использовано для автоматизации процессов постобработки на производствах, использующих селективное лазерное спекание. Разработанные решения адаптированы для интеграции в роботизированные системы,