

Раздел V. Техническое зрение

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-238-247

Н.А. Бочаров, А.В. Глухов, Н.Б. Парамонов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ COM-EXPRESS НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРОВ ЭЛЬБРУС ДЛЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Исследования в области создания специализированных вычислительных комплексов для роботов ведутся во многих мировых научных центрах и в том числе в нашей стране. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Важной, но нерешенной проблемой остается оснащение таких вычислительных комплексов микропроцессорами отечественного производства. Необходимость учета предельных массогабаритных характеристик, требований к системе охлаждения вычислительного комплекса, требований к бортовой электросети и потребляемой мощности, требований к производительности и к внешним интерфейсам обуславливают сложность и дороговизну разработки бортовых вычислительных комплексов. Отсутствие унификации вычислительных модулей при разработке создает дополнительные сложности для разработчиков робототехнических комплексов, повышает конечную стоимость робототехнических комплексов и усложняет его модернизацию. Использование стандартизированного фактора типа COM-Express позволяет разделить бортовой вычислительный комплекс на универсальную высокотехнологическую системную часть и плату-носитель. Микропроцессор, контроллер периферийных интерфейсов, оперативная память и жесткий диск размещаются на системном модуле, который выпускается большим тиражом и может быть заменен на более новый при появлении новых поколений отечественной вычислительной техники. Плата-носитель в свою очередь проста в разработке и дешева в производстве, а по своим характеристикам может быть скомпонована для конкретного робототехнического комплекса. В данной статье рассмотрены вычислительные модули в формате COM-Express на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус. Показана их применимость для создания перспективных бортовых вычислительных комплексов. Полученные авторами результаты говорят о перспективах импортозамещения в области робототехники.

Бортовые вычислительные комплексы; робототехника; COM-Express; Эльбрус; техническое зрение.

N.A. Bocharov, A.V. Gluhov, N.B. Paramonov

COM-EXPRESS MODULES BASED ON ELBRUS MICROPROCESSORS FOR ONBOARD COMPUTING SYSTEMS

Research in the field of creating specialized computing systems for robots is conducted in many world scientific centers, including our country. The development of capabilities of sensor systems, global navigation systems, growth of computing power and improvement of algorithms allow creating onboard computing systems with broad intellectual capabilities. An important, but unsolved problem remains the equipping of such computing systems with domestically produced microprocessors. The need to take into account the maximum weight and size characteristics, the requirements for the cooling system of the computing complex, the requirements for on-board

power supply and power consumption, performance requirements and external interfaces cause the complexity and high cost of developing on-board computing systems. The lack of unification of computing modules during development creates additional difficulties for developers of robots, increases the final cost of the robot and complicates its modernization. The use of a standardized form factor such as COM-Express makes it possible to divide the onboard computing complex into a universal high-tech system part and a carrier board. The microprocessor, peripheral interface controller, RAM and hard disk are placed on the system module, which is produced in large quantities and can be replaced with a newer one when new generations of domestic computing equipment appear. The carrier board, in turn, is easy to develop and cheap to manufacture, and according to its characteristics can be configured for a specific robotic complex. This article discusses COM-Express modules based on domestic Elbrus microprocessors. Their applicability for the creation of promising on-board computing systems is shown. The results obtained by the authors indicate the prospects of import substitution in the field of robotics.

Onboard computing systems; robotics; COM-Express; Elbrus; technical vision.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных комплексов. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Требования к бортовым вычислительным комплексам помимо производительности, определяются во многом требованиями к самим РТК. Для РТК специального назначения эти требования еще больше повышаются за счет необходимости дополнительной защиты от внешних воздействий, а также защиты информации, обрабатываемой на борту [1].

Использование отечественных вычислительных средств, таких как средства вычислительной техники (СВТ) на базе микропроцессоров Эльбрус позволяют решить вышеозначенные вопросы [2, 3]. Одной из сложностей, препятствующей широкому внедрению отечественных СВТ является проблема унификации [4]. Использование стандартизированного малогабаритного формата вычислительных модулей, такого как COM-Express, позволило бы открыть новые возможности разработчикам робототехнических комплексов.

В данной статье рассмотрены вычислительные модули в формате COM-Express на базе микропроцессоров Эльбрус и их применимость в качестве систем управления РТК.

Особенности СВТ бортовых вычислительных комплексов. Средства вычислительной техники (СВТ) для РТК обычно входят в состав бортовых систем этих комплексов, поэтому требования к этим СВТ во многом определяются требованиями к самим РТК. Кроме того, в зависимости от области применения и целей робототехнических комплексов, задачи, исполняемые СВТ, могут существенно различаться, а как следствие, могут существенно различаться требования к производительности и набору внешних интерфейсов самих вычислителей. Обобщая, можно сказать, что производительность СВТ должна быть достаточной для обработки данных с датчиков РТК (при автономном функционировании), а внешние интерфейсы должны обеспечивать возможность подключения датчиков и системы связи. Суммируя сказанное, в зависимости от типа РТК, могут предъявляться различные требования по следующим параметрам:

- ◆ предельные массогабаритные требования;
- ◆ требования к системе охлаждения СВТ;
- ◆ требования к бортовой электросети и потребляемой мощности СВТ
- ◆ требования к производительности
- ◆ требования к внешним интерфейсам.

Кроме того, надо учесть, что по конструктивным требованиям блок вычислителя должен быть выполнен в виде отдельного конструктивного элемента, который должен иметь возможность надежного крепления на шасси РТК и обладать одним или несколькими удобными разъемами, обеспечивающими высокоскоростной обмен и возможность быстрого монтажа/демонтажа блока на шасси РТК.

Бортовые вычислительные модули в форм-факторе SOM-Express. Сочетание на одной печатной плате миниатюрных процессоров и крупных простых компонентов приводит к тому, что площадь многослойных печатных плат расходуется неэффективно. Кроме того, все простые изменения в компоновке печатной платы будут приводить к повторной дорогостоящей подготовке производства, что также неэффективно.[5]

Естественным выходом из такой ситуации является применение систем на модуле (SOM) и разделение устройства на несколько печатных плат: универсальную высокотехнологическую системную часть и плату-носитель. В таком подходе высокотехнологичные компоненты размещаются на системном модуле, который может выпускаться большим тиражом и иметь широкий спектр применений. Плата-носитель, наоборот, оптимизирована и скомпонована для конкретного применения.

Характерной чертой всех изделий класса SOM и модулей SOM Express, в частности, является то, что они устанавливаются на клиентские базовые платы, где реализуются необходимые разъемы и отражается прикладная специфика. В аспектах, не относящихся к сфере компетенции спецификации SOM Express, клиент должен проектировать базовую плату по собственному усмотрению, сообразуясь с требованиями конкретных задач и воплощая свои ноу-хау [6].

В настоящий момент на базе микропроцессоров Эльбрус реализовано три варианта вычислительных модулей в формате SOM Express.

Вычислительный модуль «E4C/COM [7] реализован на базе микропроцессора «Эльбрус-4С». Объем памяти составляет 8 Гб (два канала по 4GB DDR3L с ECC каждый). Внутри модуля реализованы высокоскоростные интерфейсы (PCI express, 1000BASE-T) с использованием контроллера периферийных интерфейсов (КПИ). Межмодульный обмен информацией и управление внешними устройствами производятся через три соединителя серии СНЦ144К-100. Габаритные размеры вычислительного модуля составляют 125×95×9,8 мм без радиатора. Масса без радиатора составляет 140 г. Внешний вид платы E4C/COM изображен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид модуля E4C/COM

Вычислительный модуль основан на микропроцессоре Эльбрус-4С – многоядерном универсальном высокопроизводительном микропроцессоре, построенном в соответствии с архитектурой «Эльбрус» версии 4. Каждое ядро процессора декодирует и отправляет на исполнение до 23 операций за такт. Эльбрус-4С представ-

ляет собой систему на кристалле, содержащую 4 вычислительных ядра, кэш-память 2-го уровня общим объемом 8 Мегабайт, 3 контроллера памяти, 3 канала межпроцессорного обмена и канал ввода-вывода. Рабочая тактовая частота микросхемы составляет 800 МГц. Кристалл выполнен по технологической норме 65 нм, средняя рассеиваемая мощность составляет 45 Вт. Имеются средства для значительного снижения рассеиваемой мощности.

На базе отечественного микропроцессора Эльбрус-1С+ ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» разработан процессорный модуль МП18 [8], выполненный в форм-факторе Com Express Type 6. Модуль включает в себя полноценное процессорное ядро с контроллером периферийных интерфейсов КПИ-2, оперативную память, выполненную методом поверхностного монтажа для улучшения характеристик по вибрации, а также с интегрированным твердотельным носителем объемом от 8 до 64 Гб. Для расширения коммуникационных способностей изделия на отдельный разъем выведен дополнительный канал ethernet 10/100/1000.

Модуль поставляется в комплекте с теплораспределительной пластиной, обеспечивающей передачу выделяемого тепла на охлаждающие конструкции изделия Заказчика.

Встроенное в процессор Эльбрус-1С+ графическое ядро позволяет применять модуль для отображения информации на пульт управления. Поддерживается вывод на два канала HDMI и LVDS. Габаритные размеры вычислительного модуля составляют 95x125x12 мм. Масса без радиатора составляет 120 г. Внешний вид платы МП18 приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид модуля МП18

Плата МП18 основана на микропроцессоре Эльбрус-1С+ – высокопроизводительном экономичном микропроцессоре для встраиваемых решений, изготовленного по технологии 40 нм. Он содержит одно ядро на архитектуре «Эльбрус» на базе широкого командного слова (VLIW) с тактовой частотой ядра 1000 МГц и графическое ядро с тактовой частотой 800 МГц с поддержкой OpenGL 2.1 и OpenCL 1.1. В процессор интегрирован двухканальный контроллер памяти DDR3-1600 и канал ввода-вывода для подключения южного моста КПИ-2. Микропроцессор разработан и производится АО «МЦСТ».

Модуль E2C3-COM [9], на базе процессора Эльбрус-2С3, выполнен в форм-факторе COM Express Type 6 Basic. Представляет собой «компьютер на модуле» – встраиваемый одноплатный компьютер промышленного назначения, выполненный в бескорпусном исполнении для использования в качестве мезонины, устанавливаемого на специализированных платах носителях.

Модуль включает в себя полноценное процессорное ядро с интегрированными контроллерами периферийных интерфейсов и видеоконтроллером, оперативной памятью, выполненной методом поверхностного монтажа, а также с интегрированным твердотельным носителем объемом до 120 Гб.

Модуль может поставляться в комплекте с теплораспределительной пластиной, обеспечивающей передачу выделяемого тепла на охлаждающие конструкции изделия Заказчика. Встроенное в процессор Эльбрус-2С3 графическое ядро позволяет применять модуль для вывода информации на пульт управления.



Рис. 3. Внешний вид модуля E2C3-COM

Вычислительный модуль основан на микропроцессоре «Эльбрус-2С3» — процессор общего назначения архитектуры Эльбрус версии 6 со встроенными ускорителями 2D/3D-графики и кодирования-декодирования видео. Спроектирован и изготовлен по технологическим нормам 16 нм, реализует технологии энергосбережения.

Сравнение характеристик рассмотренных вычислительных модулей приведено в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики модулей

	E4C/COM	МП18	E2C3-COM
Микропроцессор	Эльбрус-4С, 4 ядра, 800 МГц	Эльбрус-1С+, 1 ядро, 1 ГГц	Эльбрус-2С3, 2 ядра, 2 ГГц
Архитектура процессора	Эльбрус v4	Эльбрус v4	Эльбрус v6
Видеоядро	Нет	Встроенное	Встроенное
Контроллер ввода-вывода	КПИ	КПИ-2	Встроенный
Производительность, ГФлопс (FP32/FP64)	50/25	24/12	192/96
Оперативная память	4 Гбайта DDR3	4 Гбайта DDR3	8 Гбайт, ECC DDR4
Форм-фактор	COM Express Type 6	COM Express Type 6	COM Express Type 6
Габаритные размеры, мм	125×95×9,8	125×95×12	125×95×12
Масса, кг	0,14	0,12	0,11
Потребляемая мощность, Вт, не более	65	30	30
Год выпуска	2016	2018	2022

Рассмотренные вычислительные модули по условиям эксплуатации и характеру применения соответствуют условиям:

- ◆ пониженная рабочая температура окружающего воздуха минус 50 °С;
- ◆ пониженная предельная температура окружающего воздуха минус 60 °С;
- ◆ повышенная рабочая температура окружающего воздуха плюс 55 °С;
- ◆ повышенная предельная температура окружающего воздуха плюс 60 °С;
- ◆ пониженное атмосферное давление 84 кПа (630 мм рт.ст.);
- ◆ повышенное атмосферное давление 106,7 кПа (800 мм рт.ст.);
- ◆ повышенная относительная влажность воздуха 80 % при температуре плюс 25 °С без выпадения конденсата.

Перечень внешних интерфейсов рассмотренных вычислительных модулей приведен в табл. 2.

Таблица 2

Перечень внешних интерфейсов

Интерфейс	E4C/COM	МП18	E2C3-COM
Ethernet	1xEthernet 1000Base-T	1x10/100/1000 Mbit/s	1x10/100/1000 Mbit/s
USB 2.0	2	8	7
USB 3.0	0	0	4
Видео	нет	2xHDMI, 2-х ка- нальный LVDS	2xHDMI, 2-х ка- нальный LVDS
SATA	3xSATA 2.0	4xSATA 3.0	3xSATA 3.0
RS232	2	2	2
Другое	SPI, I2C	SPI, I2C, SMBus	SPI, I2C, SMBus

Использование вычислительных модулей для решения задач РТК. Исследования по применимости вычислительной техники на базе микропроцессоров Эльбрус для задач робототехники проводились в ряде работ [10, 11], однако публикации на тему применимости процессоров Эльбрус 6-го поколения (Эльбрус-2С3, Эльбрус-12С, Эльбрус-16С) для задач робототехники на данный момент в открытых источниках отсутствуют.

Одной из самых сложных и важных задач мобильной робототехники является автономное движение в заранее неизвестной среде с препятствиями. Решение этой задачи состоит из нескольких подзадач:

- ◆ составления цифрового описания рабочей среды с определением зон, в которых робот может двигаться безопасно с заданной скоростью [12, 13]
- ◆ определение положения мобильного робота в заданной системе координат [14, 15];
- ◆ планирование траектории с учетом препятствий, кинематических и динамических возможностей мобильного шасси [16, 17];
- ◆ осуществления автономного движения вдоль спланированной траектории [18, 19].

Не менее важной для автономных РТК является задача диагностики. Диагностика отказов бортового вычислительного комплекса, как правило, базируется на использовании средств операционной системы (ОС) реального времени (РВ) вычислительного модуля и специальных аппаратных средств и позволяет обнаруживать отказ, определять степень его критичности для сети и запускать реконфигурацию за минимальное время после возникновения отказа.

Таким образом, в качестве основных задач РТК, требующих особого внимания, выделим:

- ◆ задача поиска пути;
- ◆ задача технического зрения;
- ◆ задача диагностики.

Как показано в работе [20] задача поиска пути произвольно масштабируется до достижения оптимальных по времени характеристик и производительности самого слабого из рассмотренных процессоров (Эльбрус-4С) уже достаточно для ее решения. Задача диагностики рассмотрена в работе [21]. Использование средств ОС Эльбрус и модуля привязки времени позволяет добиться времени реакции на отказ менее 0.1 с.

Самой ресурсоемкой задачей для решения на борту РТК является задача технического зрения. Одним из самых распространенных методов технического зрения на борту РТК является стереозрение. В стандартную поставку дистрибутива ОС «Эльбрус» входит библиотека OpenCV, с помощью которой реализуются два алгоритма стереорекострукции – StereoSGBM и StereoBM. С использованием рассмотренных вычислительных модулей рабочая производительность на паре изображений разрешением 640x480 px составила от 8 до 30 кадров в секунду, причем максимальная производительность достигнута на ВМ E2C3-COM. Замеры проводились с использованием средств OpenCV, C++ и Python, входящих в состав ОПО Эльбрус.

Заключение. В данной статье рассмотрены вычислительные модули в формате COM-Express на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус для применения в бортовых вычислительных комплексах. Рассмотрены платы E4C/COM, МП18, E2C3-COM. Использование стандартизированного форм-фактора типа COM-Express позволяет унифицировать и удешевить производство бортовой вычислительный комплекс и упростить их модернизацию.

Показано соответствие рассмотренных вычислительных модулей требованиям по предельным массогабаритным характеристикам, требованиям к системе охлаждения СВТ, к бортовой электросети и потребляемой мощности СВТ, к производительности и к внешним интерфейсам для применения в наземных робототехнических комплексах. Полученные авторами результаты говорят о перспективах импортозамещения в области робототехники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8, № 3 (35). – С. 14-32. – DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Решения по включению средств защиты информации в вычислительные комплексы на основе платформы "Эльбрус" // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 103-104. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
3. Бочаров Н.А. Программно-аппаратная платформа "Эльбрус" для решения задач искусственного интеллекта // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7 (107). – С. 638-640. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640.
4. Чучко П.А., Бычков И.Н., Панченко Е.Г. Проблема унификации модулей на основе процессора "Эльбрус-2С3" // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7(107). – С. 96-97. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
5. Дашевский В.П., Бизин М.М. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3 (37). – С. 91-96.
6. Афонин Д. Новости с рынка встраиваемых систем: наступление COM Express продолжается // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4 (69). – С. 138-141.
7. <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
8. <http://www.sml820.ru/2018/09/04/mp18/>.

9. <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
10. Бочаров Н.А., Зувев А.Г., Славин О.А. Производительность микропроцессора Эльбрус-8СВ для решения задач технического зрения в условиях ограничений энергопотребления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 259-271.
11. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14. – DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
12. Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh. Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 38. – P. 1524-1531. – ISSN 2351-9789. – <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
13. Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang, UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 106. – 102918. – ISSN 0926-5805. – <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
14. Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 157. – P. 261-269. – ISSN 0168-1699. – <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
15. Vasiliki Balaska, Loukas Bampis, Moses Boudourides, Antonios Gasteratos. Unsupervised semantic clustering and localization for mobile robotics tasks // Robotics and Autonomous Systems. – 2020. – Vol. 131. – 103567. – ISSN 0921-8890. – <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
16. Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 157. – P. 261-269. – ISSN 0168-1699. – <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
17. Chaymaa Lamini, Said Benhlima, Ali Elbekri. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 127. – P. 180-189. – ISSN 1877-0509. – <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
18. Haitao Zhao, Lingchu Mao, Jibo Wei. Coverage on demand: A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks // Computer Networks. – 2018. – Vol. 135. – P. 190-200. – ISSN 1389-1286. – <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
19. Guilherme Maeda, Okan Koç, Jun Morimoto. Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control // Neural Networks. – 2020. – Vol. 129. – P. 109-122. – ISSN 0893-6080. – <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.
20. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Alexandrov A.V., Slavin O.A. Solving of tasks of cognitive control a robots group in multi-core microprocessors "Elbrus" // CEUR Workshop Proceedings: Selected Papers of the 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies", Convergent 2017, Moscow, 24–26 November 2017. – М., 2017. – P. 234-244.
21. Бочаров Н.А., Гладких А.С., Парамонов Н.Б., Сенченков С.В. Возможности микропроцессоров Эльбрус-8С и Эльбрус-8СВ для решения задач робототехники // Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 года. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2020. – С. 71-83.

REFERENCES

1. Romanov A.M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Ch. 3. Ekstremal'naya robototekhnika [Review of hardware and software control systems for robots of various sizes and purposes. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian technological journal], 2020, Vol. 8, No. 3 (35), pp. 14-32. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A. Resheniya po vklucheniyu sredstv zashchity informatsii v vychislitel'nye komplekсы na osnove platformy "El'brus" [Solutions for the inclusion of information security tools in computing complexes based on the Elbrus platform], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4 (99), pp. 103-104. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.

3. *Bocharov N.A.* Programmno-apparatnaya platforma "El'brus" dlya resheniya zadach iskusstvennogo intellekta [Software and hardware platform "Elbrus" for solving artificial intelligence problems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7 (107), pp. 638-640. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640.
4. *Chuchko P.A., Bychkov I.N., Panchenko E.G.* Problema unifikatsii moduley na osnove protsessora "El'brus-2S3" [The problem of unification of modules based on the processor "Elbrus-2C3"], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7(107), pp. 96-97. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
5. *Dashevskiy V.P., Bizin M.M.* Obzor vozmozhnostey bortovykh vychisliteley na osnove SMART-moduley dlya robototekhnicheskikh kompleksov [Overview of the capabilities of onboard computers based on SMART modules for robotic complexes], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.], 2015, No. 3 (37), pp. 91-96.
6. *Afonin D.* Novosti s rynka vstraivaemykh sistem: nastuplenie COM Express prodolzhaetsya [News from the embedded systems market: COM Express offensive continues], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2007, No. 4 (69), pp. 138-141.
7. Available at: <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
8. Available at: <http://www.sm1820.ru/2018/09/04/mp18/>.
9. Available at: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
10. *Bocharov N.A., Zuev A.G., Slavin O.A.* Proizvoditel'nost' mikroprotsessora El'brus-8SV dlya resheniya zadach tekhnicheskogo zreniya v usloviyakh ogranicheniy energopotrebleniya [The performance of the Elbrus-8C V microprocessor for solving problems of technical vision in conditions of limited energy consumption], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 259-271.
11. *Bocharov N.A.* Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling of algorithms for disaster tolerance of groups of robots on the software and hardware platform "Elbrus"], *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
12. *Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh.* Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment, *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 38, pp. 1524-1531. ISSN 2351-9789. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
13. *Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang,* UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments, *Automation in Construction*, 2019, Vol. 106, 102918. ISSN 0926-5805. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
14. *Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim.* Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 157, pp. 261-269. ISSN 0168-1699. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
15. *Vasiliki Balaska, Loukas Bampis, Moses Boudourides, Antonios Gasteratos.* Unsupervised semantic clustering and localization for mobile robotics tasks, *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, Vol. 131, 103567. ISSN 0921-8890. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
16. *Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim.* Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 157, pp. 261-269. ISSN 0168-1699. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
17. *Chaymaa Lamini, Said Benhlina, Ali Elbekri.* Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning, *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 127, pp. 180-189. ISSN 1877-0509. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
18. *Haitao Zhao, Lingchu Mao, Jibo Wei.* Coverage on demand: A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks, *Computer Networks*, 2018, Vol. 135, pp. 190-200. ISSN 1389-1286. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
19. *Guilherme Maeda, Okan Koç, Jun Morimoto.* Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control, *Neural Networks*, 2020, Vol. 129, pp. 109-122. ISSN 0893-6080. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.

20. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Alexandrov A.V., Slavin O.A. Solving of tasks of cognitive control a robots group in multi-core microprocessors "Elbrus", *CEUR Workshop Proceedings : Selected Papers of the 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies", Convergent 2017, Moscow, 24–26 November 2017*. Moscow, 2017, pp. 234-244.
21. Bocharov N.A., Gladkikh A.S., Paramonov N.B., Senchenkov S.V. Vozможности mikroprotssessorov El'brus-8S i El'brus-8SV dlya resheniya zadach robototekhniki [Possibilities of microprocessors Elbrus-8C and Elbrus-8SV for solving robotics problems], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 goda* [Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of articles of the V Military Scientific Conference, Anapa, July 29-30, 2020]. Anapa: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voennyi innovatsionnyy tekhnopolis "ERA", 2020, pp. 71-83.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. О.А. Славин.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия, тел.: +79167346437; к.т.н.; начальник отдела.

Глухов Антон Викторович – e-mail: glukhov_a@ineum.ru; к.т.н.; начальник отделения.

Парамонов Николай Борисович – e-mail: paramon_n@mcst.ru. д.т.н.; профессор; г.н.с.

Bocharov Nikita Alexeevich – PJSC «Brook INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; chief of department.

Glukhov Anton Viktorovich – e-mail: glukhov_a@mcst.ru; cand. of eng. sc.; chief of division.

Paramonov Nikolay Borisovich – e-mail: paramon_n@mcst.ru; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-247-255

**А.Ю. Гагарина, П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, М.В. Созинова,
В.А. Тупиков**

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Целью данной разработки является создание устойчивого алгоритма автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов с обучением в реальном времени, для встраиваемых вычислительных устройств оптико-электронных систем. В рамках представленной работы произведено исследование и анализ имеющегося мирового научно-технического опыта в области алгоритмов автоматического сопровождения общего назначения. В статье показано что современные алгоритмы автоматического сопровождения представляют собой систему, принимающую решение о текущем положении, размерах и других параметрах сопровождаемого объекта на основе обучаемой модели. Авторами исследования выделены наиболее эффективные из применяемых базовых алгоритмов, подходящие для применения во встраиваемых вычислительных системах робототехнических комплексов, и разработан новый алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов. Проведено полунатурное тестирование разработанного алгоритма и оценена его эффективность в решении задач не только автоматического сопровождения объектов, но и задач автоматического обнаружения объектов по нескольким эталонным образам. В заключении представлены предложения по дальнейшему повышению точности разработанного алгоритма и по его оптимизации и внедрению в состав специального программного обеспечения бортовых вычислительных систем летательных аппаратов.

Автоматическое обнаружение; автосопровождение; обучение на лету; встраиваемые системы; гистограмма направленных градиентов.