

Для цитирования: Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Славин О. А., Янко Д. В. Оценка перспектив использования вычислительных средств семейства «Эльбрус» при реализации алгоритмов распознавания в современных робототехнических комплексах // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 99–105. УДК 004.94

**Н. А. Бочаров<sup>1</sup>, Н. Б. Парамонов<sup>2</sup>, О. А. Славин<sup>3</sup>, Д. В. Янко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> АО «МЦСТ», <sup>2</sup> ПАО «ИНЭУМ им И. С. Брука», <sup>3</sup> ИСА ФИЦ «Информатика и управление» РАН, <sup>4</sup> 432 ВП МО

# ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СЕМЕЙСТВА «ЭЛЬБРУС» ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ\*

*При разработке современных автономных наземных робототехнических комплексов одной из главных задач является создание интеллектуальной системы управления. Существенным, но не решенным вопросом является оснащение таких систем управления вычислительной техникой, созданной на базе отечественных микропроцессоров, и программным обеспечением отечественной разработки. Цель работы – исследовать применимость вычислительных средств на базе многоядерных микропроцессоров «Эльбрус» для решения задач компьютерного зрения в таких интеллектуальных системах. Авторами были исследованы алгоритмы распознавания и работы системы стереозрения и разработаны программные средства, моделирующие данные алгоритмы с учетом особенностей микропроцессоров «Эльбрус». Получены временные характеристики для алгоритмов стереореконструкции и калибровки. Показано, что вычислительные комплексы на базе микропроцессоров «Эльбрус» могут удовлетворять требованиям, выдвигаемым к системам управления современными робототехническими комплексами.*

**Ключевые слова:** алгоритмы распознавания, многоядерные вычислительные системы, микропроцессоры «Эльбрус», моделирование.

## Введение

В настоящее время основной тенденцией в развитии наземной робототехники стал постепенный переход от дистанционно управляемых к полуавтономным, а в перспективе – к автономным робототехническим комплексам (РТК) [1], в связи с чем особое значение приобрела проблема интеллектуального управления, основанного на системах технического зрения. Ввиду того что системы этого класса являются наиболее ресурсоемким и сложным в реализации программно-аппаратным компонентом создаваемого РТК, возникает необходимость в предварительной оценке применяемой в проекте вычислительной техники. При этом очень существенным, в ряде случаев критическим фактором стало оснащение вычислительной техникой, разработанной на базе отечественных микропроцессоров и программного обеспечения. В данной работе в этом качестве рассматривались передовые вычислительные комплексы семейства

«Эльбрус», построенные на базе микропроцессоров «Эльбрус-4С» и «Эльбрус-8С» [2, 3].

В процессе исследований было создано программное обеспечение, позволяющее моделировать работу системы стереозрения (СТЗ). С его использованием получены временные характеристики, на основании которых можно сделать вывод о применимости исследованных микропроцессоров для решения задач распознавания, а следовательно, и для использования в качестве основы системы управления РТК.

## Постановка задачи

На сегодняшнем уровне развития теории и практики машинного зрения именно стереоскопическое восприятие является стандартным решением как при разработке систем робототехнической навигации в целом, так и при составлении цифровой модели рельефа в частности. Оно реализуется преимущественно с использованием двух отстоящих

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-29-03297).

друг от друга камер (стереопары), позволяющих создать два плоских изображения одной и той же сцены. Анализ стереопар позволяет выявить трехмерные объекты, расположенные на пути следования РТК, вычислить расстояния до препятствий, а также (в случае, если форма объектов известна) провести их идентификацию.

Для распознавания трехмерного или плоского образа необходимо решить задачу классификации. Тренировка (обучение) классификатора позволяет выработать правила классификации (четкого разграничения классов) и уточнить информативные признаки объектов на изображениях. Система, обучаясь, сама настраивает параметры классификатора, с тем чтобы минимизировать ошибку распознавания объектов, заданную некоторым функционалом различия между объектами в пространстве признаков.

Правильная и длительная подготовка (тренировка) классификатора дает возможность в конечном итоге сделать процедуру распознавания достаточно быстрой и инвариантной к изменению внешних условий и геометрии объектов.

#### **Этапы и проблемы процедуры стереоотождествления**

Основной процедурой в системе стереоскопического зрения является стереоотождествление (correspondence problem) – нахождение на изображениях, полученных различными камерами, соответствующих областей [4]. В ее реализации естественно выделить три последовательно выполняемых действия:

1. Выбор «эталоны» в области снимка, сделанного одной камерой. Эталонное изображение выбирается из числа наиболее информативных участков исходного изображения, входящего в область перекрытия левого и правого снимков. Это могут быть точечные структуры, специфические контуры, определенные области и прочее. Проблемы, возникающие на этом этапе, связаны с недостаточностью радиометрических и геометрических характеристик полученного изображения и его зашумленностью.

Пути решения основаны на поиске эталонов, инвариантных к различным геометрическим преобразованиям (сдвигу, масштабированию, повороту), а также к изменению яркости исследуемых точек. С этой целью могут быть использованы определенные алгоритмы выделения и описания контуров.

2. Обнаружение и уточнение положения образа эталона на изображении, полученном с помощью другой камеры. Сложности этого этапа вызваны как весьма большим для работы в режиме реального времени числом требуемых операций пиксельного сравнения фрагментов области перекрытия с эталоном, так и неоднозначностью, возникающей при

сопоставлении образов. Возможные подходы к решению задачи стереоотождествления в наиболее распространенных на практике случаях направлены на ограничение области поиска и базируются на использовании априорной информации о характеристиках объектов и местности. Отдельным, аппаратным методом увеличения качества восстановления геометрии 3D-объектов является включение в стереовидеосистему дополнительных камер, предоставляющих проверочные точки наблюдения. Следует отметить, что именно аппаратное направление устранения ошибок идентификации представляется наиболее перспективным, поскольку никакие математические методы обработки не позволят получить удовлетворительного результата при недостаточной информативности входных данных.

3. Оценка качества процедуры стереоотождествления определяется путем вычисления «меры близости» образов – корреляционной или иной целевой функции – и в огромной степени зависит от решения проблем, возникающих на первых этапах.

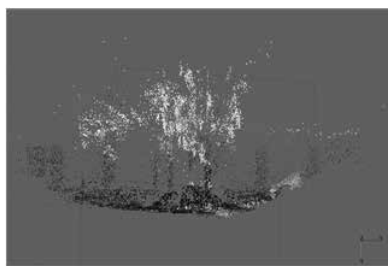
К сожалению, следует отметить, что в целом задача стереоотождествления далека от возможности создания универсального алгоритма решения. Даже для простейших модельных задач эта процедура не является тривиальной и однозначной. Однако при некоторых ограничениях на параметры задачи решение может быть найдено.

#### **Общая схема распознавания при недостаточной априорной информации о характеристиках местности**

На практике чаще всего приходится решать задачи распознавания в условиях недостаточности информации, а также – распознавания объектов сложной геометрической конфигурации. Процедура обнаружения трехмерных препятствий в этом случае дополняется анализом проекций облака общих точек стереопар. Таким образом, трехмерная задача переводится в более удобную для анализа 2D-плоскость (рис. 1).

Облака точек, построенные в программе автоматизированной фотограмметрической обработки материалов фотосъемки, могут проецироваться на любую плоскость, удобную для их последующего анализа, который предполагает проведение распознавания (детектирования) выделенных объектов. Задача упрощается тем, что экспорт модели облака точек производится с полным сохранением цветовой информации.

Следует отметить, что далеко не во всех задачах распознавания цвет играет важную роль. Зачастую полутонные снимки не менее информативны, нежели цветные, и в силу существенно более экономной обработки обеспечивают лучшую скорость



а)



б)

Рисунок 1. Фронтальная проекция облака точек стереопары (а) и изображение сцены (б)

идентификации. Однако при распознавании природных объектов цвет может служить ориентиром, позволяющим обозначить области нахождения вероятных препятствий на пути следования РТК.

В силу того, что в поставленной задаче распознаванию подлежат сложные (и в основном природные) объекты, для которых невозможно задание единого шаблона класса, процедуру детектирования следует основывать на обучении по прецедентам. Этот подход, являющийся наиболее универсальным в задачах анализа изображений, предполагает последовательное выполнение ряда процедур:

1. Описание объектов. Как правило, характеристики всех представляющих интерес объектов даже в пределах одного класса отличаются значительным разнообразием. А потому формирование полного набора обеспечивающих распознавание признаков (алфавита) и последующее выделение минимального набора (словаря) представляют собой более трудоемкую задачу, нежели описание более простых геометрических объектов искусственного происхождения.
2. Построение классификатора. В основе классификатора лежит обучающая выборка, составляемая разработчиками. В нее входят как позитивные (включающие объект распознавания), так и негативные (без включения объекта распознавания) примеры изображений, с которыми должна работать система. Прецеденты должны быть случайными, независимыми и иметь достаточный объем.
3. Распознавание объектов. На этапе работы уже обученного классификатора предполагается выделение уточненного вектора информативных признаков изображения. Так как объекты интереса могут присутствовать в любом месте изображения, вся его область должна быть просмотрена с применением процедуры «скользящего окна». В связи с тем, что объекты на изображении могут иметь различный масштаб, необходимо иметь возможность подстройки изображения под размер объектов тренировочной выборки (масштабирования).

4. Оценка достоверности алгоритма классификации. Достоверность алгоритма классификации напрямую зависит от величины общего риска, т.е. вероятности ошибочного решения классификатора при распознавании реальных объектов. Оценить эту вероятность мы можем по испытаниям так называемой контрольной выборки, состоящей из прецедентов, не применяемых для обучения. Для статистической значимости оценки контрольная выборка должна быть случайной и иметь достаточный объем, сравнимый с объемом обучающей выборки.

Заметим, что оценить достоверность алгоритма классификации можно, только выполнив необходимый объем яркостного геометрического и имитационного моделирования.

#### **Подход к распознаванию с использованием визуальной информации. Классификация и кластеризация**

С помощью систем распознавания решаются два основных класса задач, определяющих назначение таких систем в целом:

1. Классификация – отнесение предъявляемых объектов к определенным классам с помощью применения известных правил. Это наиболее типичная задача. Перед тем как система сможет выполнять данную функцию, предполагается ее обучение на множестве примеров – обучающей выборке объектов распознавания.
2. Кластеризация – процесс разбиения заданной выборки объектов (наблюдений) на непересекающиеся подмножества, называемые кластерами, так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров существенно отличались.

В настоящее время при решении задачи распознавания в различных предметных областях разработано большое количество методов. Каждый из них по-своему уникален, обладает собственными возможностями и ограничениями. В одних случаях

для решения конкретной задачи разрабатывается специальный метод распознавания, в других применяется адаптация существующих решений к специфике данной задачи.

Одна из классификаций методов распознавания различает их по способу представления объектов распознавания. Эта характеристика в значительной степени определяет содержание метода, область его применения и используемый математический аппарат. Используемый методом способ представления образов можно расценивать как принятый в нем подход к распознаванию, на основе которого методы можно сравнивать между собой.

Результатом применения алгоритма классификации к какому-либо объекту является номер класса, к которому отнесен данный объект.

Обучение классификатора заключается в построении алгоритма при условии, что задано конечное множество объектов с известными классами. Это множество называется «обучающей выборкой». Классовая принадлежность остальных объектов неизвестна.

В задаче кластеризации одной из важнейших целей является анализ имеющихся данных на предмет выявления кластерной структуры. Разбиение множества объектов на группы со схожими признаками позволяет упростить дальнейшую обработку данных, применяя к каждому кластеру свой метод анализа (стратегия «разделяй и властвуй»).

**Алгоритм Виолы-Джонса с детектором Хаара**

Этот алгоритм позволяет обнаружить и выделить объекты определенных классов в форме кластеров. На сегодняшний день он является одним из наиболее быстрых и результативных в компьютерном зрении, что позволяет проводить распознавание в режиме реального времени.

Для применения алгоритма осуществляется переход к интегральному представлению изображения, дающему возможность ускоренного расчета суммарной яркости любого внутреннего прямоугольника. Матрица такого представления

по размерам совпадает с исходным изображением. Ее элементами являются суммы интенсивностей всех пикселей исходного изображения, находящихся сверху слева от данного элемента:

$$I(x_l, y_k) = \sum_{s \leq l, t \leq k} i(x_s, y_t),$$

где  $I(x_l, y_k)$  – элемент интегрального изображения, стоящий на пересечении  $l$ -й строки и  $k$ -го столбца;  $i(x_s, y_t)$  – элемент исходного изображения с индексами  $s, t$ .

В этом случае:

$$I(x_l, y_k) = I(x_l, y_k) - I(x_{l-1}, y_{k-1}) + I(x_l, y_{k-1}) + I(x_{l-1}, y_k),$$

что при вычислении суммарной интенсивности пикселей внутри любой прямоугольной области приводит к отсутствию зависимости числа операций (а следовательно, и времени расчетов) от ее размеров.

Алгоритм Виолы-Джонса основан на Хаар-подобных характеристиках. Характеристики представляют собой результат сравнения интегральных интенсивностей в двух прямоугольниках внутри изображения.

Для любого объекта  $a$ , принадлежащего множеству объектов  $A: a \in A$ , можно ввести признаковое описание – вектор  $x$ :

$$x = (f_1(a), f_2(a), \dots, f_n(a)),$$

где  $f_1, f_2, \dots, f_n$  – определенный набор признаков.

Решающая функция (алгоритм):

$$g: A \rightarrow B,$$

где  $B$  – множество ответов (тоже может рассматриваться как признак).

Расширенный метод использует так называемые примитивы Хаара (рис. 2а) и дополнительные признаки (рис. 2б).

Значение признака вычисляется как разность интенсивностей точек изображения, закрываемых темными и светлыми частями Хаар-подобных характеристик.

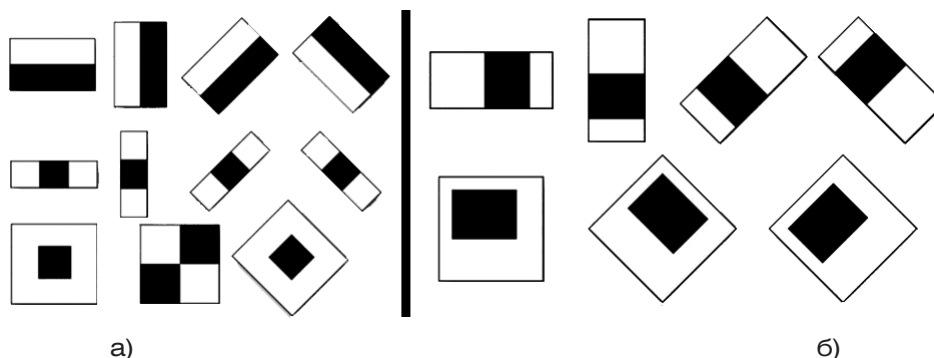


Рисунок 2. Примитивы Хаара (а) и дополнительные признаки (б)



Классификатор, выдающий вердикт «верно» или «неверно», строится с применением бустинга, позволяющего получить наиболее результативный алгоритм обучения. В процессе процедуры бустинга строится такая композиция алгоритмов машинного обучения, при которой каждый следующий алгоритм компенсирует недостатки последовательного использования предыдущих.

Каждая  $i$ -я итерация алгоритма формирует классификатор вида

$$h_i(z) = \begin{cases} 1, & p_i f_i(z) < p_i \zeta_i \\ 0, & p_i f_i(z) \geq p_i \zeta_i \end{cases}$$

где  $p_i$  – направление знака неравенства;  $\zeta_i$  – значение порога;  $f_i(z)$  – вычисленное значение признака;  $z$  – окно изображения размером  $m \times m$  пикселей.

Одна из реализаций алгоритма – функция `cvHaarDetectObjects()` – представлена в открытой библиотеке компьютерного зрения OpenCV.

### Возможности реализации системы стереозрения вычислительными средствами с архитектурой «Эльбрус»

Реализация программных средств системы стереозрения основывается на использовании библиотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library), написанной на языке высокого уровня (C/C++) и включающей множество алгоритмов компьютерного зрения с открытым исходным кодом. При ее портировании на архитектуру «Эльбрус» с использованием функций библиотеки EML были проведены следующие оптимизации:

- Непосредственный вызов соответствующей функции из библиотеки EML.
- Написание фрагментов текста (включая целые алгоритмы), использующих функции EML.

Разработанное программное обеспечение моделирует основные алгоритмы стереопары: калибровку и стереорекопструкцию по паре картинок. Для реализации этих алгоритмов используется модуль `calib3d` библиотеки OpenCV.

В качестве способа калибровки был выбран путь смешанной калибровки. В основе подхода лежит использование простого плоского калибровочного шаблона в виде «шахматной доски». Шаблон снимается каждой камерой в некотором количестве положений, после чего по снимкам оцениваются параметры камеры.

Модель позволяет установить параметры стереопары (расстояние между камерами, поворот) и провести ее калибровку. В программу заложены несколько тестов, которые можно использовать для быстрой проверки работоспособности алгоритмов и оценки времени выполнения. Также можно использовать сторонние изображения, в этом случае программа сама подберет подходящие параметры стереопары. На рис. 3 представлено окно программы с полученной картой смещений для одного из встроенных тестов.

Разработанная программная модель позволила выполнить эксперименты для оценки времени исполнения алгоритмов стереозрения. Результаты тестирования алгоритмов стереорекопструкци и калибровки представлены на рис. 4 и 5 соответственно. При анализе использовалась пара изображений размером  $640 \times 480$  пикселей, поскольку тестовая камера на разрабатываемом роботе имела такое же разрешение. Применительно к отечественным вычислительным комплексам тестирование проводилось на двух различных ВК, оснащенных разными поколениями микропроцессоров «Эльбрус». Первый из них представляет собой четырехпроцессорную систему из микропроцессоров «Эльбрус-4С» с NUMA-доступом к памяти. Каждый

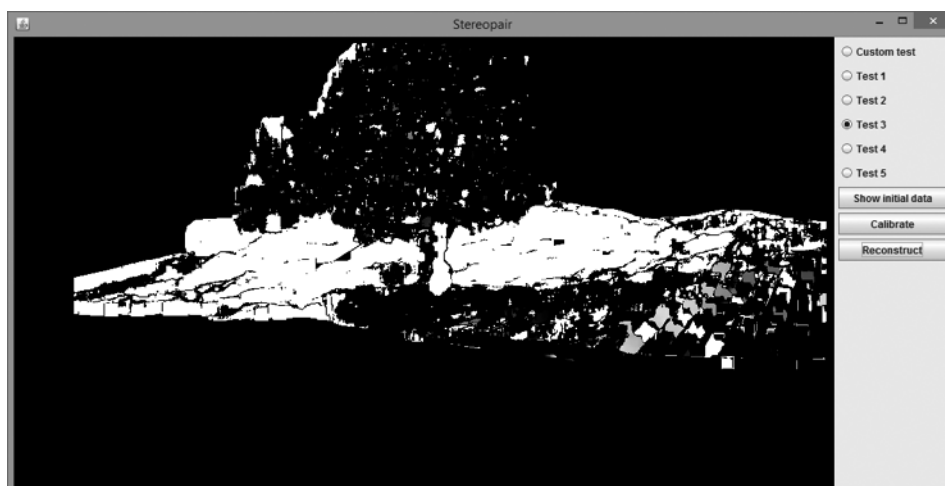


Рисунок 3. Результат трехмерной реконструкции для встроенного теста

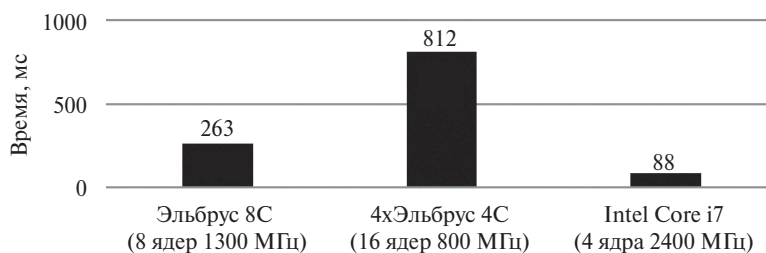


Рисунок 4. Затраты времени на стереорекострукцию по стереопаре

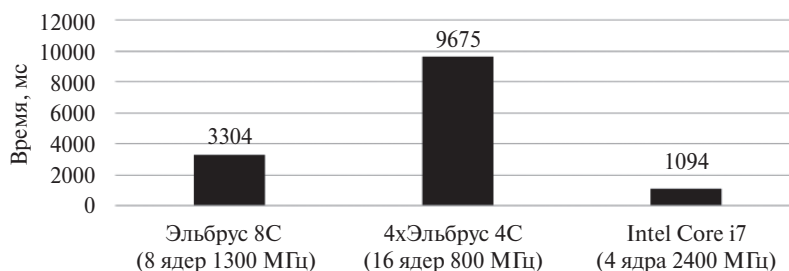


Рисунок 5. Затраты времени на калибровку стереопары

процессор имеет четыре ядра с тактовой частотой 800 МГц. Второй ВК («Эльбрус-801») содержит один восьмиядерный процессор «Эльбрус-8С» с тактовой частотой 1300 МГц. Для сравнения с результатами, которые могут быть получены на базе импортных вычислительных средств, был проведен эксперимент с использованием процессора Intel Core-i74700, который может работать с семьью потоками одновременно, как и процессор «Эльбрус-8С».

В работе над РТК на ВК «Эльбрус» планируется, что скорость робота будет достигать 40 км/ч, или 11 м/с. Система стереозрения обнаруживает препятствия на дистанциях от 10 до 30 м, таким образом, у робота будет от 1 до 3 с на обнаружение препятствия на стереофото, обновление маршрута и объезд. Как видно из полученных результатов, несмотря на существенно бóльшую тактовую

частоту импортного образца, вычислительные средства на базе микропроцессоров «Эльбрус-4С» и «Эльбрус-8С» вполне удовлетворяют поставленным условиям.

В АО «МЦСТ» были созданы компьютерные модули на базе микропроцессоров «Эльбрус-4С» и разрабатываются модули на базе «Эльбрус-8С», которые полностью подходят для применения в РТК.

### Заключение

В статье показано, что вычислительные средства на основе микропроцессора «Эльбрус-8С» могут удовлетворять требованиям, предъявляемым РТК в работе с системами стереозрения. Использование отечественных вычислительных средств и сертифицированного ПО «Эльбрус» позволяет говорить о перспективах решения задач импортозамещения в области робототехники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Сапачев И. Д. Реализация алгоритмов группового управления на языке в среде ОС «Эльбрус» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. № 1. С. 108–115.
2. Бычков И. Н., Молчанов И. А., Рябцев Ю. С. Развитие конструкций многопроцессорных систем // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 22–29.
3. Микроархитектура восьмиядерного универсального микропроцессора «Эльбрус-8С» / Д. М. Альфонсо, Р. В. Деменко, А. С. Кожин, Е. С. Кожин, Р. Е. Колычев, В. О. Костенко, Н. Ю. Поляков, Е. В. Смирнова, Д. А. Смирнов, П. А. Смольянов, В. В. Тихорский // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 3. С. 6–13.
4. Жук Д. В., Тузиков А. В. Реконструкция трехмерной модели по двум цифровым изображениям // Информатика. 2006. № 1. С. 16–26.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бочаров Никита Алексеевич**, инженер-программист 1-й категории, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (916) 734-64-37, e-mail: bocharov.na@phystech.edu.

**Парамонов Николай Борисович**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (499) 135-44-61, e-mail: paramonov\_n\_b@rambler.ru.

**Славин Олег Анатольевич**, д.т.н., зав. лабораторией, ИСА ФИЦ «Информатика и управление» РАН, 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 9, тел.: 8 (916) 135-33-02, e-mail: oslavin@isa.ru.

**Янко Денис Викторович**, начальник группы, 432 ВП МО, тел.: 8 (495) 363-96-65, e-mail: janko\_d@ineum.ru.

*For citation: Bocharov N. A., Paramonov N. B., Slavin O. A., Yanko D. V. Assessment of perspectives of exploitation of computer systems Elbrus for implementing recognition algorithms in modern robotic complexes. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 2, pp. 99–105.*

**N. A. Bocharov, N. B. Paramonov, O. A. Slavin, D. V. Yanko**

## ASSESSMENT OF PERSPECTIVES OF EXPLOITATION OF COMPUTER SYSTEMS ELBRUS FOR IMPLEMENTING RECOGNITION ALGORITHMS IN MODERN ROBOTIC COMPLEXES

One of the main part in development of the modern autonomous robotic complexes is creation of the intelligent control system. A significant but unresolved issue is equipping such systems by computing hardware, developed on the basis of domestic microprocessors and software, developed by domestic companies. The purpose of this work is researching the applicability of computer systems based on multicore Elbrus microprocessors in such intelligent systems. The authors have researched algorithms of the recognition and stereovision and have developed software that simulate these algorithms with the features of microprocessors Elbrus. The temporal characteristics for stereo reconstruction and calibration algorithms were obtained. Obtained results display possibility of using computer systems of Elbrus series as computer for robots control and monitoring tasks.

**Keywords:** recognition algorithms, multicore computing systems, Elbrus microprocessors, modeling.

## REFERENCES

1. Bocharov N. A., Paramonov N. B., Sapachev I. D. Implementation of algorithms of group control on Java language in the OS Elbrus environment. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*, 2016, no. 1, pp. 108–114 (In Russian).
2. Bychkov I. N., Molchanov I. A., Ryabtsev Y. S. Development of designs for multi processor systems. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 3, pp. 22–29 (In Russian).
3. Alfonso D., Demenko R., Kozhin A., Kozhin E., Kolychev R., Kostenko V., Polyakov N., Smirnova E., Smirnov D., Smolyanov P., Tikhorskiy V. Eight-core Elbrus-8C processor microarchitecture. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 3, pp. 6–13 (In Russian).
4. Zhuk D. V., Tuzikov A. V. Reconstruction of 3D models for two digital images. *Informatika*, 2006, no. 1, pp. 16–26 (In Russian).

## AUTHORS

**Bocharov Nikita**, engineer-programmer 1st category, JSC MCST, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: +7 (916) 734-64-37, e-mail: bocharov.na@phystech.edu.

**Paramonov Nikolay**, Dr., professor, chief researcher, PJSC Brook INEUM, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: +7 (499) 135-44-61, e-mail: paramonov\_n\_b@rambler.ru.

**Slavin Oleg**, Dr., head of Laboratory, ISA FRC Computer Science and Control RAS, 9, prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russian Federation, tel.: +7 (916) 135-33-02, e-mail: oslavin@isa.ru.

**Yanko Denis**, head of group, 432 VP MO, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (495) 363-96-65, e-mail: janko\_d@ineum.ru.