

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ АРХИТЕКТУРА
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНОЙ КИСТЬЮ РОБОТА**Д. В. ИВОЛГА¹, Е. Э. ХОМУТОВ¹, И. И. БОРИСОВ^{1*},
Н. А. МОЛЧАНОВ², И. А. МАКСИМОВ², С. А. С. КОЛЮБИН¹¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*borisovii@itmo.ru²Сбербанк, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты разработки и реализации программно-аппаратной архитектуры системы управления для адаптивной антропоморфной роботизированной кисти. Рассматривается возможность интеграции разработанного захватного устройства в контур управления робота iCub с сохранением функциональных возможностей и гибкости реализации алгоритмов управления. Это достигается посредством прототипирования системы управления как самостоятельного модуля, подключаемого к роботу iCub через сетевой интерфейс Ethernet. Обмен данными между захватным устройством и роботом iCub имеет высокую стабильность и производительность с частотой управления 2 кГц при задержке не более 310 мкс и джиттере ниже 50 мкс. Тестирование программно-аппаратной архитектуры системы управления продемонстрировало высокую точность управления положением ($\pm 1^\circ$) и тактильным усилием ($\pm 0,15$ Н) проксимальных фаланг пальцев.

Ключевые слова: антропоморфные хватные устройства, система управления, аппаратное обеспечение, программный интерфейс

Ссылка для цитирования: Иволга Д. В., Хомутов Е. Э., Борисов И. И., Молчанов Н. А., Максимов И. А., Колюбин С. А. Программно-аппаратная архитектура системы управления антропоморфной кистью робота // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 3. С. 164—173. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-164-173.

**HARDWARE AND SOFTWARE ARCHITECTURE
FOR ANTHROPOMORPHIC ROBOT HAND CONTROL SYSTEM**D. V. Ivolga¹, E. E. Khomutov¹, I. I. Borisov^{1*},
N. A. Molchanov², I. A. Maksimov², S. A. Kolyubin¹¹ITMO University, St. Petersburg, Russia
*borisovii@itmo.ru²Sberbank, Moscow, Russia

Abstract. The results of the development and implementation of hardware and software architecture for the control system of an adaptive anthropomorphic robotic hand are presented. The research focuses on possibility of integrating the proposed robotic hand into the iCub robot's control system while preserving the functionality and flexibility of implementing control algorithms. It has been achieved by prototyping the control system as an independent module connected to the iCub robot via network interface Ethernet. The data exchange between the gripper and the iCub robot has high stability and performance with a control frequency of 2 kHz with a delay less than 310 us and a jitter below 50 us. Testing of the control system's software and hardware architecture demonstrated high accuracy in position control ($\pm 1^\circ$) and force control ($\pm 0,15$ N) for fingers' proximal phalanges.

Keywords: anthropomorphic grippers, control system, hardware, choice of element base, sensors, software interface

For citation: Ivolga D. V., Khomutov E. E., Borisov I. I., Molchanov N. A., Maksimov I. A., Kolyubin S. A. Hardware and software architecture for anthropomorphic robot hand control system. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 3. P. 164—173 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-3-164-173.

Введение. В настоящее время актуальны исследования по воссозданию сенсорных и моторных функций человеческой руки, способной манипулировать объектами произвольной

формы. Кисть имеет не только функциональное назначение, но и социальную значимость при выражении эмоций, рукопожатии, приветствии и т.д. Более того, развитию области способствует идея о том, что восприятие — это активный процесс, в котором роботу необходимо взаимодействовать с окружающими объектами для получения более точной информации [1—3]. В подобном контексте разработка сложных и оснащенных различными датчиками роботизированных рук имеет фундаментальное значение.

Одной из наиболее современных и функциональных робототехнических платформ для научных исследований в области манипуляции и локомоции, человеко-машинного взаимодействия и т. п. является гуманоидный робот iCub, разрабатываемый консорциумом The RobotCub Project [4]. Кисть робота iCub (рисунок 1, а, б) имеет пятипалую антропоморфную конструкцию, способную совершать множество жестов, однако для этого требуются 9 электроприводов и система управления для скоординированного движения, что влечет за собой увеличение габаритов, массы и стоимости устройства. Фаланги робота приводятся в движение системой блоков и тросов. Подобное решение позволяет разместить приводы в кисти и предплечье для сохранения габаритов руки, но в то же время не позволяет достичь высокой точности позиционирования и грузоподъемности из-за растяжения и риска обрыва тросов. Независимое управление проксимальными и дистальными фалангами пальцев кисти iCub обуславливает возможность ее адаптации к объектам произвольной формы, но не позволяет надежно захватывать объекты малого размера точным щипковым схватом.

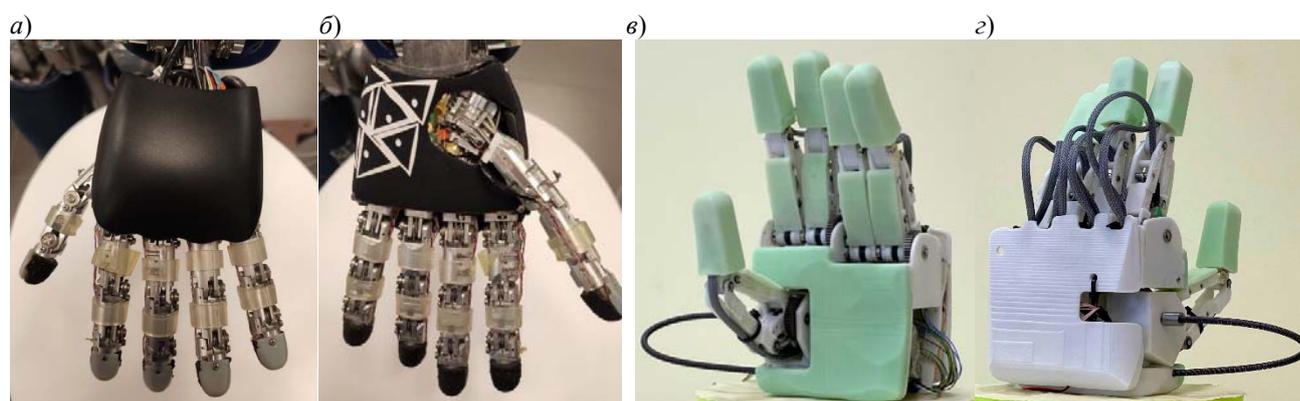


Рис. 1

Для решения указанных проблем была разработана новая конструкция пятипалого адаптивного антропоморфного захватного устройства (рис. 1, в, г). Отличительная особенность кисти — синтезированные неполноприводные механизмы пальцев со звеньями *переменной длины*, благодаря которым устройство способно совершать адаптивные силовые и точные щипковые захваты объектов разных размеров и произвольной формы и массы [5—7].

Захватное устройство оснащено пятью активными пальцами, но требует только четыре двигателя для управления всеми 14 степенями свободы. Первый мотор-редуктор используется для приведения в действие указательного и среднего пальцев; второй — для приведения в действие безымянного пальца и мизинца. Механизм большого пальца оснащен двумя приводами: первый для сгибания, а второй для переориентации относительно ладони, что позволяет добиться множества жестов. Механизмы указательного, среднего, безымянного пальцев и мизинца прикреплены к общим валам. Все пальцы соединены с входным валом через вращательный гибкий элемент, что предотвращает от заклинивания при контакте с объектом. Рабочие поверхности фаланг и ладони покрыты силиконом с высоким коэффициентом трения для предотвращения выскальзывания.

К аппаратной и программной частям системы управления новым захватным устройством сформулированы следующие требования:

- возможность определения углового положения звеньев в диапазоне до 110° ;

- датчик тактильного усилия должен обладать миниатюрными размерами (не более 10×15×10 мм) и измерять тактильное усилие в диапазоне от 0 до 10 Н с точностью не менее 0,2 Н;
- скорость выполнения захвата должна составлять 48,7 °/с;
- необходимый постоянный крутящий момент на входном валу пальцев — не менее 1,7 мН·м;
- диаметр мотор-редуктора не должен превышать 13 мм, а суммарная длина — 35 мм;
- возможность интеграции в программно-аппаратную архитектуру робота iCub.

Основные функциональные части захватного устройства. Новый адаптивный антропоморфный захват разработан специально для установки на iCub, поэтому изменения в архитектуре робота должны быть минимальны, чтобы обеспечить простоту интеграции. Система управления захватным устройством должна обеспечивать возможность коммуникации с бортовым компьютером робота через имеющиеся сетевые интерфейсы. На основе работы [4] и конструкторской документации робототехнической платформы [8, 9] были определены элементы системы управления новым адаптивным схватом, структурная схема которой представлена на рис. 2.

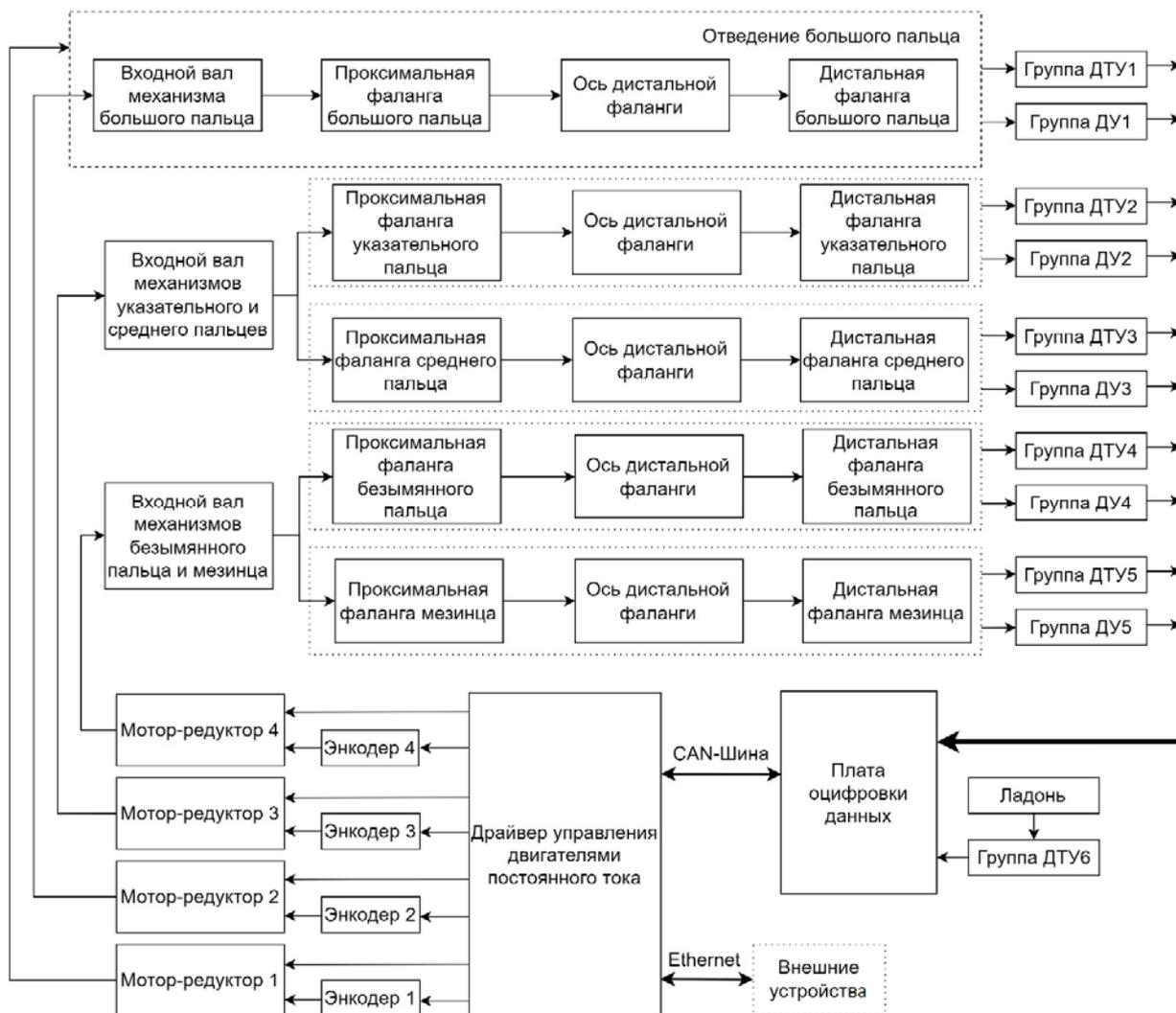


Рис. 2

Основным элементом системы является плата управления мотор-редукторами пальцев захвата. Информация с датчиков кисти передается на плату управления мотор-редукторами через CAN-шину. Драйвер мотор-редукторов соединен с бортовым компьютером робота че-

рез Ethernet. Вращение двигателя постоянного тока передается через зубчатые механизмы на входные звенья рычажных механизмов пальцев. Мотор-редуктор 1 приводит в движение механизм отведения и сведения большого пальца, мотор-редуктор 2 — проксимальную и дистальную фаланги большого пальца, мотор-редуктор 3 — указательный и средний пальцы, мотор-редуктор 4 — безымянный палец и мизинец. Мотор-редукторы 2, 3 и 4 приводят в движение входные звенья пальцев, далее механизмы замкнутой кинематики со звеньями переменной длины преобразовывают движение входных звеньев, жестко соединенных с валами двигателя, в выходное движение проксимальных и дистальных фаланг. Для определения положения фаланг используются датчики углового положения (ДУ), которые установлены на проксимальных и дистальных фалангах. Под рабочими поверхностями дистальных и проксимальных фаланг, а также на ладони установлены датчики тактильного усилия (ДТУ) для определения силы взаимодействия с объектом.

Система управления может работать в двух режимах: а) управление по положению на основе данных о состоянии проксимальных фаланг; б) управление по силе взаимодействия на основе данных о состоянии проксимальных и дистальных фаланг. При контакте с поверхностью объекта манипулирования скорость движения пальцев уменьшается пропорционально развиваемой силе взаимодействия и производится фиксация предмета с необходимым усилием. Если при управлении по силе взаимодействия пальцы не соприкасаются с объектом, то механизмы останавливаются в конечном положении [9].

Датчики углового положения фаланг. Всего в кисти необходимо расположить 11 датчиков углового положения, измеряющих углы между проксимальной фалангой и ладонью, дистальной и проксимальной фалангами, а также угол отведения большого пальца относительно ладони. При этом положения фаланг должны измеряться при максимальном угле раскрытия в 110° .

Для данных целей было предложено использовать миниатюрные датчики Холла SS495A, преимуществом которых является бесконтактное измерение углового положения; кроме того, такие датчики не усложняют конструкцию, не вносят дополнительные силы сопротивления при движении фаланг и не приводят к существенному увеличению веса.

Датчик оснащен аналоговым выходом по напряжению, значение которого пропорционально магнитной индукции, наводимой внешним магнитом. Значение магнитной индукции зависит от геометрических параметров и расположения магнита. Для определения этих параметров было проведено моделирование в программном пакете EMWorks для SolidWorks [10]. Для новой конструкции адаптивного схвата выбран кольцевой диаметрально поляризованный магнит. Материал магнита N4212, внешний диаметр — 8 мм, внутренний диаметр — 3 мм, высота — 2 мм.

На основе модели магнита и силы магнитной индукции была выбрана область, которая обеспечивает необходимую для датчика SS495A магнитную индукцию в пределах от $-0,067$ до $+0,067$ Тл. Как наиболее подходящая и конструктивно реализуемая, выбрана область прямого прилегания датчика к краю магнита на расстоянии 4,2 мм. Схема расположения датчика и магнита в фаланге представлена на рис. 3, а.

Датчики тактильного усилия. При адаптивном манипулировании объектами произвольной формы местоположение и сила контакта не могут быть заранее полностью предсказаны, поэтому для обеспечения надежного захвата и удержания объекта захватное устройство оснащено датчиками тактильного взаимодействия. Количество и наилучшее расположение точек измерений было определено по результатам имитационного моделирования адаптивного схвата в программной среде MatLab Simscape Multibody. На рабочей поверхности захвата расположено 30 точек измерения тактильного усилия: по 2 на каждой проксимальной фаланге, 3 на дистальной фаланге (2 на подушечке пальца, 1 на кончике) и 5 точек контакта на ладони. Соответственно, датчик должен иметь малые габариты для встраивания в фаланги

пальцев и ладонь. Схват спроектирован для взаимодействия с предметами, окружающими человека в быту, масса подавляющего большинства которых составляет до 1 кг, т.е. для их захвата и удержания необходимо развивать силу не менее 10 Н.

Согласно данным требованиям был выбран тензорезистивный датчик силы HSFPAR003A, имеющий широкое распространение, точность измерения до 0,01 Н, большой цикл повторения до 10^6 нажатий.

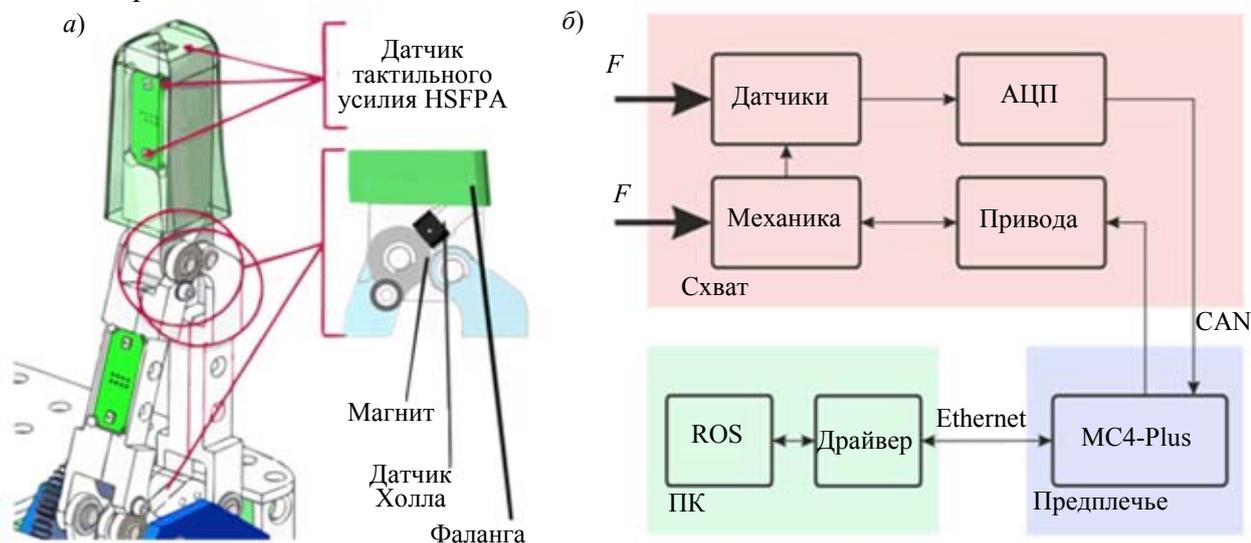


Рис. 3

Датчик тактильного усилия (см. рис. 3, а) устанавливается на печатной плате, жестко закрепленной на фаланге. Поверх датчика устанавливается железная пластинка толщиной 0,2 мм, через которую передается усилие на чувствительный элемент датчика. Для расширения диапазона измерений был применен метод, основанный на покрытии тензорезистивного моста слоем упругого материала, например силикона [11]. Необходимая толщина слоя для конкретного материала определяется с учетом его упругих свойств либо экспериментальным путем в ходе калибровочной процедуры. Для конструкции был выбран слой покрытия датчика в 3 мм, так как при этом сохраняются миниатюрные габариты сенсора, а диапазон измерений увеличивается до 12 Н.

Плата управления приводами. В оригинальной конструкции iCub для управления приводами применяется драйвер MC4-Plus на базе микроконтроллера STM32F407VGT6. Данная плата поддерживает подключение до четырех коллекторных двигателей с напряжением питания 12 В и потребляемым током 1 А (пиковая токовая нагрузка 2 А). Для управления приводами используются абсолютные и инкрементальные энкодеры, а также на плате расположен токовый резистивный сенсор. Интерфейс взаимодействия драйвера с бортовым компьютером робота — Ethernet и CAN-шина. Плата имеет сравнительно малые габариты 80×30×11 мм и массу 35 г. Данное решение — наиболее подходящее для системы управления адаптивным захватом, так как плата является оригинальным компонентом от iCub, а также имеется возможность подключения четырех моторов и изменения прошивки микроконтроллера [12].

Приводы. Выбор мотор-редуктора для данной конструкции схвата имеет ряд ограничений по мощностным и габаритным характеристикам, которые обусловлены конструкцией адаптивного схвата [5]. Захват объекта осуществляется с усилием 10 Н, при этом скорость движения должна быть сопоставима с нормальной скоростью движения пальцев человека, а именно 48,7 °/с [8]. Исходя из требований и параметров оригинального драйвера MC4-Plus, был выбран коллекторный мотор-редуктор FAULHABER 1224 в совокупности с редуктором FAULHABER 12/4 64:1. Данная связка мотор-редуктора дополняется редуктором и зубчатой передачей для более компактного размещения внутри кисти и увеличения крутящего момента до 1,7 мН·м.

Плата оцифровки показаний датчиков. Так как в конструкции новой антропоморфной кисти используются 11 аналоговых датчиков углового положения и 30 аналоговых датчиков тактильного усилия с дифференциальным выходом, необходимое количество каналов для оцифровки данных составляет 71. Для обработки сигналов сенсоров руки и передачи показаний в плату управления мотор-редукторами была спроектирована оригинальная плата с малыми размерами (45×50 мм) для размещения внутри ладони схвата [13].

Датчик тактильного усилия обладает малой чувствительностью (3,7 мВ/В/Н), следовательно, для обработки сигнала необходимо его усиление и оцифровка с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для упрощения разводки печатной платы и сохранения малых габаритов выбран многоканальный быстродействующий АЦП ADS1261 с программируемым коэффициентом усиления. АЦП имеет цифровой интерфейс взаимодействия SPI с разрешением в 24 бита. Выбранная микросхема позволит обрабатывать группу сигналов сенсоров с частотой дискретизации 3 кГц.

Датчик углового положения обладает внутренним усилителем и пассивным фильтром, следовательно, для обработки сигнала достаточно любого современного микроконтроллера со встроенным АЦП.

Микроконтроллер STM32F415RGT6, выбранный для управления АЦП и коммуникации с платой управления двигателями, имеет высокую частоту работы, малые размеры и набор необходимых аппаратных средств. Подключение к модулю оцифровки сигнала с датчиков осуществляется по CAN-шине.

Архитектура программной части системы управления. Общий вид системы управления антропоморфным адаптивным схватом представлен на рис. 3, б. Главным компонентом системы является плата управления двигателями MC4-Plus. Соединение MC4-Plus с ПК или бортовым компьютером робота производится посредством Ethernet. Коммуникация с платой оцифровки измерений сенсоров осуществляется через CAN. Драйвер управления мотор-редукторами является клиентом, а ПК или бортовой компьютер с установленным программным обеспечением — сервером [4, 14].

Взаимодействие iCub со схватом осуществляется через систему ROS (Robot Operating System), которая организует канал приема-передачи информации и команд управления на драйвер схвата. Пользователь посредством программного интерфейса имеет возможность выбора режима работы схвата, задания целевого положения и силы удержания, независимого управления вращением мотор-редукторов, настройки параметров управления рукой, оцифровки и фильтрации сенсоров, а также возможность получения контрольно-измерительной информации о конфигурации руки и силовом контакте.

В режиме позиционирования проксимальных фаланг контур управления состоит из двухкаскадного регулятора: по положению и по току. На рис. 4 представлена схема контура управления для мотор-редуктора, который приводит в движение указательный и средний пальцы. Применение такого регулятора позволяет получить привод с постоянным крутящим моментом и переменным положением [15]:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= p^* - p; \\ u_1 &= k_{11}e_1 + k_{12} \frac{de_1}{dt}; \\ e_2 &= u_1 - i; \\ u_2 &= k_{21}e_2 + k_{22} \frac{de_2}{dt} + k_{23} \int e_2 dt, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где e_1 — ошибка по положению, e_2 — ошибка по току, u_1 — сигнал управления по току, u_2 — сигнал управления по напряжению, k_i — коэффициенты регуляторов, p^* и p — требуемое и реальное сочленения соответственно, i — реальное значение силы тока.

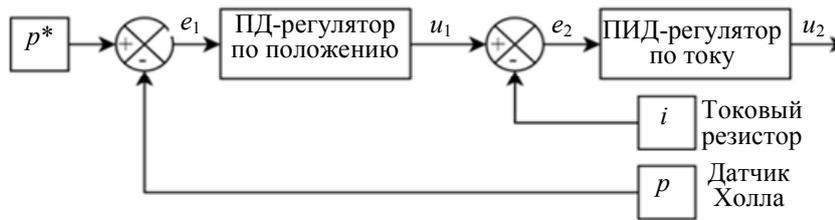


Рис. 4

Работа контура управления положением для проксимальной фаланги указательного пальца продемонстрирована на рис. 5. Целевое положение (q) составляет 40° . График показывает точность работы системы регулирования и среднюю скорость движения, равную $49^\circ/\text{с}$.

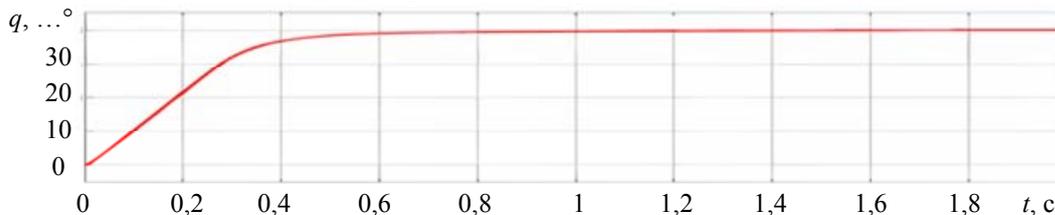


Рис. 5

В режиме силового захвата контур управления тактильным усилением на дистальной фаланге (рис. 6) состоит из двух частей: регулятора скорости и двухкаскадного регулятора по усилию и току:

$$\left. \begin{aligned} e_3 &= w^* + w; \\ u_3 &= k_{31}e_3 + k_{32} \frac{de_3}{dt}, \text{ если } F = 0; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} e_4 &= F^* + F; \\ u_4 &= k_{41}e_4 + k_{42} \frac{de_4}{dt} + k_{43} \int e_4 dt; \\ e_5 &= u_4 + i; \\ u_5 &= k_{51}e_5 + k_{52} \frac{de_5}{dt} + k_{53} \int e_5 dt, \text{ если } F > 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где w^* и w — требуемая и реальная скорость вращения мотор-редуктора соответственно, e_3 — ошибка по скорости, e_4 — ошибка по силе, e_5 — ошибка по току, u_3 и u_5 — сигнал управления напряжением на мотор-редукторе, u_4 — сигнал управления по току, F^* — требуемая сила контактного взаимодействия дистальной фаланги, F — текущая сила взаимодействия тактильного датчика силы и дистальной фаланги.

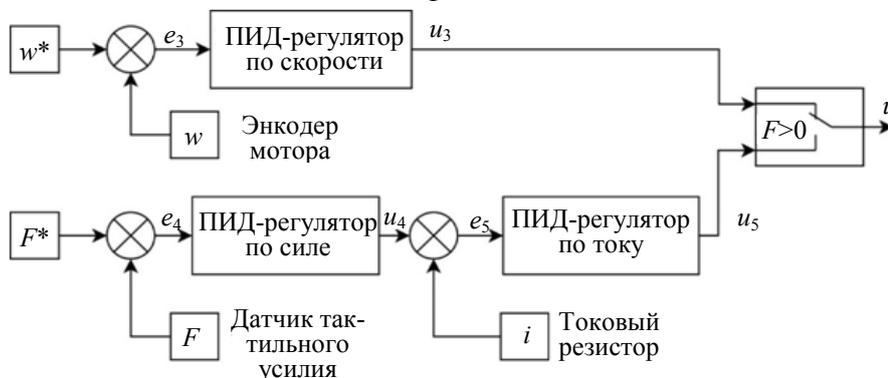


Рис. 6

Тактильное усилие для пальцев, приводимых в движение одним мотор-редуктором, рассчитывается как сумма усилий, приложенных к дистальным фалангам:

$$F = F' + F'',$$

где F' и F'' — усилие приложенное к указательному и среднему пальцам соответственно.

Первый регулятор (2) задействован во время сгибания пальца до соприкосновения с объектом. После соприкосновения силовой захват выполняется с помощью двухкаскадного регулятора (3). Если в процессе движения захват не соприкасается с объектом, то происходит его остановка в крайних положениях [16]. Работа контура управления при захвате статического объекта продемонстрирована на рис. 7. Целевое усилие для дистальных фаланг пальцев соответствует следующим значениям: большой палец — 3,1 Н, указательный и средний пальцы — 1,5 Н, безымянный палец и мизинец — 2 Н.

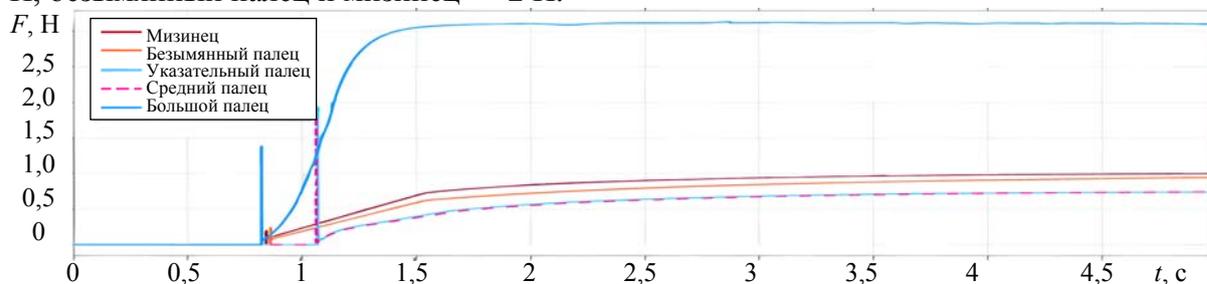


Рис. 7

Заключение. Представлена разработанная программно-аппаратная архитектура системы управления новым адаптивным антропоморфным схватом для iCub. Приведено описание аппаратной части системы управления схватом, в состав которой входят: плата управления двигателями MC4-Plus, мотор-редукторы FAULHABER, датчик углового положения SS495A в сочетании с кольцевым магнитом, датчик тактильного усилия HSFAR003A с расширенным диапазоном измерения до 1,2 кг и чувствительностью 3,7 мВ/В/Н, разработанная плата оцифровки сигналов с сенсоров кисти.

Испытание системы проводилось на прототипе адаптивного схвата (рис. 8). Результаты лабораторных испытаний показали работоспособность применяемых решений и соблюдение сформулированных технических требований. Тестирование системы управления продемонстрировало высокую точность в $\pm 1^\circ$ в режиме позиционирования проксимальных фаланг пальцев и удержание предметов с тактильным усилием $\pm 0,15$ Н. Интерфейс имеет стабильность и высокую производительность с частотой управления 2 кГц при задержке менее 310 мкс и джиттере ниже 50 мкс.

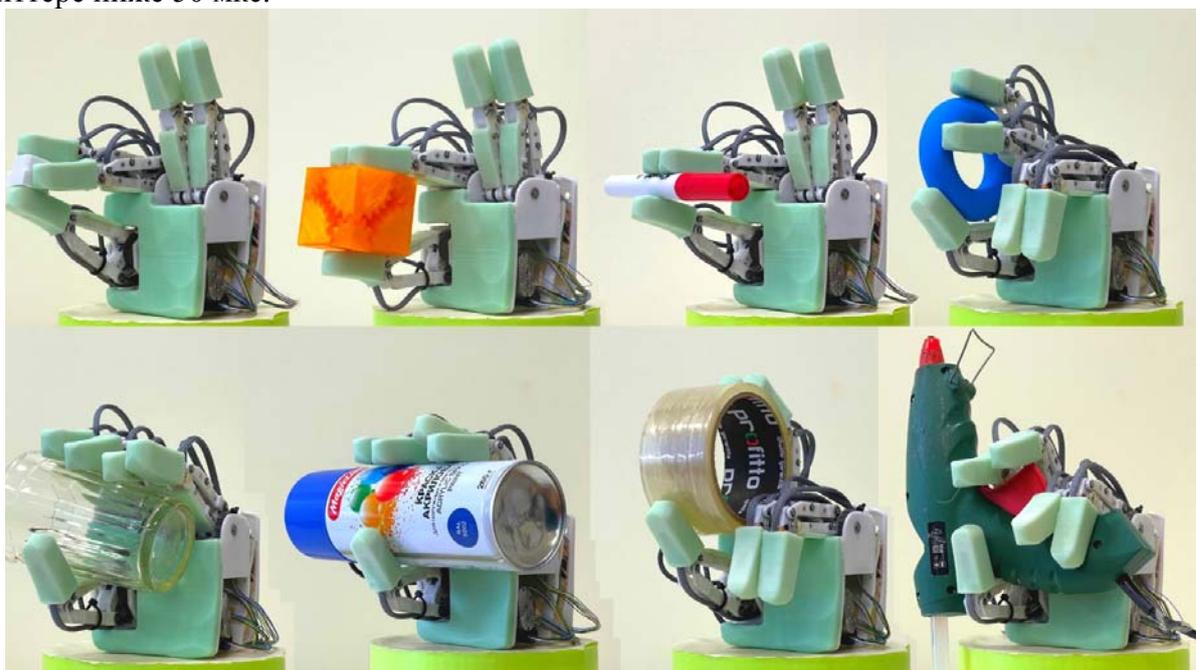


Рис. 8

Дальнейшие исследования будут сосредоточены на интеграции схвата в робототехническую платформу iCub и проведении натуральных испытаний по захвату объектов произвольной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piazza C. et al. A Century of Robotic Hands // Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. 2019. Vol. 2. P. 1—32. DOI: 2. 1-32. 10.1146/annurev-control-060117-105003.
2. Simpkins C. Mechanisms and Machine Science: Grasping in Robotic System // Robotics & Automation Magazine, IEEE. 2013. Vol. 20. P. 94—94. DOI: 10.1109/MRA.2012.2236252.
3. Metta G., Fitzpatrick P. Better vision through manipulation // Adaptive Behavior. 2003. Vol. 11, N 2. P. 109—128. DOI: 10.1177/10597123030112004.
4. Parmiggiani A., Maggiali M., Natale L. et al. The Design of the iCub Humanoid Robot // Intern. Journal of Humanoid Robotics. 2012. Vol. 9, N 4. DOI: 10.1142/S0219843612500272.
5. Borisov I. I., Khomutov E. E., Kolyubin S. A., Stramigioli S. Computational design of reconfigurable underactuated linkages for adaptive grippers // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2021.
6. Müller V. C., Hoffmann M. What is morphological computation? On how the body contributes to cognition and control // Artificial Life. 2017. Vol. 23, N 1. P. 1—24.
7. Борисов И. И., Защитин П. А., Борисова О. В., Колюбин С. А. Алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов адаптивных захватных устройств со звеньями переменной длины // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 467—475. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-467-475.
8. Jamali N. et al. A new design of a fingertip for the iCub hand // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353747.
9. Schmitz A. et al. Design, realization and sensorization of the dexterous iCub hand // Proc. of the 10th IEEE-RAS Intern. Conf. on Humanoid Robots. IEEE, 2011. P. 186—191. DOI: 10.1109/ICHR.2010.5686825.
10. Sönmez Ö. Numerical Analysis of an Electromagnetic Plunger // European Journal of Science and Technology. 2020. P. 170—175. DOI: 10.31590/ejsat.803129.
11. Tenzer Y., Jentoft L., Howe R. The feel of mems barometers: Inexpensive and easily customized tactile array sensors // Robotics Automation Magazine, IEEE. 2014. Vol. 21. P. 89—95. DOI: 10.1109/MRA.2014.2310152.
12. Casalino G., Giorgi F. et al. Embedded FPGA-based control of a multifingered robotic hand // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. 2003. N 3. DOI: 10.1109/robot.2003.1242014.
13. Zeng J., Yi P. et al. MESO-ADC: The ADC design using MESO device // Microelectronics Journal. 2021. P. 116. DOI: 10.1016/j.mejo.2021.105235.
14. Lee Y. K. Design of exoskeleton robotic hand/arm system for upper limbs rehabilitation considering mobility and portability // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2014. DOI: 10.1109/URAI.2014.7057385.
15. Liu H., Wu K. et al. A dexterous humanoid five-fingered robotic hand // Proc. of the 17th IEEE Intern. Symp. on Robot and Human Interactive Communication. 2018. DOI: 10.1109/roman.2008.4600694.
16. Sartori E., Fiorini P., Muradore R. Cutaneous feedback in teleoperated robotic hands // 42nd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2016. DOI: 10.1109/iecon.2016.7792990.

Сведения об авторах

- Дмитрий Викторович Иволга** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Евгений Эдуардович Хомутов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; E-mail: e.khomutov@itmo.ru
- Иван Игоревич Борисов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; научный сотрудник; E-mail: borisovii@itmo.ru

- Никита Алексеевич Молчанов** — ПАО „Сбербанк“, лаборатория робототехники; ст. инженер-разработчик; E-mail: molchanov.n.al@sberbank.ru
- Иван Алексеевич Максимов** — ПАО „Сбербанк“, лаборатория робототехники; ст. инженер-разработчик; E-mail: maksimov.i.a@sberbank.ru
- Сергей Алексеевич Колубин** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, лаборатория биомехатроники и энергоэффективной робототехники; вед. научный сотрудник; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Поступила в редакцию 28.12.21; одобрена после рецензирования 12.01.22; принята к публикации 18.01.22.

REFERENCES

1. Piazza C. et al. *A Century of Robotic Hands. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2019, vol. 2, pp. 1–32, DOI: 2. 1-32. 10.1146/annurev-control-060117-105003.
2. Simpkins C. *Robotics & Automation Magazine*, 2013, vol. 20, pp. 94–94, DOI: 10.1109/MRA.2012.2236252.
3. Metta G. and Fitzpatrick P. *Adaptive Behavior*, 2003, no. 2(11), pp. 109–128, DOI: 10.1177/10597123030112004.
4. Parmiggiani A. et al. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2012, no. 4(9), pp. 9, DOI: 10.1142/S0219843612500272.
5. Borisov I.I., Khomutov E.E., Kolyubin S.A., and Stramigioli S. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021, pp. 6117–6123.
6. Müller V.C., Hoffmann M. *Artificial Life*, 2017, no. 1(23), pp. 1–24.
7. Borisov I.I., Zashchitin R.A., Borisova O.V., Kolyubin S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 5(63), pp. 467–475, DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-467-475. (in Russ.)
8. Jamali N. et al. *A new design of a fingertip for the iCub hand*, 2015, DOI:10.1109/IROS.2015.7353747.
9. Schmitz A. et al. *10th IEEE-RAS International Conference of Humanoid Robots*, 2011, pp. 186–191, DOI: 10.1109/ICHR.2010.5686825.
10. Sönmez Ö. *European Journal of Science and Technology*, 2020, pp. 170–175, DOI: 10.31590/ejosat.803129.
11. Tenzer Y., Jentoft L., and Howe R. *Robotics Automation Magazine*, IEEE, 2014, vol. 21, pp. 89–95, DOI: 10.1109/MRA.2014.2310152.
12. Casalino G., Giorgi F. et al. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, no. 03, DOI:10.1109/robot.2003.1242014.
13. Zeng J., Yi P. et al. *Microelectronics Journal*, 2021, pp. 116, DOI: 10.1016/j.mejo.2021.105235.
14. Lee Y. et al. *11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*. 2014. DOI: 10.1109/URAI.2014.7057385.
15. Liu H., Wu K. et al. *17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2018, DOI:10.1109/roman.2008.4600694.
16. Sartori E., Fiorini P., Muradore R. *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON*, 2016, DOI:10.1109/iecon.2016.7792990.

Data on authors

- Dmitry V. Ivolga** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; E-mail: ivolga.dv@itmo.ru
- Evgeny E. Khomutov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; E-mail: e.khomutov@itmo.ru
- Ivan I. Borisov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Researcher; E-mail: borisovii@itmo.ru
- Nikita A. Molchanov** — Sberbank, Robotics Laboratory; Senior Engineer-Designer; E-mail: molchanov.n.al@sberbank.ru
- Ivan A. Maksimov** — Sberbank, Robotics Laboratory; Senior Engineer-Designer; E-mail: maksimov.i.a@sberbank.ru
- Sergey A. Kolyubin** — Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics, International Laboratory of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics; Leading Researcher; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru

Received 28.12.21; approved after reviewing 12.01.22; accepted for publication 18.01.22.