

С. А. ПЛОТНИКОВ, Д. М. СЕМЕНОВ, М. ЛИПКОВИЧ, А. Л. ФРАДКОВ
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА ОСНОВЕ НЕЙРООБРАТНОЙ СВЯЗИ

В данной работе представлено описание программно-аппаратного комплекса НС-1, расположенного в ИПМаш РАН, для исследования систем гибридного интеллекта на основе нейрообратной связи. Описывается как аппаратная часть комплекса, так и основные блоки программ, разработанных в ИПМаш РАН.

Введение. В начале 21 века начала активно развиваться сфера коллаборативной робототехники. Коллаборативный робот или кобот – автоматическое устройство, выполняющее различные задачи совместно с человеком, например, производство какой-либо продукции. Широко распространенные ранее промышленные роботы запрограммированы выполнять различные операции без человека. Они могут угрожать здоровью и жизни человека, поэтому они устанавливаются в специальных местах, чтобы не подвергать опасности людей. Коботы, в свою очередь, работают с человеком, поэтому они оснащены датчиками, контролирующими положение человека. Актуальной задачей является обеспечение продуктивного и безопасного взаимодействия между человеком и машиной для решения ряда задач. Таким образом, возникает понятие гибридного интеллекта, т. е. интеллекта, объединяющего возможности интеллекта естественного (человека) и искусственного (машины). Для обеспечения взаимодействия двух типов интеллекта может применяться аппарат нейрообратной связи, который заключается в следующем: электроэнцефалограф и другие вспомогательные устройства регистрируют биоэлектрические потенциалы на коже головы человека, которые обрабатываются программой в режиме онлайн и предъявляются в удобной для человека форме на экране с целью их регулирования или передаются машинам для управления ими [1].

Описание комплекса. В данной работе описывается программно-аппаратный комплекс НС-1, расположенный в ИПМаш РАН и позволяющий человеку управлять подвижными объектами, используя парадигму нейрообратной связи, то есть управлять ими, изменяя активность мозга.

Экспериментальная установка. Экспериментальный комплекс НС-1 имеет в своем составе два электроэнцефалографа. Первый – мобильный электроэнцефалограф Мицар-ЭЭГ-SmartBCI на 32 канала с системой позиционирования электродов Electro-Cap USA с акуссессуарами [2].



Второй – стационарный электроэнцефалограф Нейровизор 136 на 136 каналов [3]. Также имеются мобильные роботы, собранные из конструкторов ТРИК [4] и LEGO Mindstorms NXT [5], зарядные устройства и вспомогательное оборудование. Подробное описание стенда можно найти на сайте ИПМаш РАН в разделе «Структура института-объекты инфраструктуры» [6]. Внешний вид экспериментальной установки НС-1 и ее структура представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

Для проведения экспериментов с использованием стенда НС-1 в определенных местах на голове субъекта размещаются небольшие электроды с помощью шапочки. Для обеспечения

качественного контакта электродов с кожей головы используется электропроводящий гель (УНИМАКС). Голова должна быть очищена перед экспериментом, что обеспечивает хороший контакт электродов с кожей головы для получения высококачественной записи электроэнцефалограммы. Электроэнцефалографы подключаются к компьютеру через USB-кабель или Bluetooth, соответственно. Для получения данных из электроэнцефалографа используется специальное программное обеспечение, которое преобразует сигналы в поток LSL (Lab Streaming Layer). Для электроэнцефалографа Mitsar-EEG-SmartBCI используется

Рис. 1. Экспериментальная установка НС-1

программное обеспечение LSLSmartBCI, а для электроэнцефалографа Нейровизор-136 – программное обеспечение NeoRec. Далее можно использовать программное обеспечение, разработанное в ИПМаш РАН [7, 8], для регуляции ритмов головного мозга, например, с целью управления подвижными объектами, с использованием преобразованного сигнала от электроэнцефалографа.

Структура программного обеспечения. Представленное программное обеспечение было разработано в среде MATLAB [9] и состоит из пяти основных блоков: получение сигнала электроэнцефалограммы (ЭЭГ), частотная фильтрация, пространственная фильтрация, адаптивная оценка параметров модели и формирование управляющих сигналов (рис. 2).



Рис. 2. Схема экспериментальной установки и программного обеспечения

Блок приема сигнала ЭЭГ используется для передачи электрических потенциалов от электродов электроэнцефалографа к компьютеру, который является программным обеспечением сторонних производителей, описанным выше.

Принятый сигнал ЭЭГ передается на блок частотной фильтрации. Целью этого блока является выделение сигнала в интересующей полосе частот. Например, для управления движением робота может быть использован сенсомоторный ритм, которому соответствует полоса частот 8–13 Гц. Для этого используется фильтр Баттерворта четвертого порядка.

Модуль пространственной фильтрации основан на алгоритме Common Spatial Pattern (CSP), который позволяет локализовать источник сигнала. Алгоритм основан на решении обобщенной задачи на собственные значения [10], образованной парой автокорреляционных матриц для двух различных сопоставимых условий.

Следующий блок называется адаптивным оцениванием параметров модели. Разработка методов расчета сигналов адаптивной обратной связи, которые корректируют параметры правил применительно к конкретному предмету, является актуальной проблемой. Правила для расчета количественных параметров ЭЭГ, используемых далее для формирования сигнала нейрообратной связи, зависят от большого числа параметров, таких как, например, длина временного окна обработки данных или величина задержки при предъявлении управляющего воздействия. Индивидуальный подбор значений этих параметров также может повысить эффективность обучения [11]. После этого управляющий сигнал генерируется путем сравнения модели и результатов алгоритма CSP в блоке генерации управления.

Далее строятся алгоритмы управления, которые передаются роботу, или информация о параметрах сигналов выводится на экран в удобном для человека виде с целью их дальнейшего регулирования, тем самым образуя замкнутую контур нейрообратной связи. Во время записи и фильтрации сигнала происходит процесс обучения человека, с целью определения моторной области коры головного мозга, отвечающей за движения правой или левой рукой. Записанный сигнал можно рассматривать как «эталонный» и сравнивать его с другими сигналами.

Заключение. В работе было представлено описание программно-аппаратного комплекса НС-1, расположенного в ИПМаш РАН и позволяющего осуществлять исследование систем гибридного интеллекта на основе нейрообратной связи. Описание включает в себя как аппаратную часть, так и разработанные программы. В дальнейшем планируется доработка программной части, а именно включение новых блоков. Например, будет разработан блок классификации сигналов ЭЭГ на основе методов глубокого обучения. Так же будут усовершенствованы блоки управления подвижными объектами. Новые алгоритмы управления

будут являться комбинацией известных алгоритмов теории управления и алгоритмов нейробиологической обратной связи.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 19-08-00865.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sitaram L., Ros T., Stoeckel L., Haller S., Scharnowski F., Lewis-Peacock J., Weiskopf N., Blefari M.L., Rana M., Oblak E., Birbaumer N., Sulzer J. Closed-loop brain training: the science of neurofeedback. *Nature Reviews Neuroscience*. 2017. Vol. 18. № 2. P. 86-100.
2. <https://mitsar-eeg.com>
3. <https://mks.ru/index>
4. <https://trikset.com>
5. <https://www.lego.com/en-us>
6. <http://www.ipme.ru/ipme/ru/indexr.html>
7. Осадчий А.Е., Сметанин Н.М., Плотников С.А. Среда для проведения тренинга в парадигме нейробиологической обратной связи. Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. №2018611760 от 06.02.2018. Москва: Роспатент. 2018.
8. Степаненко Д.А., Семенов Д.М., Плотников С.А., Фрадков А.Л. Программный комплекс для реализации нейробиологической обратной связи: модуль обработки сигнала ЭЭГ. Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. №2019610034 от 09.01.2019. Москва: Роспатент. 2019.
9. <https://www.mathworks.com>
10. Koles Z.J., Lazaret M.S., Zhou S.Z. Spatial patterns underlying population differences in the background EEG. *Brain Topogr.* 1990. Vol. 2. P. 275-284.
11. Овод И.В., Осадчий А.Е., Пупышев А.А., Фрадков А.Л. Формирование нейробиологической обратной связи на основе адаптивной модели активности головного мозга. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2012. № 2. С. 36-41.

S.A. Plotnikov, D.M. Semenov, M. Lipkovich, A.L. Fradkov (Institute for Problems of Mechanical Engineering RAS, St. Petersburg)

Software and Hardware Benchmark for Studying Hybrid Intelligent Systems based on Neurofeedback

This paper presents a description of the NS-1 hardware and software benchmark, located in IPME RAS, for the study of hybrid intelligence systems based on neurofeedback. Paper describes both the hardware part of the complex and the crucial units of software developed in IPME RAS.