

УДК 004.5

МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА

Т.И. Возненко

*Институт интеллектуальных кибернетических систем,
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409, Россия
e-mail: TIVoznenko@mephi.ru*

Поступила в редакцию: 10.09.2023

После доработки: 10.09.2023

Принята к публикации: 22.09.2023

В настоящее время актуальными задачами являются исследование и разработка эффективного человеко-машинного интерфейса для робототехнических комплексов. Для повышения эффективности управления робототехническим комплексом могут быть использованы несколько интерфейсов, работающие в параллельном режиме. В частности, существует многоканальный человеко-машинный интерфейс, который подразумевает взаимодействие нескольких интерфейсов. Существуют различные алгоритмы взаимодействия нескольких интерфейсов, направленные на выбор команды, которую необходимо передать на робототехнический комплекс в данный момент времени. Для обоснования целесообразности использования алгоритмов взаимодействия необходимо применять методику тестирования многоканального человеко-машинного интерфейса. В данной статье рассматриваются различные подходы к реализации данной методики: на основе метода статистических испытаний и на основе моделирования результатов. По результатам сбора статистики формируются матрицы ошибок. В данной статье рассмотрены различные виды матриц ошибок, а также метрики, которые могут быть использованы для оценки эффективности работы человеко-машинного интерфейса с учетом ошибок первого и второго рода. В случае моделирования результатов, в данной статье были рассмотрены моделирование на основе выбора вида распределения и моделирование на основе генерирования матрицы ошибок. Моделирование результатов может быть использовано при невозможности сбора большой статистики, для проверки целесообразности использования алгоритмов взаимодействия.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, многоканальный интерфейс, матрица ошибок, тестирование человеко-машинного интерфейса.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.266

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальными являются исследования, посвященные робототехническим комплексам [1–2]. Причем существуют направления, посвященные как автономным робототехническим комплексам [3–4], так и исследованию человеко-машинных интерфейсов для автоматизированных систем [5–6]. Для повышения эффективности управления исследуются реализации с параллельным использованием нескольких интерфейсов. В частности, существует реализация многоканального интерфейса [7], которая подразумевает взаимодействие нескольких человеко-машинных интерфейсов. Для тестирования алгоритмов взаимодействия необходимо получить информацию о работе каждого человеко-машинного интерфейса. Данная информация может быть получена двумя способами:

- на основе метода статистических испытаний (сбора статистики);
- на основе моделирования результатов.

В данной статье рассматриваются подходы к реализации методики тестирования многоканального интерфейса.

СБОР СТАТИСТИКИ

В случае сбора статистики необходимо выполнить каждую команду определенное количество раз, а результат распознавания записать в матрицу ошибок [8]. Матрица ошибок при статистической классификации показана в табл. 1. Строки матрицы соответствуют количеству случаев распознавания команды K_i как команды K_j . Таким образом, по диагонали матрицы расположены случаи правильного распознавания команд.

Таблица 1. Матрица ошибок при статистической классификации [8]

Ист.\рез.	K_1	K_n	...	K_N
K_1	σ_{11}	σ_{12}	...	σ_{1N}
K_2	σ_{21}	σ_{22}	...	σ_{2N}
...
K_N	σ_{M1}	σ_{M2}	...	σ_{MN}

Существуют два способа представления данных в матрице ошибок: с помощью абсолютных количеств и нормализованные по классам [9]. В случае абсолютных количеств элементы матрицы – это количественные результаты распознавания. В случае нормализации по классам сначала формируется матрица на основе абсолютных значений, которая затем нормализуется (путем деления элементов на сумму элементов строки, в которой находится данный элемент). В результате, сумма элементов каждой строки нормализованной матрицы ошибок равняется единице. В случае матрицы ошибок с нормализованными значениями элементы матрицы ошибок показывают вероятность распознавания команды K_i как команды K_j . Иными словами, с помощью статистической классификации можно получить априорные вероятности распознавания команд. В данной работе предлагается в основном рассматривать матрицу ошибок с абсолютными значениями.

Существуют несколько видов размерностей матриц ошибок: квадратные и прямоугольные. Рассмотрим разные виды матриц ошибок, которые встречаются в научных работах, связанных с распознаванием команд при помощи интерфейса, с учетом того, что общее количество команд равно n .

В работе [10], посвященной алгоритму распознавания жестов с помощью акселерометра, можно увидеть результат тестирования, представленный в виде данной квадратной матрицы размером 8×8 (рис. 1). Размер данной матрицы $n \times n$.

В работе [11] представлен результат жестового распознавания в виде прямоугольной матрицы 5×6 (рис. 2). В последнем столбце данной матрицы, в отличие от квадратной матрицы, рассматриваются случаи, когда жест не был распознан в последнем столбце. Размер данной матрицы $n \times (n + 1)$.

	↘	↙	→	←	↑	↓	⊙	⊙
↘	92.1	0.1	2.4	1.9	0.1	2.9	0.6	0.1
↙	1.6	91.6	1.3	1.1	0.7	0.4	2.7	0.6
→	0.5	0	95.9	1.2	0.7	1.7	0	0
←	0.3	0	1.6	96.2	0.7	1.1	0	0.1
↑	0.3	0	1.5	0.6	97.0	0.5	0	0.1
↓	2.4	0	2.4	2.3	1.0	91.7	0.1	0
⊙	3.4	1.9	2.6	1.7	0.4	0.7	89.2	0
⊙	1.1	0.6	1.7	0.9	0.8	0.7	0	94.2

Рис. 1. Квадратная матрица ошибок размером 8×8 [10]

В работе [12] представлен результат жестового распознавания в виде квадратной матрицы ошибок размером 5×5 со случаем отсутствия команды (рис. 3). Размер данной матрицы $(n + 1) \times (n + 1)$. В общем виде сложность составления такой матрицы заключается в адекватной оценке отсутствия команды, поскольку существуют два совершенно разных случая: когда никакая команда не выполняется, и когда происходит выполнение некоторого действия, которое может быть ложно распознано как команда. Полное определение действий, не являющихся выполнением командами, которые могут привести к ложному распознаванию команд, является нетривиальной задачей. Поэтому данный вид матрицы не сильно распространен, а если и используется, то при ее составлении рассматривается отсутствие действия от оператора.

	Down-Up	Inf.	Up-Down	Up-Pause-Down	Down-Pause-Up	Unknown
Down-Up	0.94	0	0	0	0	0.06
Infinity	0.07	0.83	0.04	0	0.03	0.03
Up-Down	0	0	1	0	0	0
Up-Pause-Down	0	0	0.05	0.9	0	0.05
Down-Pause-Up	0	0	0	0	0.96	0.04

Рис. 2. Прямоугольная матрица ошибок размером 5×6 [11] со случаем нераспознавания команд

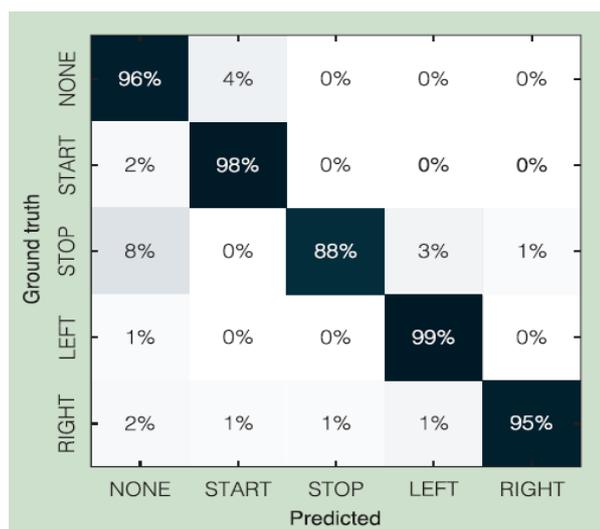


Рис. 3. Квадратная матрица ошибок размером 5×5 со случаем отсутствия команды [12]

На основе анализа полученных матриц проводится оценка работы интерфейса. Рассмотрим возможные метрики, которые могут быть использованы для оценки эффективности работы интерфейса.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИНТЕРФЕЙСА

Оценка эффективности работы интерфейса – численный показатель, который выбирается таким образом, чтобы выполнить наиболее важное требование, предъявленное к интерфейсу [13]. Рассмотрим метрики, которые могут быть использованы для оценки эффективности работы интерфейса, на основе анализа матрицы ошибок размером $n \times (n + 1)$. Для этого рас-

смотрим метрики, которые могут быть использованы для оценки одной команды.

Для оценки одной команды можно использовать метрики, рассчитанные на основе результата бинарной классификации. В случае классификации необходимо определить, что является положительным (positive) классом, а что является отрицательным (negative) классом [14]. В данном случае в качестве positive рассматривается распознанная команда. А в случае negative – не распознанная команда. Если рассмотреть одну команду, то возможны четыре случая результата классификации (табл. 2):

TP, true positive – количество случаев, когда команда была распознана, когда она была вызвана оператором на исполнение;

FP, false positive – количество случаев, когда команда была распознана, когда она не была вызвана оператором на исполнение;

FN, false negative – количество случаев, когда команда не была распознана, когда она была вызвана оператором на исполнение;

TN, true negative – количество случаев, когда команда не была распознана, когда она не была вызвана оператором на исполнение.

Метрика FP показывает количество ложноположительных срабатываний, т.е. случаев, когда команда была распознана, хотя она не была отдана оператором. Другим названием метрики FP является «ошибка первого» рода.

Метрика FN показывает количество ложноотрицательных срабатываний, т.е. случаев, когда команда была не распознана, хотя она была отдана оператором. Другим названием метрики FN является ошибка «второго рода».

Таблица 2. Классификация случаев распознавания команды

Вызов команды оператором	Результат распознавания команды	
	Распознана (Positive)	Не распознана (Negative)
Команда была вызвана	TP	FN
Команда не была вызвана	FP	TN

Матрица ошибок может быть составлена на основе сбалансированного или несбалансированного набора данных. Несбалансированный набор данных означает, что сумма каждой строки для матрицы ошибок с абсолютными значениями неодинакова. Для несбалансированного набора данных существует множество метрик, например ACCBal, SinACC, AU1U [9].

На практике при вызове команд возможно наличие несбалансированной выборки за счет вызова одних команд чаще, чем других. Также

несбалансированная выборка может быть в случае, если команды вызываются оператором равномерно, но при вызове одной команды может быть ложно распознано несколько других команд [15]. Однако в данной работе предлагается сделать допущение о равномерном использовании всех команд и распознавании максимум одной команды при вызове одной команды. И при данном допущении необходимо провести исследование матрицы ошибок только для сбалансированной выборки.

Для сбалансированной выборки существует множество метрик, связанных с оценкой ошибок первого и второго рода, например точность, чувствительность и специфичность, F1-мера, G-мера, MTnP [16] и др. Ошибки первого и второго рода являются одинаково критичными в случае распознавания команд, поскольку случаи, когда выполняется команда, которая не была отдана, так и случаи, когда отданная команда не была выполнена, могут привести к критическим последствиям. Таким образом, необходимо рассматривать метрику, которая основана как на ошибках первого рода, так и на ошибках второго рода. Также в данной работе предлагается рассмотреть метрику, которая не учитывает случаи TN, поскольку, если количество рассматриваемых команд будет большое, то значение TN будет значительно больше остальных значений TP, FP и FN. В случае выбора метрики выбор наиболее эффективно работающей команды определяется экстремальным значением, т.е. максимальным или минимальным значением метрики. Например, можно выбрать команду с максимальным значением TP или команду с минимальным значением FP. В данной работе предлагается рассмотреть метрики, максимальное значение которых приводит к наилучшему результату. В табл. 3 представлена сравнительная характеристика различных метрик, где для каждой из них была приведена оценка по шкале от 0 до 3, где 3 – максимальный балл. Балл начисляется метрике в следующих случаях:

если метрика учитывает ошибку первого рода (FP) – чем меньше FP, тем больше значение метрики;

если метрика учитывает ошибку второго рода (FN) – чем меньше FN, тем больше значение метрики;

если метрика не учитывает случаи true negative (TN).

На практике самыми распространенными являются метрики ACC и F1-мера. Метрика ACC учитывает случаи TN, из-за чего высокое значение ACC для команды может быть достигнуто за счет других команд. Метрика F1 является средним гармоническим между TPR и PPV, что позволяет учитывать ошибки первого и второго рода. Метрика G является средним геометрическим между TPR и PPV, что также позволяет учитывать ошибки первого и второго рода. Однако в общем виде среднее гармоническое является более пессимистичной оценкой так как согласно неравенству о среднем арифметическом (A), геометрическому (G) и гармоническому (H) (рис. 4) [17]:

$$H \leq G \leq A. \quad (1)$$

Но если предположить, что работа идет с высокоэффективными интерфейсами, где количество ошибок при распознавании будет минимально, и, следовательно, значения TPR и PPV будут максимальными, то оценки среднего геометрического (G) и среднего гармонического (H) являются схожими. И поэтому в таких случаях можно говорить о том, что оценка на основе метрик F1, G-меры и MTnP является схожей.

Таблица 3. Метрики для оценки эффективности работы команды

Название метрики	Формула	Балл
Accuracy (ACC), точность	$\frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}$	2
True Positive Rate (TPR), чувствительность	$\frac{TP}{TP + FN}$	2
True Negative Rate (TNR), специфичность	$\frac{TN}{TN + FP}$	1
Positive Predictive Value (PPV), прогнозируемое положительное значение	$\frac{TP}{TP + FP}$	2
Negative Predictive Value (NPV), отрицательное прогнозное значение	$\frac{TN}{TN + FN}$	1
Оценка F1	$2 \cdot \frac{PPV \cdot TPR}{PPV + TPR}$	3
Коэффициент корреляции Мэтьюза (MCC)	$\frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}$	2
Индекс Фаулкса–Мальлоуса, G-мера	$\sqrt{PPV \cdot TPR}$	3
MTnP [16]	$TPR \cdot PPV$	3

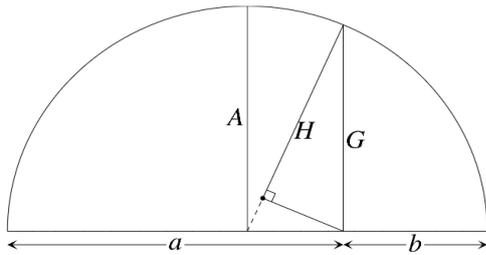


Рис. 4. Сравнение среднего арифметического (A), среднего геометрического (G) и среднего гармонического (H) между a и b [17]

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим второй способ получения информации об интерфейсе человеко-машинного взаимодействия. В случае моделирования результатов происходит определение вида распределения, которому соответствует работа интерфейса, и на основе параметров данного распределения происходит моделирование эксперимента. Существует множество распределений, которые можно использовать для оценки работы интерфейса: нормальное, биномиальное, мультиномиальное [18]. Однако при оценке работы системы одним из наиболее часто используемых способов является метод статистических испытаний проводимых по схеме Бернулли [19–20].

При разработке интерфейсов для робототехнических комплексов требуется провести оценку эффективности их работы, которая определяется как вероятность p – правильного распознавания передаваемых команд. Одним из наиболее часто используемых приемов определения такой вероятности является метод статистических испытаний, проводимых по схеме Бернулли, при которой случайная величина, описывающая результат испытания, может принимать только два значения – «успех» и «неудача». Разработанную систему подвергают испытаниям и оценивают количество успешных распознаваний команд и количество ошибок. При проведении n независимых испытаний вычисляют частоту успехов [21]:

$$p \approx W_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k, \quad (2)$$

которая является максимально правдоподобной оценкой вероятности p – правильного распознавания передаваемых команд. Таким образом, задав вероятность распознавания p для каждого интерфейса, можно построить дискриминантную функцию, в которой для всех возможных распознанных комбинаций команд-интерфейсов ставится в соответствие команда, которую нужно выполнить [18].

Еще одним способом является генерация самих матрицы ошибок. В работе [22] для каждого интерфейса определяется параметр Base, который является минимально правильным количеством распознавания команды (ТР). А остальные $(100 - \text{Base})$ случаев распределяются случайным образом между остальными состояниями команды. Например, при $\text{Base} = 90$ может быть получена следующая матрица ошибок размера $n \times (n + 1)$, где $n = 5$:

$$M = \begin{pmatrix} 92 & 0 & 2 & 4 & 2 & 0 \\ 1 & 94 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 95 & 0 & 0 & 4 \\ 2 & 3 & 1 & 91 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 90 & 8 \end{pmatrix}.$$

Отличие данного способа заключается в возможности учета ошибок первого и второго рода. Данный способ позволяет работать с матрицами ошибок так же, как если бы они были получены в результате проведения сбора статистики.

Моделирование результатов можно провести в случае, если сбор большой статистики является невозможным или слишком затратным. При выборе вида распределения или генерирования матрицы ошибок можно сделать выводы о целесообразности работы алгоритмов взаимодействия и провести их дальнейшую доработку. Как и в случае со сбором статистики, при моделировании результатов проводится оценка эффективности работы интерфейса на основе рассмотренных ранее метрик.

ВЫВОДЫ

В данной статье были рассмотрены различные методики тестирования многоканального человеко-машинного интерфейса, методики на основе сбора статистики и на основе моделирования результатов. При сборе статистики необходимо уделить внимание виду набора данных (сбалансированному или несбалансированному), на основе которого составляется матрица ошибок. Для анализа матриц ошибок были рассмотрены различные метрики, которые могут быть использованы для оценки эффективности работы человеко-машинного интерфейса. Была показана важность учета ошибок первого и второго рода, а также целесообразность использования метрик F1, G-меры и MTnP для высокоэффективных интерфейсов. В случае моделирования результатов было рассмотрено моделирование на основе выбора вида распределения и на основе генерирования матрицы ошибок. Мо-

делирование результатов помогает при отсутствии большой статистики и может быть использовано для обоснования целесообразности использования алгоритмов. Однако после тестирования алгоритмов на основе моделирования необходимо провести итоговое тестирование с участием оператора, чтобы подтвердить целесообразность использования алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Славин О.А., Суминов К.А. Математические и программные модели задач технического зрения робототехнических комплексов на основе микропроцессоров «Эльбрус» // Труды Института системного программирования РАН, 2022. Т. 34. № 6. С. 85–100. DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6.

2. Бочаров Н.А. Исследование подходов к унификации бортовых вычислительных комплексов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2023. № 1 (231). С. 275–287. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287.

3. 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.

4. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Сапачев И.Д. Реализация алгоритмов группового управления на языке Java в среде ОС «Эльбрус» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12. № 1. С. 108–114.

5. Баранов И.А. Человеко-машинный интерфейс контроля и управления прикладными программами для ВК на базе микропроцессоров SPARC и «Эльбрус» в АСУТП // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 4. № 3. С. 201–212.

6. Егоров Г.А., Белоногов А.Д., Островский М.А., Рейзман Я.А. Реализация человеко-машинного интерфейса в интегрированной технологии проектирования автоматизированных систем контроля и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 7. С. 56–62.

7. Gridnev A.A., Voznenko T.I., Chepin E.V. The decision-making system for a multi-channel robotic device control // Procedia computer science, 2018. Vol. 123. P. 149–154. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.

8. Чабан Л.Н. Методы и алгоритмы распознавания образов в автоматизированном дешифрировании данных дистанционного зондирования. М.: МИИГАиК, 2016. 94 с.

9. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Об оценке результатов классификации несбалансированных данных по матрице ошибок // Информатика, 2021. Т. 18. № 1. С. 61–71. DOI: 10.37661/10.37661/1816-0301-2021-18-1-61-71.

10. Liu J., Zhong L., Wickramasuriya J., Vasudevan V. uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications // Pervasive and Mobile Computing, 2009. Vol. 5. No. 6. Pp. 657–675. DOI: 10.1016/j.pmcj.2009.07.007.

11. Abdelnasser H., Youssef M., Harras K.A. Wiggest: A ubiquitous wifi-based gesture recognition system // 2015 IEEE conference on computer communications (INFOCOM), IEEE, 2015. Pp. 1472–1480. DOI: 10.1109/INFOCOM.2015.7218525.

12. Nuzzi C., Pasinetti S., Lancini M., Docchio F., Sansoni G. Deep learning-based hand gesture recognition for collaborative robots // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2019. Vol. 22. № 2. Pp. 44–51. DOI: 10.1109/MIM.2019.8674634.

13. Мирошник И.В. Согласованное управление многоканальными системами // Л.: Энергоатомиздат, 1990. 128 с.

14. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными. СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. 480 с.

15. Petrova A.I., Voznenko T.I., Chepin E.V. The impact of artifacts on the BCI control channel for a robotic wheelchair // Advanced Technologies in Robotics and Intelligent Systems. Mechanisms and Machine Science. Springer, Cham, 2020. Vol. 80. Pp. 105–111. DOI: 10.1007/978-3-030-33491-8_12.

16. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The decomposition method of multi-channel control system based on extended bci for a robotic wheelchair // Biologically Inspired Cognitive Architectures Meeting, Springer, Cham, 2019. Pp. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.

17. Cantrell D.W. Pythagorean means // Math World, 2003. [Электронный ресурс]. URL: <https://mathworld.wolfram.com/PythagoreanMeans.html> (Дата обращения: 24.07.2023).

18. Бушон К.М. Распознавание образов и машинное обучение. М.: Вильямс, 2020. 960 с.

19. Zhang L., Wang C., Arinez J., Biller S. Transient analysis of Bernoulli serial lines: Performance evaluation and system-theoretic properties // IIE Transactions, 2013. Vol. 45. № 5. P. 528–543. DOI: 10.1080/0740817X.2012.721946.

20. Naebulharam R., Zhang L. Bernoulli serial lines with deteriorating product quality: performance evaluation and system-theoretic properties // International Journal of Production Research, 2014. Vol. 52. № 5. Pp. 1479–1494. DOI: 10.1080/00207543.2013.847982.

21. Кубзун А.И., Горяинова Е.Р., Наумов А.В., Сиротин А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. М.: Физматлит, 2002. 224 с.

22. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Chepin E.V., Kudryavtsev K.Y. The command interpretation in decomposition method of multi-channel control for a robotic device // Procedia Computer Science, 2020. Vol. 169. Pp. 152–157. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.127.

METHODOLOGY OF TESTING MULTI-CHANNEL HUMAN-MACHINE INTERFACE

Т.И. Возненко

Institute of Cyber Intelligence Systems,
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia
e-mail: TIVoznenko@mephi.ru

Received September 10, 2023; revised September 10, 2023; accepted September 22, 2023

Currently, the research and development of an effective human-machine interface for robotic complexes is relevant. To increase the efficiency of controlling a robotic complex, several interfaces operating in parallel mode can be used. In particular, there is a multi-channel human-machine interface, which involves the interaction of several interfaces. There are various algorithms for the interaction of several interfaces aimed at selecting a command that needs to be sent to the robotic complex at a given time. To justify the feasibility of the interaction algorithms, it is necessary to apply a methodology for testing a multi-channel human-machine interface. This article considers different approaches to the implementation of this methodology: based on the statistical test method and based on modeling of results. Based on the results of statistics collection, confusion matrices are formed. In this article, different types of confusion matrices are considered, as well as metrics that can be used to evaluate the efficiency of the human-machine interface taking into account type I and II errors. In the case of modeling the results, this article are considered modeling based on the type of distribution and modeling based on generating a confusion matrix. Simulation of results can be used when it is impossible to collect large statistics, to check the feasibility of using interaction algorithms.

Keywords: human-machine interface, multi-channel interface, confusion matrix, human-machine interface testing.

REFERENCES

1. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Slavin O.A., Suminov K.A. Matematicheskie i programmnye modeli zadach tekhnicheskogo zreniya robototekhnicheskikh kompleksov na osnove mikroprocessorov «El'brus». [Mathematical and software models of technical vision tasks of robotic complexes based on «Elbrus» microprocessors]. Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS), 2022. Vol. 34. No. 6. Pp. 85–100 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6.
2. Bocharov N.A. Issledovanie podhodov k unifikatsii bortovykh vychislitel'nykh kompleksov [Study of approaches to the unification of on-board computers]. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2023. No. 1(231). Pp. 275–287 (in Russian) DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287.
3. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Slavin O.A., Yanko D.V. Otsenka perspektiv ispol'zovaniya vychislitel'nykh sredstv semeystva «El'brus» pri realizatsii algoritmov raspoznavaniya v sovremennykh robototekhnicheskikh kompleksakh [Evaluation of the prospects for the use of computing tools of the «Elbrus» family in the implementation of recognition algorithms in modern robotic complexes]. Voprosy radioelektroniki [Questions of radio electronics], 2018. No. 2. Pp. 99–105 (in Russian).
4. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Sapachev I.D. Realizatsiya algoritmov gruppovogo upravleniya na yazyke Java v srede OS «El'brus». [Implementation of algorithms of group control on Java language in OS «Elbrus» environment]. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie [Modern information technologies and IT education], 2016. Vol. 12. No. 1. Pp. 0108–114 (in Russian).
5. Baranov I.A. Cheloveko-mashinnyj interfejs kontrolya i upravleniya prikladnymi programmami dlya VK na baze mikroprocessorov SPARC i «El'brus» v ASUTP. [Human-machine interface for monitoring and managing application programs for computers based on SPARC and Elbrus microprocessors in automated process control systems]. Voprosy radioelektroniki. [Questions of radio electronics], 2013. Vol. 4. No. 3. Pp. 201–212 (in Russian).
6. Egorov G.A., Belonogov A.D., Ostrovskiy M.A., Rejzman Ya. A. Realizatsiya cheloveko-mashinnogo interfejsa v integrirovannoy tekhnologii proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem kontrolya i upravleniya. [Implementation of human-machine interface in integrated technology for designing automated monitoring and control systems]. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. [Mechatronics, automation, control], 2011. No. 7. Pp. 56–62 (in Russian).
7. Gridnev A.A., Voznenko T.I., Chepin E.V. The decision-making system for a multi-channel robotic device control. Procedia computer science, 2018. Vol. 123. Pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.
8. Chaban L.N. Metody i algoritmy raspoznavaniya obrazov v avtomatizirovannom deshifirovani dannykh distantsionnogo zondirovaniya. [Methods and algorithms for pattern recognition in automated interpretation of

remote sensing data]. Moscow, МИГАiК Publ., 2016. 94 p. (in Russian).

9. *Starovoitov V.V., Golub Yu.I.* Ob oцenke rezul'tatov klassifikacii nesbalansirovannyh dannyh po matricе oshibok [About the confusion-matrix-based assessment of the results of imbalanced data classification]. Informatics, 2021. Vol. 18. No. 1. Pp. 61–71 (in Russian) DOI: 10.37661/10.37661/1816-0301-2021-18-1-61-71.

10. *Liu J., Zhong L., Wickramasuriya J., Vasudevan V.* uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications. Pervasive and Mobile Computing, 2009. Vol. 5. No. 6. Pp. 657–675. DOI: 10.1016/j.pmcj.2009.07.007

11. *Abdelnasser H., Youssef M., Harras K.A.* Wiggest: A ubiquitous wifi-based gesture recognition system. 2015 IEEE conference on computer communications (INFOCOM), IEEE, 2015. Pp. 1472–1480. DOI: 10.1109/INFOCOM.2015.7218525

12. *Nuzzi C., Pasinetti S., Lancini M., Docchio F., Sansoni G.* Deep learning-based hand gesture recognition for collaborative robots. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2019. Vol. 22. No. 2. Pp. 44–51. DOI: 10.1109/MIM.2019.8674634

13. *Miroshnik I.V.* Soglasovannoe upravlenie mnogo-kanal'nymi sistemami. [Coordinated control of multi-channel systems]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 128 p. (in Russian).

14. *Müller A.C., Guido S.* Vvedenie v mashinnoe obuchenie s pomoshch'yu Python. Rukovodstvo dlya specialistov po rabote s dannymi. [Introduction to machine learning with Python: a guide for data scientists]. Saint Petersburg, OOO Al'fa-kniga Publ., 2016. 398 p. (in Russian).

15. *Petrova A.I., Voznenko T.I., Chepin E.V.* The impact of artifacts on the BCI control channel for a robotic wheelchair. Advanced Technologies in Robotics and Intelligent Systems. Mechanisms and Machine Science.

Springer, Cham, 2020. Vol. 80. Pp. 105–111. DOI: 10.1007/978-3-030-33491-8_12.

16. *Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V.* The decomposition method of multi-channel control system based on extended bci for a robotic wheelchair. Biologically Inspired Cognitive Architectures Meeting, Springer, Cham, 2019. Pp. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.

17. *Cantrell D.W.* Pythagorean means // Math World, 2003. Available at: <https://mathworld.wolfram.com/PythagoreanMeans.html> (accessed 24.07.2023).

18. *Bishop C.M.* Raspoznavanie obrazov i mashinnoe obuchenie. [Pattern Recognition and Machine Learning]. Moscow: Vil'yams Publ., 2006. 738 p. (in Russian).

19. *Zhang L., Wang C., Arinez J., Biller S.* Transient analysis of Bernoulli serial lines: Performance evaluation and system-theoretic properties. IIE Transactions, 2013. Vol. 45. No. 5. Pp. 528–543. DOI: 10.1080/0740817X.2012.721946.

20. *Naebulharam R., Zhang L.* Bernoulli serial lines with deteriorating product quality: performance evaluation and system-theoretic properties. International Journal of Production Research, 2014. Vol. 52. No. 5. Pp. 1479–1494. DOI: 10.1080/00207543.2013.847982.

21. *Kibzun A.I., Goryainova E.R., Naumov A.V., Sirotin A.N.* Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika: bazovyi kurs s primerami i zadachami. [Probability theory and mathematical statistics. Basic course with examples and tasks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 224 p. (in Russian).

22. *Voznenko T.I., Gridnev A.A., Chepin E.V., Kudryavtsev K.Y.* The command interpretation in decomposition method of multi-channel control for a robotic device. Procedia Computer Science, 2020. Vol. 169. Pp. 152–157. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.127.