

Технология виртуального сопряжения в процессе имитационного моделирования сложнофункциональных модулей систем управления промышленных роботов и многокоординатных мехатронных систем

А.А. Зеленский¹ ✉, М.М. Жданова¹, Т.Х. Абдуллин¹, В.В. Воронин¹

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Вадковский пер., д. 1, г. Москва 127055, Российская Федерация

✉ e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка инструмента для отладки интеллектуальных алгоритмов системы управления, включающих в себя обработку системы технического зрения и планирования программной траектории движения промышленных роботов.

Методы. Для достижения поставленной цели был проведен обзор существующих средств имитационного моделирования. Представлен протокол бесконтактного взаимодействия человека и робота. Разработан алгоритм распознавания жестовых команд на основе разности трехмерных двоичных микроблоков и построении скелета человеческого тела. Представлен пример использования программного средства ROBOGuid для имитационного моделирования движения промышленного робота в рамках разработки и отладки собственных методов управления, ориентированных на реальные объекты.

Результаты. Использование цифровых двойников технологического оборудования для имитации и отображения реальных технологических процессов в виртуальной среде, в контексте формирования новой концепции индустрии 4.0 и шестого технологического уклада, позволяет совершенствовать основные и вспомогательные производственные процессы, а также проводить анализ, исследование и оценку экономической эффективности новых технологических и технических решений. Имитационное моделирование позволяет разработать эргономичные способы взаимодействия человека с мехатронными объектами. Предлагаемое в работе решение протестировано на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали. Экспериментальные исследования предложенного в работе алгоритма распознавания жестовых команд проведены на общедоступном наборе данных UCF101, результаты сравниваются с известными подходами распознавания действий человека.

Заключение. Разработанный модуль сопряжения был использован на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали, а метод системы бесконтактного управления роботом показал свою эффективность и необходимость развития этого направления.

Ключевые слова: имитационное моделирование; промышленные роботы; система управления; дистанционное управление; автоматизация; взаимодействие человека и робота; распознавание жестов; коллаборативная робототехника.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Зеленский А.А., Жданова М.М., Абдуллин Т.Х., Воронин В.В., 2022

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 21-79-10392, <https://rscf.ru/project/21-79-10392/>

Для цитирования: Технология виртуального сопряжения в процессе имитационного моделирования сложнфункциональных модулей систем управления промышленных роботов и многокоординатных мехатронных систем / А.А. Зеленский, М.М. Жданова, Т.Х. Абдуллин, В.В. Воронин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(1): 92-115. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-92-115>.

Поступила в редакцию 10.12.2021

Подписана в печать 08.02.2022

Опубликована 31.03.2022

Virtual Interface Technology in the Process of Simulation of Complex Functional Modules of Control Systems for Industrial Robots and Multi-Axis Mechatronic Systems

Alexander A. Zelensky ¹ ✉, Marina M. Zhdanova ¹, Tagir Kh. Abdullin ¹, Viacheslav V. Voronin ¹

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN",
1 Vadkovsky lane, Moscow 127055, Russian Federation

✉ e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru

Abstract

Purpose of research. Development of a tool for debugging intelligent control system algorithms, including the development of a vision system and planning a software trajectory for an industrial robot.

Methods. To achieve this goal, a review of existing simulation tools was carried out. A protocol of contactless human-robot interaction is presented. An algorithm for the recognition of gesture commands based on the difference of three-dimensional binary microblocks and the construction of the skeleton of the human body has been developed. An example of using the ROBOGuid software tool for imitating the motion of an industrial robot in the development and debugging of its own control methods focused on real objects is presented.

Results. The use of digital twins of technological equipment to simulate and display real technological processes in a virtual environment, in the context of the formation of a new concept of Industry 4.0 and the sixth technological order, allows improving the main and auxiliary production processes, as well as analyzing, researching and evaluating the economic efficiency of new technological and technical solutions. Simulation allows the development of ergonomic ways of human interaction with mechatronic objects. The solution proposed in the work was tested on the example of working out a complex spatial contour that simulates the milling of a part. Experimental studies of the gesture command recognition algorithm proposed in the work were carried out on the publicly available UCF101 dataset, the results are compared with known approaches to recognizing human actions.

Conclusion. The developed interface module was used on the example of working out a complex spatial contour that simulates the milling of a part, and the method of a contactless robot control system has shown its effectiveness and the need to develop this direction.

Keywords: simulation modeling; industrial robots; control system; remote control; automation; human-robot interaction; recognition of gestures; collaborative robotics.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No 21-79-10392, <https://rscf.ru/project/21-79-10392/>.

For citation: Zelensky A. A., Zhdanova M. M., Abdullin T. Kh., Voronin V. V. Virtual Interface Technology in the Process of Simulation of Complex Functional Modules of Control Systems for Industrial Robots and Multi-Axis Mechatronic Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(1): 92-115 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-1-92-115>.

Received 10.12.2021

Accepted 08.02.2022

Published 31.03.2022

Введение

Быстро меняющаяся конъюнктура рынка, расширение ассортимента продукции и применение новых материалов требует применения современного высокотехнологического оборудования во многих отраслях промышленности. Растут требования к динамике и точности многокоординатных технологических мехатронных объектов, к числу которых относятся промышленные роботы и сложные обрабатывающие центры. Также жесткие условия конкуренции на рынке требуют от современного производственного процесса с глубокой автоматизацией малого времени переналадки оборудования и отладки технологии обработки в рамках освоения новой продукции. Таким образом, в контексте формирования новой концепции индустрии 4.0 [1] и шестого технологического уклада необходимо предложить инструмент для гибкого и экономичного освоения технологии производства новой продукции. Потребность в подобном инструменте вызвало появление программных средств, использующих цифровые двойники технологического оборудования для имитации и отображения реальных технологических про-

цессов в виртуальной среде. Средства имитационного моделирования позволяют совершенствовать основные и вспомогательные производственные процессы, а также проводить анализ, исследование и оценку экономической эффективности новых технологических и технических решений. Поскольку использование цифровых двойников оборудования не требует широкого вмешательства в текущий техпроцесс, имитационное моделирование существенно снижает материальные и трудовые затраты при проведении отладочных мероприятий, а также исключает возникновение аварийных ситуаций, травм персонала и повреждения оборудования в результате ошибочных действий специалистов. Имитационное моделирование сложных или новых техпроцессов позволяет разработать эргономичные способы взаимодействия человека с мехатронными объектами.

Таким образом, целью работы является разработка инструмента для отладки алгоритма системы технического зрения и планирования траектории движения схвата манипулятора. В работе было разработано программное обеспечение для персонального компьютера и

скрипт на языке Karel в среде имитационного моделирования ROBOGuid для бесконтактного управления движениями робота и обработки целевых точек траектории движения инструмента.

Материалы и методы

Обзор существующих средств имитационного моделирования

На рынке есть несколько средств имитационного моделирования. В какой-то степени к ним можно отнести опцию SinuTrain [2] от компании Siemens. SinuTrain состоит из пакета ShopTurn [3] для симуляции стойки токарных станков и пакета ShopMill [4] для симуляции фрезерных станков. Опция позволяет программировать обработку деталей посредством заполнения плана обработки детали без знания G- и M-кодов по стандарту ISO 7 bit, а также провести проверку созданной программы механической обработки посредством графической симуляции.

Еще одним средством для имитационного моделирования является пакет программного обеспечения Vericut [5]. Vericut – программный комплекс для проверки и оптимизации технологических программ обработки деталей на обрабатывающих центрах ЧПУ или на нескольких объектах в составе гибкой производственной ячейки, а также для визуализации процесса обработки. Программный комплекс содержит несколько утилит различного назначения.

Продукт имеет широкую базу оборудования, включая станки, сложные обрабатывающие центры и промышленные роботы.

Программным средством имитационного моделирования для функционирования промышленных роботов является пакет RoboDK [6]. Продукт имеет широкую базу промышленных роботов популярных производителей. RoboDK позволяет использовать специализированную оснастку для проектирования и симуляции производственных процессов.

ROBOGuid [7] – программный продукт для промышленных роботов, представлен компанией Fanuk. ROBOGuid предоставляет широкий функционал для проектирования, отладки и визуализации функционирования роботов Fanuk. Программный продукт был использован для решения большого ряда задач в рамках разработки и внедрения собственной системы управления [8, 9] многокоординатных технологических объектов. В частности, для разработки и исследования алгоритма s-образного разгона-замедления приводов осей технологических объектов [10] с целью обеспечения требуемого качества обрабатываемой поверхности и плавности хода инструмента. Также велись исследования в области локального сглаживания траектории инструмента, в основе которого лежит применение сплайнов [11], с целью повышения производительности контурной обработки и, как следствие, снижения времени обработки.

Модуль виртуального сопряжения для имитационного моделирования управления промышленным роботом

В данной работе для имитационного моделирования использовался ROBOGUID, но технология подходит для любых цифровых платформ. ROBOGUID позволяет осуществить виртуальное подключение к цифровой производственной модели по быстродействующим виртуальным промышленным каналам связи, отражающим полную функциональ-

ность реальных каналов. Это позволяет в дальнейшем без дополнительной конфигурации использовать разработанные элементы системы управления на реальных объектах, например, компоненты сенсорного обеспечения для задач коллаборативной робототехники [12, 13].

Для отладки и визуализации разработанных элементов системы управления в среде ROBOGUID (рис. 1) был разработан модуль виртуального сопряжения.

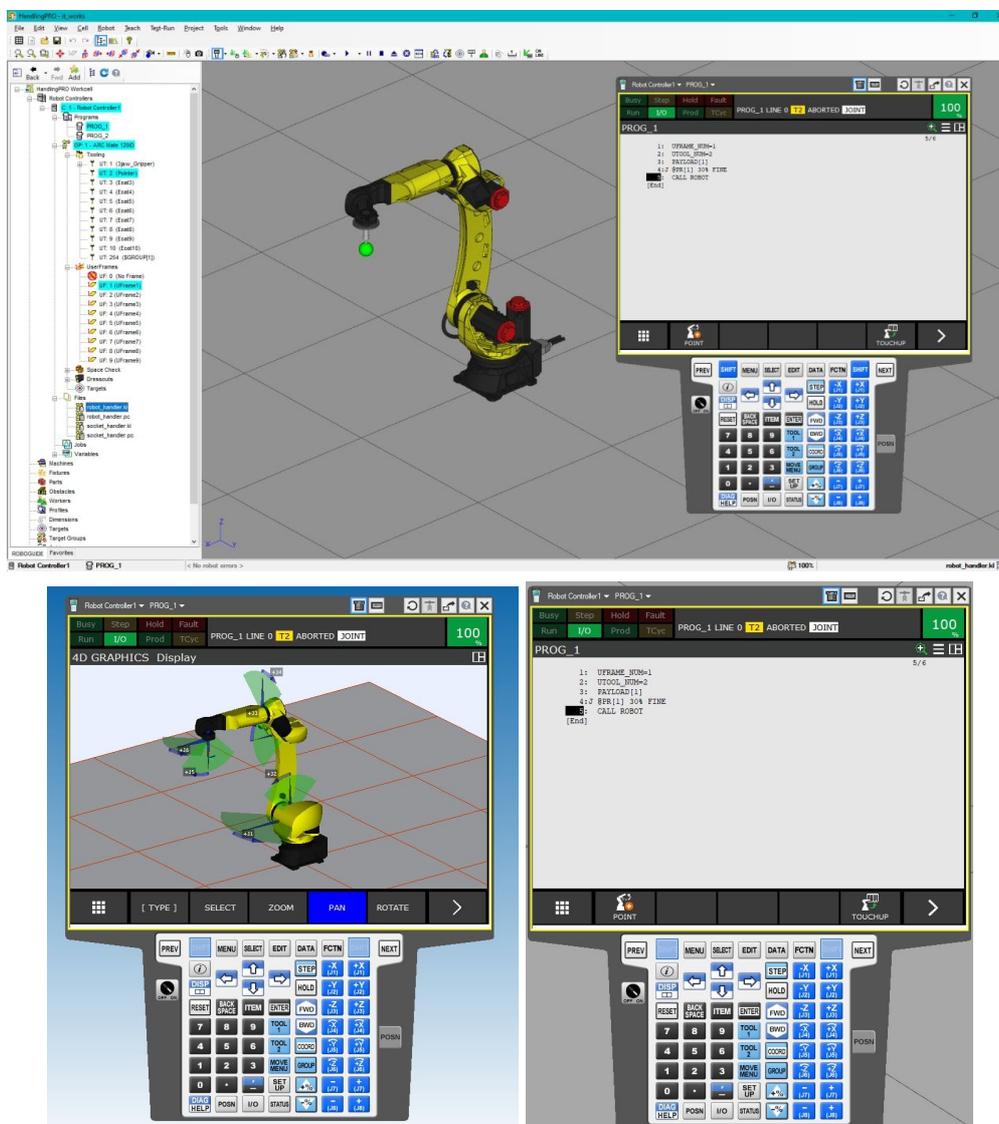


Рис. 1. Элементы среды ROBOGUID

Fig. 1. Elements of the ROBOGUID environment

В среде был создан скрипт на языке Karel [14], обрабатывающий информацию о целевых точках траектории движения. Программа на персональном компьютере через виртуальный TCP/IP [15] порт передает в среду ROBOGuid информацию о целевых точках. Часть скрипта под названием Server в фоновом режиме принимает команды по сети и складывает целевые точки в оче-

редь обработки. Вторая часть скрипта под названием Robot извлекает целевую точку из очереди и осуществляет движение. Среда визуализирует движение робота и траекторию движения инструмента. Блок-схемы частей Server и Robot скрипта показаны на рис. 2.

Листинг скриптов Server и Robot представлен в приложениях 1 и 2 соответственно.

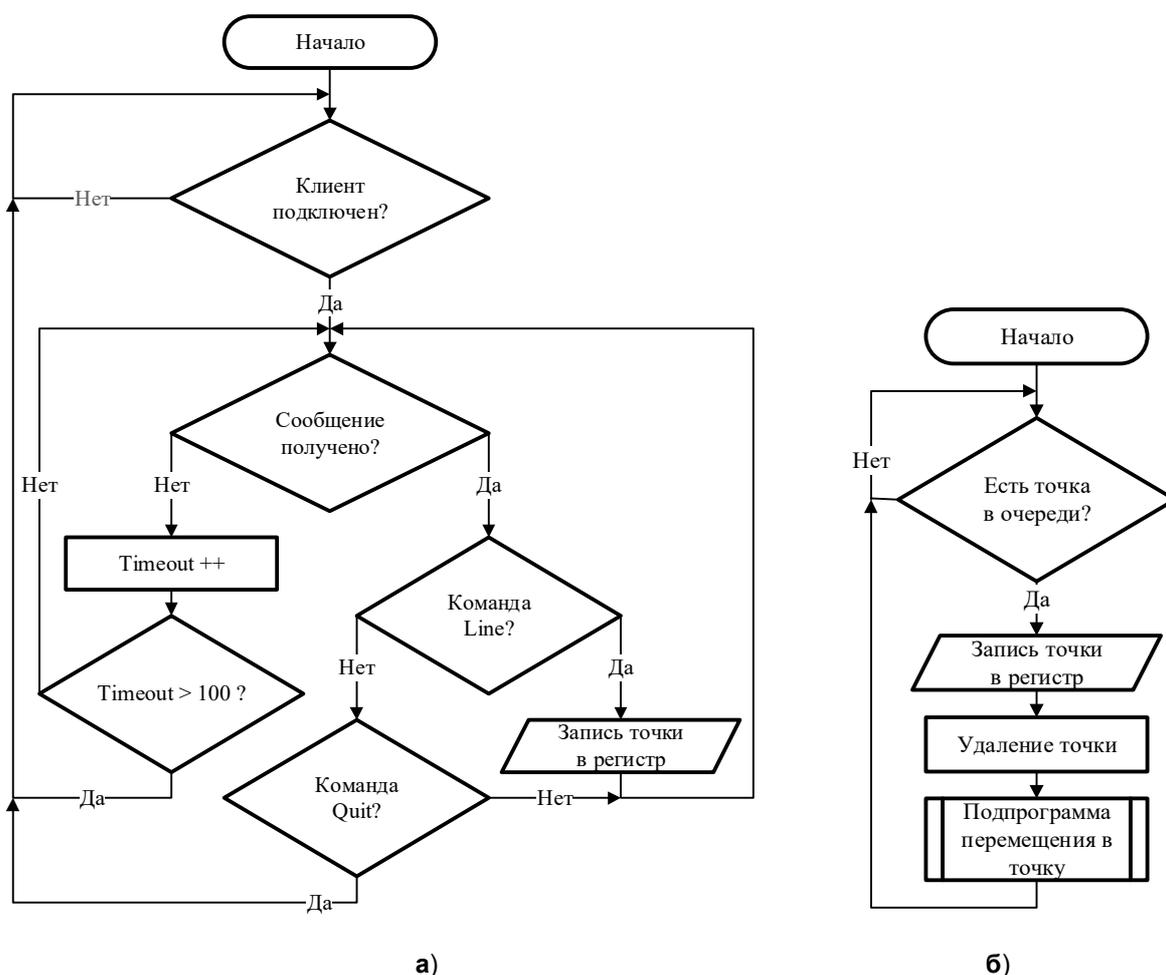


Рис. 2. Блок-схемы частей Server (а) и Robot (б) скрипта на языке Karel

Fig. 2. Block diagrams of the Server (a) and Robot (б) parts of the script in the Karel language

Модуль управления роботом на основе жестовых команд с использованием разработанного модуля сопряжения

Система управления мехатронным объектом представляет собой интер-

фейс взаимодействия человека и робота, который принимает команды от оператора в виде жестов. Система использует элементы технического зрения для бесконтактного получения входных

данных от пользователя. Разрабатываемый алгоритм управления подразумевает два режима работы: командный и манипулятивный режимы. Командный режим осуществляет выполнения базовых команд, которые не связаны с конкретными движениями манипулятора, но на которых строится вся структура управления, каждой жестовой команде соответствует определенная функциональная команда робота. При манипулятивном режиме функции рабочего органа робота, схожи с функциями руки человека. Протокол взаимодействия человека и робота представлен на рис. 3.

Модель бесконтактного управления робототехническим комплексом на основе жестовых команд реализуется в не-

сколько этапов. На первом этапе происходит сбор данных, который осуществляется элементами системы технического зрения. Затем на основе полученной информации формируется дескриптор, описывающий конкретный временной отрезок. Классификация действий происходит в соответствии с заранее определенными классами. В результате классификации действия-команды оператора, в пункте управления формируется управляющая команда роботу.

Для распознавания жестовых команд человека-оператора используется алгоритм, основанный на объединении изображений видеопоследовательности видимого спектра и карт глубины.

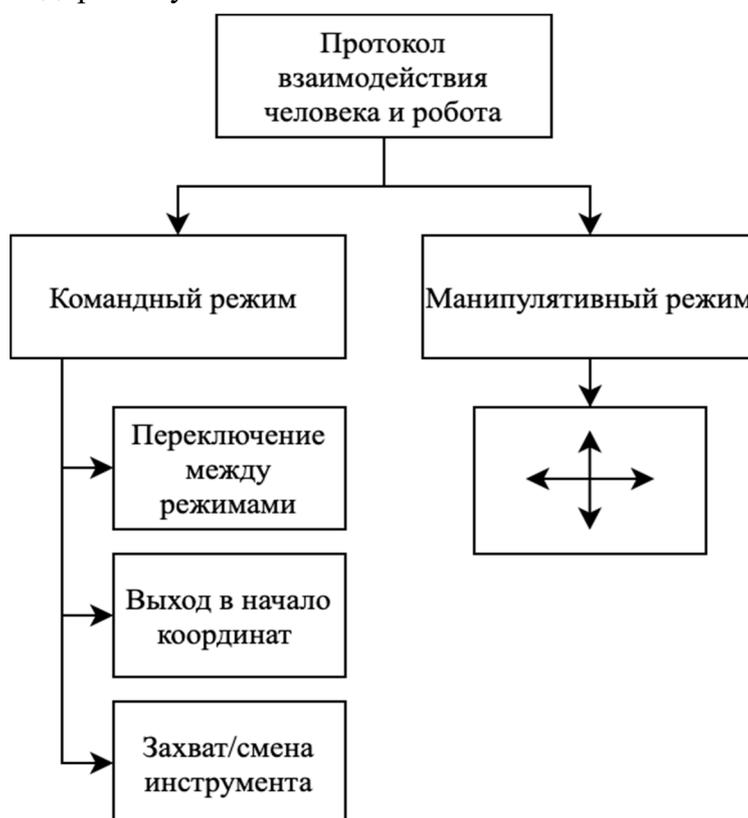


Рис. 3. Протокол взаимодействия человека и робота на основе жестовых команд в среде ROBOGUID

Fig. 3. Human-robot interaction protocol based on gesture commands in the ROBOGUID environment

Взаимоопыляемый характер информации, получаемой различными способами, позволяет повысить надежность и устойчивость распознавания [17], обеспечивает построение более информативного дескриптора [18, 19]. Общая структура алгоритма представлена на рис. 4.

Алгоритм включает следующие основные этапы: 1) совмещение входных изображений видимого спектра и данных глубины; 2а) свертка объединенных данных с трехмерными пространственно-временными фильтрами Габора и построение дескриптора с помощью алгоритма разности трехмерных двоичных микроблоков; 2б) извлечение скелета человека и построение дескриптора на основе геометрических особенностей расположения суставных (особых) точек скелета; 3) конкатенация дескрипторов, полученных на этапах 2а и 2б в единый вектор признаков; 4) классификация.

Эта структура имеет некоторые вариации и не требует строгого соблюдения правил реализации. Разнообразие и сложность задач распознавания, специфика особенностей выполняемых действий не позволяет реализовать единый универсальный подход к их решению. Представленный алгоритм позволяет пользователям обойти некоторые этапы реализации, если они, по их мнению, не рациональны, требуют значительных временных или вычислительных ресурсов.

Так, например, можно реализовать алгоритм без использования данных о глубине, в этом случае на вход подается только информация с датчика видимого спектра, а второй этап объединения данных пропускается.

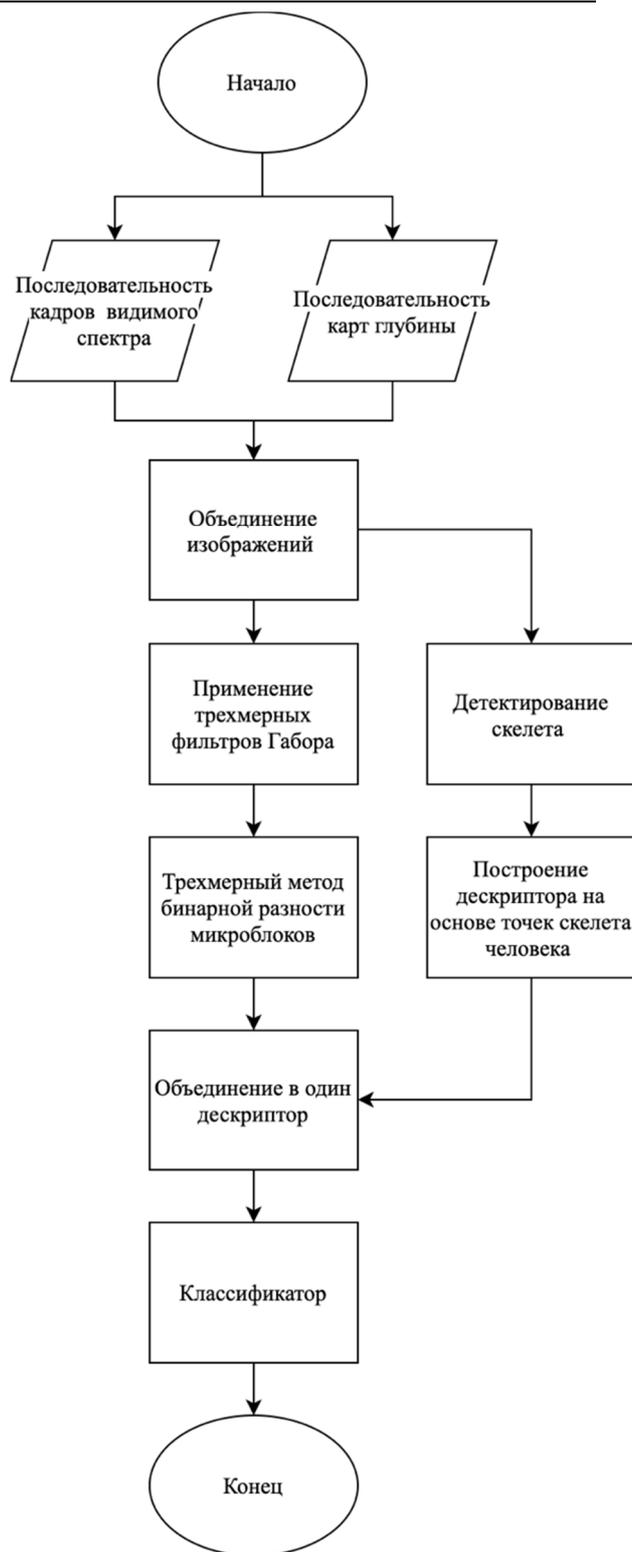


Рис. 4. Блок-схема алгоритма распознавания жестовых команд человека-оператора

Fig. 4. Block diagram of an algorithm for recognizing gesture commands of a human operator

Этап объединения данных и свертка с банком трехмерных фильтров Габора [20] подробно описаны в работе [21].

Объединение изображений осуществляется по следующей формуле:

$$f_{usedImage} = \hat{g}_1 \tilde{\oplus} \hat{g}_2 \tilde{\oplus} \hat{g}_3, \quad (1)$$

где g_1 – изображение видимого спектра; g_2 – изображение глубины; g_3 – максимум комбинированного изображения, полученного путем выбора максимального значения интенсивности глубины или видимого изображения в каждом местоположении пикселя; $\tilde{\oplus}$ – оператор сложения параметризованной модели логарифмической обработки изображений, \hat{g}_i – результат скалярного умножения параметризованной модели логарифмической

обработки изображений, как представлено ниже:

$$g_1 \tilde{\oplus} g_2 = g_1 + g_2 - \left(\frac{g_1 g_2}{\max(g_1, g_2)} \right), \quad (2)$$

$$\hat{g}_i = (\Omega_i \tilde{\oplus} g_i) - \max(g_i) \left(1 - \frac{g_i}{\max(g_i)} \right)^{\Omega_i}. \quad (3)$$

Константы Ω_i , представленные в [22] имеют следующие значения $\sum \Omega_i = 1$, $\Omega_1 = 0,2989$, $\Omega_2 = 0,5870$ и $\Omega_3 = 0,1141$.

Процедура применения фильтров Габора [20] к видеопоследовательности представлена на рис. 5 и выполняется на втором этапе предложенного алгоритма распознавания действий.

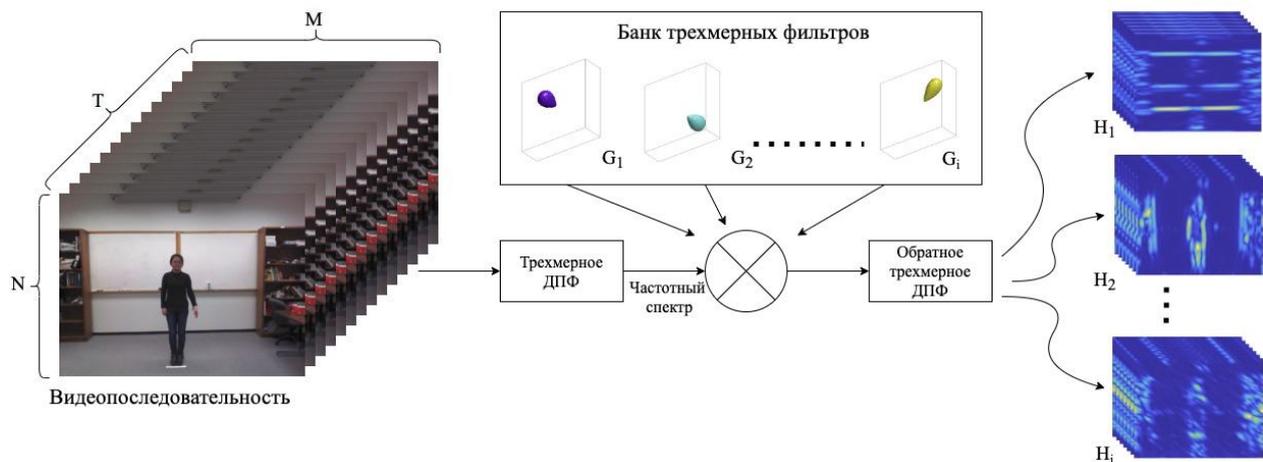


Рис. 5. Визуализация алгоритма применения фильтров Габора к видеопоследовательности

Fig. 5. Visualization of the algorithm for applying Gabor filters to a video sequence

Движение – важный элемент, который представляет выполняемое действие на сцене. Частотный спектр двумерного изображения лежит на плоскости, ориентация которой зависит от скорости модели. Имея двумерное изображение $f_0(x,y)$, можно создать объемную пространственно-временную

последовательность изображений, путем перемещения $f_0(x,y)$ со скоростью $\vec{u} = [u_1, u_2]$ во времени. Этот объем выражается как:

$$f(x,y,t) = f_0(x - u_1 t, y - u_2 t). \quad (4)$$

Трехмерное преобразование Фурье $F(x,y,t)$ в пространстве и времени вычисляется по следующей формуле:

$$F(f_x, f_y, f_t) = \frac{1}{MNT} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{T-1} f(x, y, t) e^{-j2\pi \left(\frac{xf_x}{M} + \frac{yf_y}{N} + \frac{tf_t}{T} \right)}, \quad (5)$$

где M , N , T – ширина, высота и длина видео соответственно, x , y , t – пространственно-временная позиция каждой точки в созданном пространстве. Трехмерное дискретное преобразование

$$F(f_x, f_y, f_t) = \frac{1}{MNT} \sum_{t=0}^{T-1} \left[\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f_0(x - u_1 t, y - u_2 t) e^{-j2\pi \left(\frac{xf_x}{M} + \frac{yf_y}{N} \right)} \right] e^{-j2\pi \left(\frac{tf_t}{T} \right)}. \quad (6)$$

Внутреннее слагаемое в формуле (6) – двумерное преобразование Фурье $f_0(x - u_1 t, y - u_2 t)$, может быть упрощено:

$$\begin{aligned} F(f_x, f_y, f_t) &= \\ &= \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} F_0(f_x, f_y) e^{-j2\pi \left(\frac{u_1 t f_x}{M} + \frac{u_2 t f_y}{N} \right)} e^{-j2\pi \left(\frac{t f_t}{T} \right)} = \\ &= F_0(f_x, f_y) \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} e^{-j2\pi t \left(\frac{u_1 f_x}{M} + \frac{u_2 f_y}{N} + \frac{f_t}{T} \right)}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $F_0(f_x, f_y)$ представляет собой двумерное преобразование Фурье $f_0(x, y)$. Преобразование Фурье комплексных компонент – условие дельта функции Дирака, отсюда получается

$$F(f_x, f_y, f_t) = F_0(f_x, f_y) \delta \left(\frac{u_1 f_x T}{M} + \frac{u_2 f_y T}{N} + f_t \right), \quad (8)$$

где δ – дельта функция Дирака. Таким образом, $F(f_x, f_y, f_t)$ будет иметь не нулевое значение на плоскости, проходящей через начало координат, как дельта функция, которая будет не нулевой только когда $\left(\frac{u_1 f_x T}{M} + \frac{u_2 f_y T}{N} + f_t \right) = 0$. Этот вывод показывает, что преобразование Фурье из сигнала, может быть рассчитано путем нахождения последователь-

Фурье имеет такой же объем, как и созданное пространство. После подстановки уравнения (4) в (5) и переставив условия, преобразование Фурье имеет вид:

ности плоскостей, содержащих движение. Объекты с различным движением будут вырабатывать частотные компоненты в разных плоскостях.

Для того чтобы отразить различные характеристики движений в сцене, применяется банк трехмерных фильтров Габора, составляющие которого отличаются ориентацией и масштабом. Передаточная функция каждого трехмерного фильтра настроена на частоту f_{r0} по направлению заданных полярными и азимутальными углами θ_0 и ϕ_0 в сферической системе координат:

$$G(f_r, \theta, \phi) = \exp \left\{ - \frac{(f_r - f_{r0})^2}{2\sigma_r^2} - \frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2} - \frac{(\phi - \phi_0)^2}{2\sigma_\phi^2} \right\}, \quad (9)$$

где $f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_t^2}$, а $\phi = \arctan \left(\frac{f_y}{f_x} \right)$ и

$$\theta = \arccos \left(\frac{f_t}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_t^2}} \right). \text{ Параметры } \sigma_r, \sigma_\theta \text{ и}$$

σ_ϕ – радиальные и угловые полосы, соответственно, определяющие удлинение фильтра в пространственно-временной частотной области.

Затем, каждый сгенерированный трехмерный фильтр применяется к частотному спектру клипа, и вычисляется выходной сигнал

$$\Gamma_i(f_x, f_y, f_t) = F(f_x, f_y, f_t) [G_i(f_x, f_y, f_t)], \quad (10)$$

где $\Gamma_i(f_x, f_y, f_t)$ выходной сигнал с применением i -го фильтра.

На следующем этапе вычисляется обратное преобразование Фурье:

$$H_i(x, y, t) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{T-1} f(x, y, t) e^{-j2\pi \left(\frac{xf_x}{M} + \frac{yf_y}{N} + \frac{tf_t}{T} \right)}. \quad (11)$$

В результате для каждого фильтра, из банка трехмерных фильтров Габора, получается вектор функции, который представляет отдельный клип, характеризующий определенное направление действий. Результирующий массив имеет размерность 4 (ширина кадра \times высота кадра \times количество кадров \times количество фильтров). После сокращения размерности массив сохраняет в себе пространственную информацию, как ответ на каждый фильтр.

Далее происходит построение трехмерной бинарной разности микроблоков (Алгоритм 1). Deskриптор, полученный на данном этапе, обеспечивает высоко-ориентированное представление областей изображения, путем плотного захвата микроблоков внутри каждой области в нескольких ориентациях и масштабах.

Алгоритм 1: Трехмерная бинарная разность между микроблоками

Вход: Videопоследовательность.

1. Разделение видеоряда на клипы по 3 кадра.

2. Разбиение клипа на трехмерные непересекающиеся патчи (каждый патч размером $16 \times 16 \times 3$).

3. Построение внутри каждого патча трехмерных кубоидов разного размера ($3 \times 3 \times 3$, $5 \times 5 \times 3$, $7 \times 7 \times 3$).

4. Вычисление расстояния Хэмминга между случайно выбранной парой кубоидов внутри каждого патча видеоклипа.

5. Объединение значений Хэмминга в единый вектор для каждого патча.

6. Конкатенация векторов каждого патча в единый вектор для всего клипа.

7. Шаг 2-6 повторяются последовательно для каждого из трех кадров всего видеоряда до тех пор, пока не будут достигнуты последние 3 кадра.

8. Конкатенация полученных векторов для каждого клипа в единый дескриптор для всей видеопоследовательности.

Выход: Deskриптор видеопоследовательности.

На первом этапе видеопоследовательность делится на пересекающиеся последовательности из трех кадров. Далее, каждая видеопоследовательность делится на трехмерные непересекающиеся патчи, размер каждого патча составляет $16 \times 16 \times 3$. Внутри каждого патча строятся кубоиды, количество которых может варьироваться. Координаты центральных пикселей для построения кубоидов выбираются случайным обра-

зом, но они фиксированы для кубоидов разного размера.

Кубоиды внутри трехмерных патчей строятся по принципу объемного локального двоичного паттерна (Volumetric Local Binary Pattern, VLBP) [23]. VLBP – это расширенный оператор локального бинарного шаблона для описания характеристик объекта в пространственно-временной области. Пространственно-временная информация в этом случае представлена таким образом, чтобы рассматривать последовательность кадров как объем (кубоид) и определять окрестность каждого пикселя в трехмерном пространстве.

Локальный бинарный шаблон (LBP) – широко используемый оператор для извлечения функций из двумерных изображений, который имеет превосходную надежность при распознавании образов [24]. В классической реализации LBP определяется как область размером 3×3 . В этой области значение интенсивности центрального пикселя, взятого за порог, сравнивается со значением соседних 8 пикселей (12). Если значение пикселя превышает пороговое значение, этому пикселю присваивается 1, в противном случае – 0 (13). Таким образом, результатом применения основного оператора LBP к пикселю является 8-битный двоичный код, описывающий окрестность этого пикселя [24].

$$\text{LBP}_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} f(i_p - i_c) 2^p, \quad (12)$$

где P – круговая окрестность пикселей (в классической реализации рассматри-

вается 8 соседних пикселей, т.е. $P=8$); R – радиус; i_p – интенсивность пикселей круговой окрестности ($p=0, 1, \dots, P-1$), i_c – интенсивность центрального пикселя; $f(x)$ – это функция, которая записывает «1», если центральный пиксель меньше или равен соседнему, иначе – «0»:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } i_p \geq i_c, \\ 0, & \text{если } i_p < i_c. \end{cases} \quad (13)$$

Чтобы расширить LBP для анализа динамической текстуры V , динамическая текстура определяется в локальной области последовательности кадров. VLBP определяется в подобъеме $3 \times 3 \times 3$. При вычислении оператора VLBP двоичный код строится по аналогии с LBP, но соседние пиксели, расположенные в предыдущем и следующем кадрах, также сравниваются с центральным пикселем, как показано на рис. 6.

VLBP рассчитывается следующим образом [22]:

$$\begin{aligned} V = & v(i_{t_c-L,c} - i_{t_c,c}, i_{t_c-L,0} - i_{t_c,c}, \dots, \\ & i_{t_c-L,p-1} - i_{t_c,c}, i_{t_c,c}, i_{t_c,0} - i_{t_c,c}, \dots, \\ & i_{t_c,p-1} - i_{t_c,c}, i_{t_c+L,0} - i_{t_c,c}, \dots, i_{t_c+L,p-1} - i_{t_c,c}, \\ & i_{t_c+L,c} - i_{t_c,c}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $i_{t_c,c}$ – соответствует значению интенсивности уровня серого центрального пикселя окрестности локального объема; $i_{t_c-L,c}$ и $i_{t_c+L,c}$ – соответствуют значениям уровня серого центральных пикселей в предыдущем и следующем кадрах с интервалом времени L ;

$i_{t,p} (t=t_c-L, t_c, t_c+L; p=0, \dots, P-1)$ соответствуют значениям интенсивности уровней серого пикселей P одинаково разнесенных на окружности радиусом $R (R>0)$ в изображении t , которые образуют круговое симметричное множество соседних пикселей.

Этот оператор фиксирует появление различных паттернов в окрестности каждого пикселя на $(2(P+1)+P=3P+2)$ -мерной гистограмме [23].

Процедура вычисления оператора большого локального двоичного шаблона показана на рис. 7.

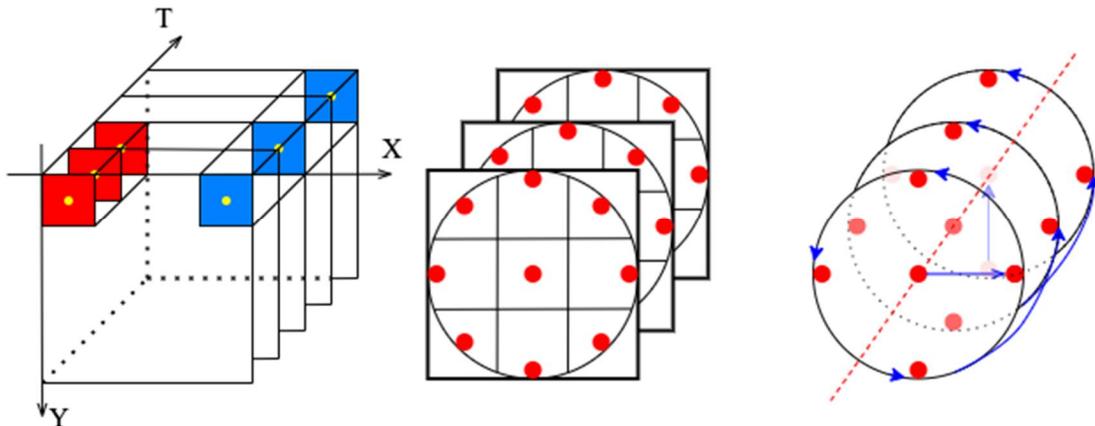


Рис. 6. Принцип построения кубоида внутри пространственно-временного фрагмента видеопоследовательности [23]

Fig. 6. The principle of constructing a cuboid inside a space-time fragment of a video sequence [23]

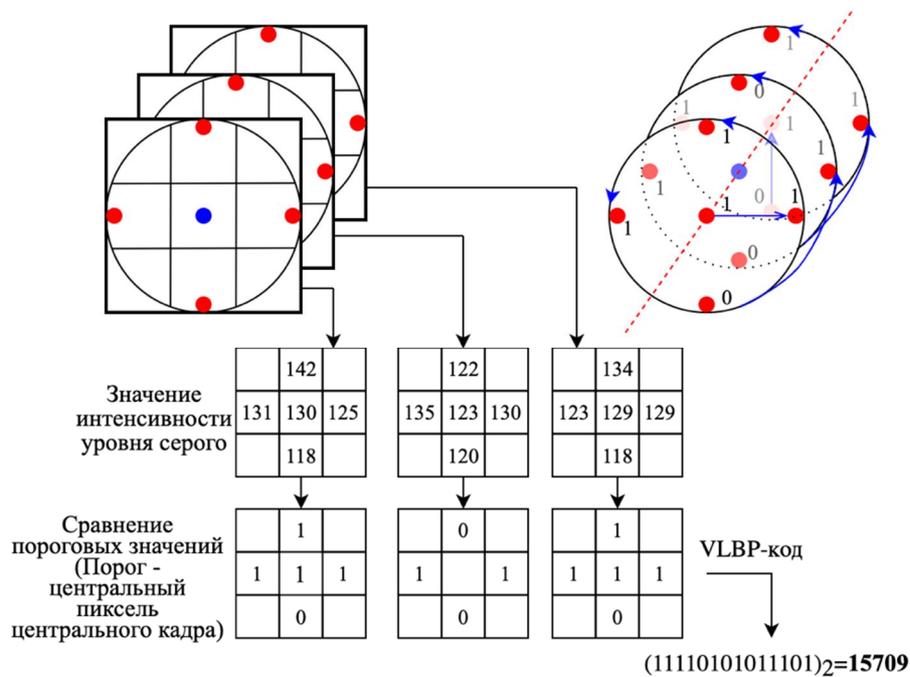


Рис. 7. Пример процедуры расчета VLBP с параметрами L=1, P=4, R=1

Fig. 7. An example of a VLBP calculation procedure with parameters L=1, P=4, R=1

Рассмотрим пример построения оператора объемной VLBP для кубоидов внутри трехмерного фрагмента видеопоследовательности в соответствии с рис. 8. На рисунке схематично показаны 3 последовательных кадра и построены пары кубоидов, для которых оператор VLBP рассчитывается, как описано выше. Кубоиды обозначены

светло-серым и темно-серым цветами. Красные линии соединяют кубоиды между двоичными кодами VLBP, для которых будет вычислено расстояние Хэмминга (красные линии отмечены только на первом рисунке кубоидами радиуса $R = 1$, во избежание перегруженности рисунков с кубоидами радиусом $R=2$ и $R=3$).

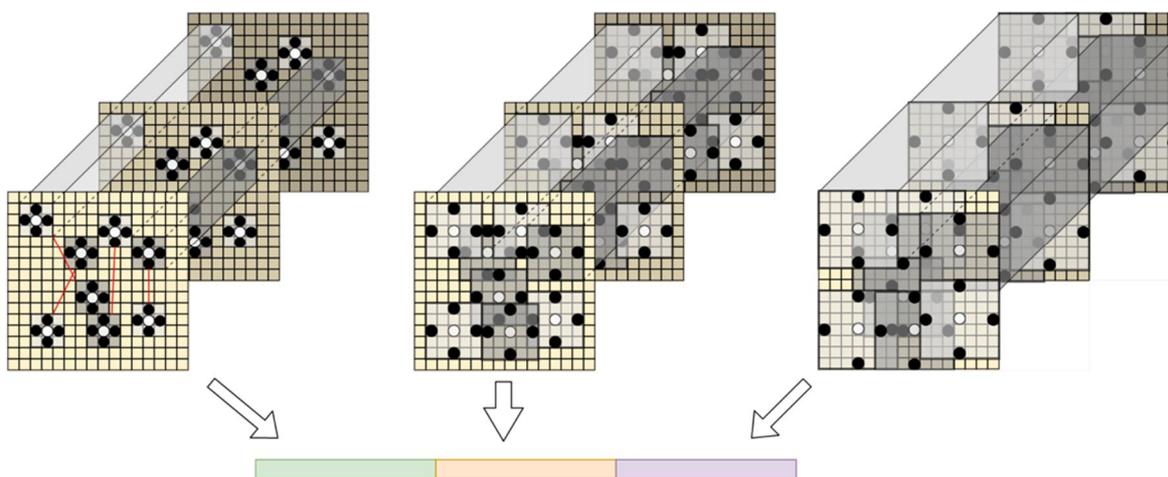


Рис. 8. Пример построения кубоидов в трехмерном патче размером $16 \times 16 \times 3$

Fig. 8. An example of building cuboids in a 3D patch with a size of $16 \times 16 \times 3$

На рис. 7 показан размер трехмерного патча $16 \times 16 \times 3$, кубоиды размерами $3 \times 3 \times 3$, $5 \times 5 \times 3$ и $7 \times 7 \times 3$. Координаты центральных пикселей (C) выбраны случайным образом – отмечены белым цветом. После выбора центральных координат кубоида они остаются фиксированными и сохраняются для каждого фрагмента видеопоследовательности. Соседние пиксели ($P=4$) расположены на равном расстоянии от центрального с радиусом $R=1,2,3$ – схематично отмечены черным цветом. В качестве примера на рис. 7 представлено всего 8 кубоидов, на практике их количество может варьироваться. Затем для каждой пары

кубоидов (на рис. 7, соединенных красной линией) вычисляется расстояние Хэмминга [25]. Значения, полученные для каждой пары кубоидов разного размера, последовательно записываются в один вектор, который характеризует трехмерный фрагмент в нескольких разрешениях.

Расстояние Хэмминга d_{xy} – это количество позиций, в которых соответствующие символы двух векторов одинаковой длины x_i и y_i различны:

$$d_{xy} = \sum_{i=1}^n |x_k - y_k|. \quad (15)$$

Оператор трехмерной бинарной разности между микроблоками рассчи-

тывается только для трех кадров, предполагается, что он будет применяться последовательно к следующим кадрам для всего видео с построением гистограммы для каждого трех кадров. Все полученные гистограммы последовательно объединяются в один результирующий вектор признаков для многокадрового обучения.

Предлагаемые функции извлекают информацию из фрагмента изображения на трех разных уровнях: разрешение, ориентация и масштаб. Одновременное извлечение микроблоков разного размера приводит к их описанию в нескольких разрешениях. Случайный выбор центральных координат кубоидов облегчает получение информации в нескольких направлениях. Масштабная инвариантность достигается за счет изменения расстояния между точками [26].

Использование оператора локального бинарного шаблона для вычисления гистограммы кубоида дает ряд преимуществ: инвариантность относительно яркости, относительно низкие вычислительные затраты за счет бинарных вычислений.

Для повышения производительности и эффективности системы распознавания действий параллельно с построением трехмерного дескриптора бинарной разности между микроблоками анализируется скелет человека [27] и строится дескриптор на основе геометрических признаков, которые информативно описывают расстояния между суставами тела человека, как описано в [21].

На заключительном этапе дескрипторы подаются в классификатор для категоризации действий, выполняемых на видеопоследовательности. Этот этап можно охарактеризовать двумя подходами: объединение дескриптора скелета и трехмерной бинарной разности микроблоков в один вектор и его классификация, или классификация каждого из дескрипторов отдельно, с присвоением веса каждому из них, и последующем принятием решения. В этой статье предлагается классифицировать дескрипторы отдельно с помощью мультиклассовой SVM с последующим принятием решения о категоризации действий, происходящих в видеоклипе [21].

После принятия решения о категории действия, происходящем во входной видеопоследовательности, алгоритм на персональном компьютере через виртуальный TCP/IP порт передает в среду ROBOGuid команду роботу.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные результаты модуля управления роботом на основе жестовых команд

В настоящее время нет существующего стандартизированного набора жестовых команд, предназначенного для управления роботом, на основе которого можно проверить эффективность методов распознавания действий, поэтому представленный алгоритм распознавания жестовых команд был протестирован на общедоступном наборе данных UCF101 [28]. Это набор данных для

распознавания действий реалистичных видеороликов, собранных с YouTube, имеет 101 категорию действий. Сложность представленной базы данных заключается в движении камеры, вариациях внешнего вида и позы объектов, масштаба, точек обзора, условий освещения, загроможденном фоне и т.д. Использование данного тестового набора позволяет сравнить предложенный алгоритм с существующими подходами.

Для эксперимента были выбраны видеоролики на которых человек, выполняющий действие, представлен в полный рост, присутствует изменения освещения, неоднородность фона, присутствуют амплитудные движения руками. Таким образом, алгоритм был протестирован на следующих действиях: бокс, толчок и прыжок, джек-прыжок, тай-чи, приседания с собственным весом, скакалка, жим лежа, отжимания, хула-хуп, жонглирование мячами и йо-йо.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1. Эффективность

предложенного алгоритма сравнивается с популярными методами (iDT + HSV, Two-stream + LSTM, LTC) [29]. Под эффективностью подразумевается точность классификации – отношение правильно распознанных объектов к количеству всех образцов:

$$Acc = \frac{TP}{TP+FP} \cdot 100\%, \quad (16)$$

где TP – правильно идентифицированные образцы; FP – образцы с ошибкой распознавания; TP+FP – весь тестовый набор.

Анализ полученных результатов показывает, что эффективность разработанного метода относительно высока. Предлагаемый метод имеет следующие преимущества по сравнению с существующими в настоящее время методами: это не итеративный, вычислительно привлекательный алгоритм, который оптимизирует использование (глобальной) пространственной/временной и динамической информации и имеет разумное время вычислений.

Таблица 1. Точность распознавания действия на тестовых видео из набора данных UCF101

Table 1. Accuracy of action recognition on test videos from the UCF101 dataset

Методы / Methods	Acc (%)
iDT+HSV	87,9
Two-stream+LSTM	88,6
LTC	91,7
Предложенный алгоритм	93,2

Исследование разработанного модуля сопряжения на примере обработки сложного пространственного контура

Разработанный модуль сопряжения был использован на примере обработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали. Тестовый контур состоял из 73589 точек и включал в себя линейные и сплайновые участки. Интерполируемые точки были сформированы таким образом, что учитывали алгоритмы с образного планирования подач и сгла-

живания траектории инструмента кубическим B -сплайном, обеспечим траектории геометрическую непрерывность G^2 . Вставка сплайнов выполнялась в системе координат детали, в которой дополнительно была введена СК вращательного движения для реализации алгоритма сглаживания ориентации инструмента, представляющей собой единичный вектор, перпендикулярный обрабатываемой поверхности. Результаты визуализации обработки контура показаны на рис. 8.

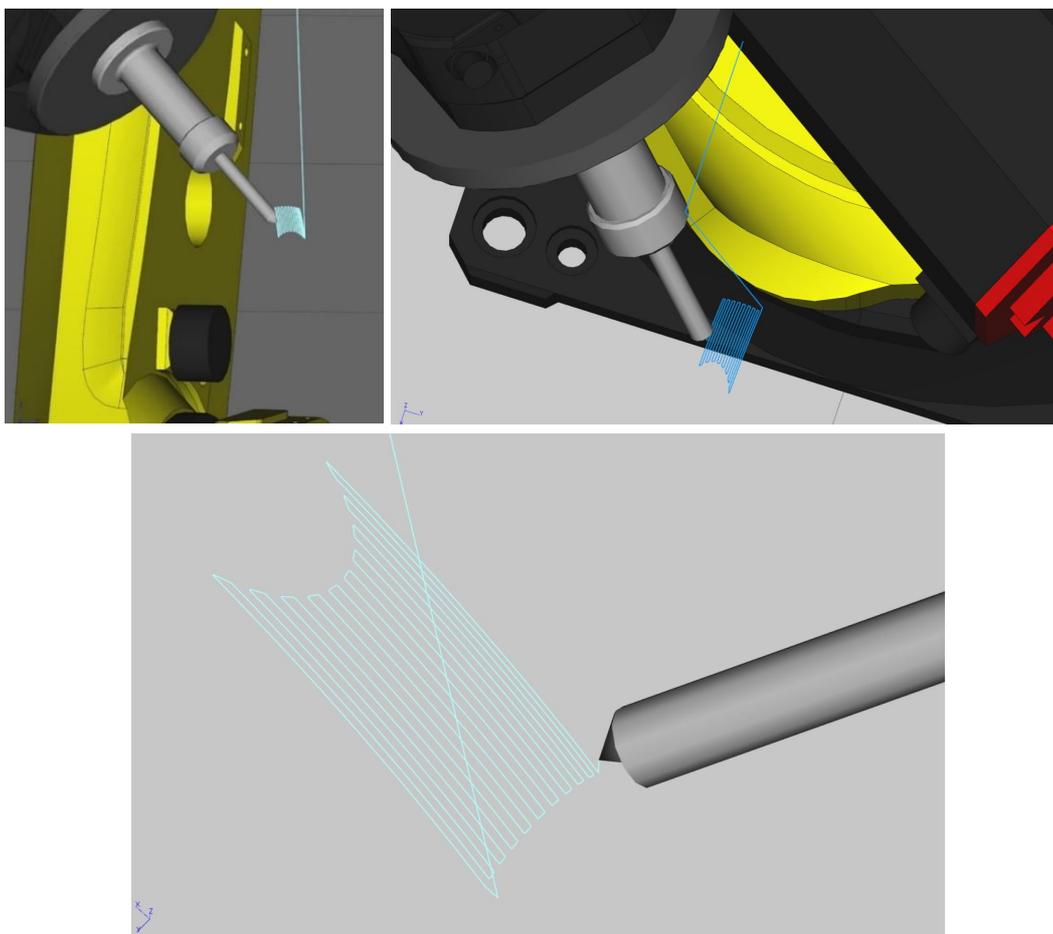


Рис. 8. Траектория движения инструмента на примере обработки сложного пространственного контура в среде ROBOGuid

Fig. 8. Tool path using the example of complex spatial contour development in the ROBOGuid environment

Выводы

1. На современном этапе развития производства необходимо использовать современное высокотехнологическое оборудование, к числу которых относятся промышленные роботы и сложные обрабатывающие центры, а также средства имитационного моделирования для снижения времени переналадки оборудования и отладки технологии обработки в рамках освоения новой продукции, что существенно снижает материальные и трудовые затраты.

2. Средства имитационного моделирования можно использовать не только для разработки и отладки технологических программ, но и для апробации собственных методов и алгоритмов управления посредством интеграции

собственного программного обеспечения в средства моделирования.

3. В рамках разработки системы управления роботом и исследования разработанных алгоритмов и методов был использован программный пакет ROBOGUID от компании Fanuc, была разработана программа передачи информации о целевых точках движения инструмента через виртуальный TCP/IP порт и скрипт для отработки целевых точек в среде моделирования.

4. Разработанный модуль сопряжения был использован на примере отработки сложного пространственного контура, имитирующего фрезерование детали, а метод отладки алгоритмов и методов системы управления показал свою эффективность и необходимость развития этого направления.

Список литературы

1. Индустрия 4.0 в станкостроении / А. А. Грибков, М. С. Морозкин, В. Р. Купцов, П. М. Пивкин, А. А. Зеленский // *СТИН*. 2021. № 4: 9-11. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44870393>

2. SinuTrain for SINUMERIK Operate. Siemens; 2021 [прочитано 10 ноября 2021]. <https://new.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/sinutrain-uebersicht.html>.

3. ShopTurn; 2021 [прочитано 10 ноября 2021]. Доступно: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583248&tld=ru&lang=ru&name=TUST_0404_ru.pdf&text=ShopTurn&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/019/28803019/att_32871/v1/TUST_0404_ru.pdf&lr=213&mime=pdf&ln=ru&sign=d0d5accb52e1d8a43751b49e7d44e6ce&keyno=0.

4. ShopMill; 2021 [прочитано 10 ноября 2021]. Доступно: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583319&tld=ru&lang=ru&name=TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&text=Shop-Shop-

Mill&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/295/41131295/att_80704/v1/TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=89ed36f9c3c96b52801a3f382b11df71&keyno=0.

5. Vericut; 2021 [процитировано 10 ноября 2021]. Доступно: <http://vericut.ru/index.php/products/products>

6 Simulate Robot Applications. RoboDK; 2021 [процитировано 11 ноября 2021]. Доступно: <https://robodk.com/index>.

7. ROBOGuid; 2021 [процитировано 11 ноября 2021]. Доступно: <https://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/принадлежности/roboguide>.

8. Высокопроизводительная система числового программного управления на базе программируемых логических интегральных схем / А.А. Зеленский, М.А. Харьков, С.П. Ивановский, Т.Х. Абдуллин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018, 14(5): 8–12.

9. Высокопроизводительная цифровая система на основе ПЛИС для управления движением многокоординатных станков и промышленных роботов / А.А. Зеленский, Т.Х. Абдуллин, Ю.В. Илюхин, М.А. Харьков // *СТИН*. 2019, (8): 5-8.

10. Зеленский А.А., Абдуллин Т.Х., Алепко А.В. Особенности построения в реальном времени s-образной кривой разгона/торможения при кусочно-линейной интерполяции поверхностей сложной формы. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2021, 9 (3): 17–26.

11. Zhao H., Zhu L.M., Ding H. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013, 65: 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.005>

12. Using neuro-accelerators on FPGAs in collaborative robotics tasks. *Proceedings Volume 11876 / A. Zelensky, E. Semenishchev, A. Alepko, T. Abdullin, Y. Ilyukhin, V. Voronin // Optical Instrument Science, Technology, and Applications II*. 2021, 118760O. <https://doi.org/10.1117/12.2600582>

13. Heterogeneous neuromorphic processor based on risc-v architecture for real-time robotics tasks / A. Zelensky, A. Alepko, V. Dubovskov, V. Kuptsov // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2. Сер. "Artificial Intelligence and Machine Learning in Defense Applications II". 2020, 115430L. <https://doi.org/10.1117/12.2574470>

14. Karel. Википедия; 2021 [обновлено 14 февраля 2021; процитировано 10 ноября 2021]. Доступно: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Karel>.

15. TCP/IP. Википедия; 2021 [обновлено 28 октября 2021; процитировано 10 ноября 2021]. Доступно: <https://ru.wikipedia.org/wiki/TCP/IP>.
16. Chen C., Jafari R., Kehtarnavaz N. UTD-MHAD: A Multimodal Dataset for Human Action Recognition Utilizing a Depth Camera and a Wearable Inertial Sensor. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2015.7350781>
17. Serrano-Cuerda J., Fernández-Caballero A., López M. Selection of a visible-light vs. thermal infrared sensor in dynamic environments based on confidence measures. *Applied Sciences*. 2014, 4(3): 331-350. <https://doi.org/10.3390/app4030331>
18. Модель объединения изображений, полученных с датчиков различной природы / М.М. Жданова, В.В. Воронин, Р.А. Сизякин, Н.В. Гапон, О.С. Балабаева // *Динамика технических систем «ДТС-2019»: сб. тр. XV междунар. науч.-техн. конф.* 2019, 81-84.
19. Fusion of color and depth information for human actions recognition / V. Voronin, M. Zhdanova, E. Semenishchev, A. Zelensky, O. Tokareva // *Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIX*. 2020, Т. 11423. <https://doi.org/10.1117/12.2560130>.
20. Solmaz B., Assari S. M., Shah M. Classifying web videos using a global video descriptor. *Machine vision and applications*. 2013, 24(7): 1473-1485. <https://doi.org/10.1007/s00138-012-0449-x>
21. Human activity recognition for efficient human-robot collaboration / M. Zhdanova, V. Voronin, E. Semenishchev, Y. Ilyukhin, A. Zelensky // *Proc. International Society for Optics and Photonics*. 2020, 115430K. <https://doi.org/10.1117/12.2574133>.
22. Wan Q. et al. Face description using anisotropic gradient: thermal infrared to visible face recognition. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications*. 2018, 106680V. <https://doi.org/10.1117/12.2304898>.
23. Zhao G., Pietikäinen M. Dynamic texture recognition using volume local binary patterns. *Springer*. 2006, 165-177. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70932-9_13.
24. Maenpaa T. The Local Binary Pattern Approach to Texture Analysis: Extensions and Applications. 2004. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=8860330>.
25. Parametric local multiview hamming distance metric learning / D. Zhai, X. Liu, H. Chang, Y. Zhen, X. Chen, M. Guo, W. Gao // *Pattern Recognition*. 2018, 75: 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.018>
26. Mehta R., Eguiazarian K. E. Texture classification using dense micro-block difference. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2016, 25(4): 1604-1616 <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2526898>.

27. Belagiannis V., Zisserman A. Recurrent human pose estimation. *12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. 2017: 468-475. <https://doi.org/10.1109/FG.2017.64>

28. Soomro K., Zamir A. R., Shah M. UCF101: A Dataset of 101 Human Action Classes From Videos in The Wild. *CRCV-TR-12-01*. 2012. <https://arxiv.org/abs/1212.0402>

29. Bag of visual words and fusion methods for action recognition: comprehensive study and good practice / X. Peng, L. Wang, X. Wang, Y. Qiao // *Computer Vision and Image Understanding*. 2016, 150: 109-125 <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.03.013>

References

1. Gribkov A. A., Pivkin P. M., Zelenskii A. A. Industriya 4.0 v stankostroenii [State Industrial Policy and the Machine-Tool Industry]. *Russian Engineering Research*. 2021, 41(4): 342-346. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21040092>

2. SinuTrain for SINUMERIK Operate. Siemens; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <https://new.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/sinutrain-uebersicht.html>.

3. ShopTurn; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583248&tld=ru&lang=ru&name=TUST_0404_ru.pdf&text=ShopTurn&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/019/28803019/att_32871/v1/TUST_0404_ru.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=d0d5accb52e1d8a43751b49e7d44e6ce&keyno=0.

4. ShopMill; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: https://docviewer.yandex.ru/?tm=1634583319&tld=ru&lang=ru&name=TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&text=ShopMill&url=https%3A//support.industry.siemens.com/dl/files/295/41131295/att_80704/v1/TUSM_1209_ru_ru-RU.pdf&lr=213&mime=pdf&l10n=ru&sign=89ed36f9c3c96b52801a3f382b11df71&keyno=0.

5. Vericut; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <http://vericut.ru/index.php/products/products>

6. Simulate Robot Applications. RoboDK; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <https://robodk.com/index>.

7. ROBOGUID; 2021 [cited November 10, 2021]. Access: <https://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы/принадлежности/roboguide>.

8. Zelensky A.A., Kharkov M.A., Ivanovsky S.P., Abdullin T.Kh. Vysokoproduktivnaya sistema chislovogo programmogo upravleniya na baze programmiruyemykh logicheskikh integral'nykh skhem [High-performance numerical control system based on programmable logic integrated circuits]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018, 14(5): 8–12. (In Russ.)

9. Zelenskii A.A., Abdullin T.Kh., Ilyukhin Yu.V., Kharkov M.A. Vysokoproizvoditel'naya tsifrovaya sistema na osnove PLIS dlya upravleniya dvizheniyem mnogokoordinatnykh stankov i promyshlennykh robotov [High performance FPGA based digital motion control system for multi-axis machine tools and industrial robots]. *STIN=STIN*. 2019, (8): 5-8. (In Russ.)

10. Zelenskii A.A., Abdullin T.Kh., Alepko A.V. Osobennosti postroyeniya v real'nom vremeni s-obraznoy krivoy razgona/tormozheniya pri kusochno-lineynoy interpolyatsii poverkhnostey slozhnoy formy [Features of real-time construction of an s-shaped acceleration / deceleration curve with piecewise-linear interpolation of complex-shaped surfaces]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika= Robotics and technical cybernetics*. 2021, 9 (3): 17–26. (In Russ.)

11. Zhao H., Zhu L.M., Ding H. A real-time look-ahead interpolation methodology with curvature-continuous B-spline transition scheme for CNC machining of short line segments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013, 65: 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.005>

12. Zelensky A., Semenishchev E., Alepko A., Abdullin T., Ilyukhin Y., Voronin V. Using neuro-accelerators on FPGAs in collaborative robotics tasks. *Proceedings Volume 11876, Optical Instrument Science, Technology, and Applications II*. 2021, 118760O. <https://doi.org/10.1117/12.2600582>

13. Zelensky A., Alepko A., Dubovskov V., Kuptsov V. Heterogeneous neuromorphic processor based on risc-v architecture for real-time robotics tasks. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2. Ser. "Artificial Intelligence and Machine Learning in Defense Applications II"*. 2020, 115430L. <https://doi.org/10.1117/12.2574470>

14. Karel. Wikipedia; 2021 [updated February 14, 2021; cited November 10, 2021]. Access: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Karel>.

15. TCP/IP. Wikipedia; 2021 [updated October 28, 2021; cited November 10, 2021]. Access: <https://ru.wikipedia.org/wiki/TCP/IP>.

16. Chen C., Jafari R., Kehtarnavaz N. UTD-MHAD: A Multimodal Dataset for Human Action Recognition Utilizing a Depth Camera and a Wearable Inertial Sensor. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2015.7350781>.

17. Serrano-Cuerda J., Fernández-Caballero A., López M. Selection of a visible-light vs. thermal infrared sensor in dynamic environments based on confidence measures. *Applied Sciences*. 2014, 4(3): 331-350. <https://doi.org/10.3390/app4030331>

18. Zhdanova M.M., Voronin V.V., Sizyakin R.A., Gapon N.V., Balabaeva O.S. Model' ob'yedineniya izobrazheniy, poluchennykh s datchikov razlichnoy prirody [A model for

combining images obtained from sensors of different nature]. *Dinamika tekhnicheskikh sistem «DTS-2019»: sb. tr. XV mezhdunar. nauch.-tekhn. Konf. = Proc. Dynamics of technical systems "DTS-2019"*. 2019, 81-84. (In Russ.)

19. Voronin V., Zhdanova, M., Semenishchev, E., Zelensky, A., Tokareva, O. Fusion of color and depth information for human actions recognition. *Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXIX*. 2020, T. 11423. <https://doi.org/10.1117/12.2560130>.

20. Solmaz B., Assari S. M., Shah M. Classifying web videos using a global video descriptor. *Machine vision and applications*. 2013, 24(7): 1473-1485. <https://doi.org/10.1007/s00138-012-0449-x>

21. Zhdanova M., Voronin V., Semenishchev E., Ilyukhin Y., Zelensky A. Human activity recognition for efficient human-robot collaboration. *Proc. International Society for Optics and Photonics*. 2020, 115430K. <https://doi.org/10.1117/12.2574133>.

22. Wan Q. et al. Face description using anisotropic gradient: thermal infrared to visible face recognition. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications*. 2018, 106680V. <https://doi.org/10.1117/12.2304898>

23. Zhao G, Pietikäinen M. Dynamic texture recognition using volume local binary patterns. *Springer*. 2006, 165-177. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70932-9_13

24. Maenpaa T. The Local Binary Pattern Approach to Texture Analysis: Extensions and Applications. 2004. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=8860330>.

25. Zhai D., Liu X., Chang H., Zhen Y., Chen X., Guo M., Gao W. Parametric local multiview hamming distance metric learning. *Pattern Recognition*. 2018, 75: 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.06.018>

26. Mehta R., Eguiazarian K. E. Texture classification using dense micro-block difference. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2016, 25(4): 1604-1616 <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2526898>.

27. Belagiannis V., Zisserman A. Recurrent human pose estimation. *12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. 2017: 468-475. <https://doi.org/10.1109/FG.2017.64>

28. Soomro K., Zamir A. R., Shah M. UCF101: A Dataset of 101 Human Action Classes From Videos in The Wild. *CRCV-TR-12-01*. 2012. <https://arxiv.org/abs/1212.0402>

29. Peng X., Wang L., Wang X., Qiao Y. Bag of visual words and fusion methods for action recognition: comprehensive study and good practice. *Computer Vision and Image Understanding*. 2016, 150: 109-125 <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.03.013>

Информация об авторах / Information about the Authors

Зеленский Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, директор Института цифровых интеллектуальных систем МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3464-538X>, Researcher ID: AAG-2201-2019

Alexander A. Zelensky, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Digital Intelligent Systems MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: a.zelenskiy@stankin.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3464-538X>, Researcher ID: AAG-2201-2019

Жданова Мария Михайловна, младший научный сотрудник МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mpismenskova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1119-5221>, Researcher ID: A-2068-2014

Marina M. Zhdanova, Junior Researcher of MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: mpismenskova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1119-5221>, Researcher ID: A-2068-2014

Абдуллин Тагир Хабибович, ведущий инженер, преподаватель кафедры «Промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем», МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: everestultimate@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2910-5477>

Tagir Kh. Abdullin, Leading Engineer, Lecturer at the Department of Industrial Electronics and Intelligent Digital Systems of MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: everestultimate@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2910-5477>

Воронин Вячеслав Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора центра когнитивных технологий и машинного зрения МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: voronin_sl@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-6383>, Researcher ID: H-7334-2013

Viacheslav V. Voronin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director of the Center for Cognitive Technologies and Machine Vision of MSTU «STANKIN», Moscow, Russian Federation e-mail: voronin_sl@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-6383>, Researcher ID: H-7334-2013