

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 621.397:634.11-021.465
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>

Поступила в редакцию 31.08.2021
Received 31.08.2021

П. П. Казакевич¹, А. Н. Юрин², Г. А. Прокопович³

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Беларусь

³Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЯБЛОК:
ОБОСНОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЕ**

Аннотация: Наиболее рациональным методом идентификации качества плодов является оптический метод с использованием СИЗ, обладающий точностью и стабильностью измерения, а также дистанционностью и высокой производительностью. В статье представлена классификация систем распознавания качества плодов и обоснована конструктивно-технологическая схема системы технического зрения для их сортировки, состоящая из оптического модуля с установленной структурной подсветкой и видеокамерой, электронного блока управления с интерфейсом и исполнительными механизмами сортировщика и конвейера для плодов. В процессе исследования обоснованы однопоточный тип потока плодов в СИЗ с принудительным их вращением, конструктивно-технологическая схема СТЗ с питающим конвейером, оптическим модулем и блоком управления, разработано программное обеспечение СТЗ на основе алгоритма сегментации цветов плодов, алгоритма трекинга и глубокого обучения ИНС, обеспечивающее распознавание размеров и цветов плодов, а также повреждений от механического воздействия, вредителей и болезней. Разработанная СТЗ внедрена в технологическую линию сортировки и фасовки яблок, ЛСП-4 успешно прошла предварительные испытания и производственную проверку в ОАО «Остромечево». В ходе предварительных испытаний линии ЛСП-4 установлено, что она обеспечивает распознавание плодов с вероятностью не менее 95 %, при этом производительность труда составляет 2,5 т/ч. **Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственной научно-технической программы «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Белсельхозмеханизация-2025».

Ключевые слова: яблоки, повреждения плодов, линия сортировки яблок, система технического зрения, распознавание плодов, алгоритм сегментации, трекинг, искусственная нейронная сеть, глубокое обучение, суперпиксели

Для цитирования: Казакевич, П. П. Система технического зрения распознавания дефектов яблок: обоснование, разработка, испытание / П. П. Казакевич, А. Н. Юрин, Г. А. Прокопович // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 488–500. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>

Petr P. Kazakevich¹, Anton N. Yurin², Grigory A. Prokopovich³

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Scientific and Production Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization,
Minsk, Belarus

³Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**TECHNICAL VISION SYSTEM FOR APPLE DEFECTS RECOGNITION:
JUSTIFICATION, DEVELOPMENT, TESTING**

Abstract: The most rational method for identifying the quality of fruits is the optical method using PPE, which has the accuracy and stability of measurement, as well as distance and high productivity. The paper presents classification of fruit quality recognition systems and substantiates the design and technological scheme of the vision system for sorting them, consisting of an optical module with installed structural illumination and a video camera, an electronic control unit with an interface and actuators for the sorter and conveyor for fruits. In the course of the study, a single-stream type of fruit flow in PPE with forced rotation

was substantiated, a structural and technological scheme of an STZ with a feeding conveyor, an optical module and a control unit, an algorithm for functioning of the STZ software was developed based on algorithm for segmentation of fruit colors, tracking algorithm, etc. deep learning ANN, which provide recognition of the size and color of fruits, as well as damage from mechanical stress, pests and diseases. The developed STZ has been introduced into the processing line for sorting and packing apples, LSP-4 has successfully passed preliminary tests and production tests at OJSC Ostromechevo. In the course of preliminary tests of the LSP-4 line, it was found that it provided fruit recognition with a probability of at least 95%, while the labor productivity made 2.5 t/h. **Acknowledgments.** The research was carried out as part of the State Research and Technical Program “Innovative agroindustrial and food technologies” for 2021-2025, subprogram “Belselkhozmechanizatsiya-2025”.

Keywords: apples, fruit damage, apple sorting line, vision system, fruit recognition, segmentation algorithm, tracking, artificial neural network, deep learning, superpixels

For citation: Kazakevich P.P., Yurin A.N., Prokopovich G.A. Technical vision system for apple defects recognition: justification, development, testing. *Vesti Natsyonal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no 4, pp. 488-500 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-488-500>

Введение. В 2019 г. в общественном секторе Республики Беларусь произведено более 157,3 тыс. т яблок. Для осуществления их сортировки требуются трудозатраты в количестве 24,5 тыс. чел-дней¹. Учитывая складывающийся дефицит рабочих в сельском хозяйстве, актуально внедрение в производство средств механизации, облегчающих или полностью исключаящих ручной труд при сортировке плодов.

В соответствии с СТБ 2288 «Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия»², при сортировке плодов происходит разделение на фракции, относящиеся по характеристикам к высшему, первому и второму сорту, а также отделение нестандартных плодов. В процессе сортировки учитывается размер плодов, их цвет, наличие повреждений от болезней, вредителей и механического воздействия.

Существует и сортировка плодов по показателям качества поверхности с частичным применением механизмов и машин [1–5]. Они осуществляют доставку продукции к рабочему и ее отвоз после сортировки. Осмотр продукции, частичная манипуляция и принятие решения о качестве плодов осуществляется человеком. Производительность труда работника при механизированной сортировке составляет до 300 кг/ч [6–8].

Дальнейшее повышение производительности труда на сортировании возможно за счет сокращения времени осмотра плода с помощью автоматических сортировочных устройств. Автоматизированная сортировка осуществляется сканирующим устройством без участия или с частичным участием человека. Оно производит фото- или видеосъемку плода, распознавание его, присвоение плоду соответствующего сорта и выдачу управляющего сигнала для рабочего органа, осуществляющего непосредственное выделение (извлечение) плода из общего потока.

Для этого используются системы технического зрения (СТЗ), однако известные технические средства с СТЗ позволяют качественно осуществлять сортировку плодов только по размеру и цвету. Сортировка же по наличию повреждений (вредителей, болезней и механического воздействия) не осуществляется, что снижает качество конечного продукта, а также требуется труд операторов-сортировщиков, которыми выполняется дополнительный контроль качества выходной продукции. Поэтому создание технического средства с СТЗ, позволяющего определить качество поверхности плода без его повреждения, по аналогии как это делает человек [9–15], является важной агроинженерной задачей.

Анализ систем распознавания качества плодов и задачи исследования. Существуют различные устройства для съема оптической информации с поверхности плодов. В работах [16–22] предложен принцип осмотра поверхности плода сканированием поверхности.

Сканирующие устройства классифицируются по следующим признакам:

- количеству спектральных диапазонов;
- принципу действия;
- способу осмотра поверхности и количеству одновременно осматриваемых плодов (по количеству плодов, одновременно находящихся в поле зрения).

¹ Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Минск: [б. и.], 2019. 235 с.

² Яблоки свежие поздних сроков созревания. Технические условия = Яблыкі свежыя позніх тэрмінаў паспявання. Тэхнічныя ўмовы : СТБ 2288–2012. Введ. 01.07.13 (с отменой на территории РБ ГОСТ 21122-75). Минск : Госстандарт, 2013. 11 с.

По количеству спектральных диапазонов сканирующие устройства подразделяются на монохромные и спектрзональные.

Спектрзональные сканирующие устройств имеют несколько параллельных работающих оптических каналов, каждый из которых выделяет из оптического спектра определенный диапазон, наиболее оптимально отвечающий процессу распознавания отдельного показателя качества.

Достоинство спектрзональных сканирующих устройств – возможность получения высокой чувствительности при выделении определенного объекта. Цветные сканирующие устройства являются разновидностью спектрзональных. Они работают в трех диапазонах, соответствующих чувствительности человеческого глаза: красном, зеленом и синем.

По принципу действия сканирующие устройства разделяются на оптико-механические и электронно-оптические.

Принцип действия оптико-механических устройств заключается в механической развертке изображения поверхности продукта [12]. Ввиду специфичности и низкой надежности они не нашли применения.

Электронные оптические сканирующие устройства в современных приборах представлены в основном твердотельными датчиками (видеокамерами) [6, 9, 10, 17–22]. Они разделяются на вакуумные и твердотельные.

По способу осмотра поверхности плода сканирующие устройства могут быть:

- с односторонним осмотром;
- с многосторонним осмотром;
- с несколькими одновременно осматриваемыми плодами.

Так как дефекты плода могут быть на разных его сторонах, целесообразным является применение сканирующей системы с многосторонним осмотром поверхности объекта. Только такая система может обеспечить качественную сортировку плодов.

Сканирующее устройство, осуществляющее видеосъемку одновременно большого количества плодов, наиболее перспективно. Оно обеспечит более высокую производительность линии.

Основной целью работы является разработка системы технического зрения для распознавания размеров и дефектов яблок с последующим ее использованием в технологической линии их сортировки и фасовки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать конструктивно-технологическую схему СТЗ;
- 2) разработать алгоритм функционирования СТЗ;
- 3) разработать алгоритмы сегментации, трекинга;
- 4) сформировать обучающую выборку для обучения искусственной нейронной сети.
- 5) разработать программное обеспечение системы;
- 6) реализовать СТЗ в технологической линии сортировки и фасовки яблок;
- 7) определить экономическую эффективность использования СТЗ при сортировке яблок.

Обоснование конструктивно-технологической схемы СТЗ. Установлено, что СТЗ не может быть отделена от транспортирующих и исполнительных устройств машины для сортировки плодов, так как перемещение плодов при их сканировании может быть организовано в один или несколько рядов, что требует различных схем размещения видеокамер.

Многорядная схема повышает производительность труда, однако при этом возрастают требования к вычислительным мощностям электронного блока управления, увеличивается число используемых видеокамер, которое равно числу рядов движущихся плодов, а также количество исполнительных механизмов экстракции плодов. Схема с однорядным движением плодов технически проще, поэтому в дальнейшем при исследовании принята следующая схема СТЗ.

Она должна состоять из оптического модуля с установленной структурной подсветкой и видеокамерой, электронного блока управления с интерфейсом и исполнительными механизмами сортировщика и конвейера для плодов (рис. 1).

Оптический модуль располагается над конвейером, по которому транспортируются яблоки. При такой схеме размещения оборудования для обеспечения многосторонней видеосъемки пло-

дов необходимо обеспечить их равномерное вращение вокруг своей оси во время прохождения модуля оптического сортировщика.

Разработка программного обеспечения СТЗ. Качество ПО особенно важно, когда оно предназначено для управления техническим устройством [12, 17, 19]. Для разрабатываемой СТЗ был предложен алгоритм функционирования ПО, представленный на рис. 2.

Основной задачей разрабатываемого ПО был анализ движущихся по транспортеру яблок, на всей длине рабочей области корпуса СТЗ (до момента выхода) каждому яблоку присваивается номер класса, соответствующий определенному сорту качества. Так, после захвата изображения камерой (3) оно поступает на вход алгоритма сегментации (4), который генерирует прямоугольники, ограничивающие яблоки. Эти прямоугольники поступают на вход алгоритма трекинга (5), где он сопоставляет объекты текущего кадра с объектами предыдущего изображения. Далее изображения идентифицированных яблок подаются на вход искусственной нейронной сети (ИНС) для обнаружения и классификации дефектов на них (6). До тех пор, пока яблоко не дойдет до конца анализируемого края ROI, система по индивидуальному номеру яблока, назначенному алгоритмом трекинга, собирает информацию об обнаруженных дефектах и размерах каждого уникального яблока (7). После того, как яблоко доходит до края (8), на основе собранной информации яблоку присваивается j -й номер одного из четырех классов: 1 – высший сорт, 2 – первый сорт, 3 – второй сорт, 4 – брак. В зависимости от номера класса программное обеспечение генерирует сигнал для верхней системы управления всего технологического комплекса сортировки плодов (10), на основе которого активируется шток соответствующего поперечного (упаковочного) конвейера. Отправление сигнала происходит с задержкой, равной jT_c , где T – константа, определенная исходя из геометрических размеров камеры, в которой осуществляется видеосъемка плодов.

Разработка алгоритма функционирования системы технического зрения.

1. Обоснование структуры программного обеспечения системы технического зрения.

Обработка видеоизображения движущихся предметов является ресурсоемкой задачей. Поэтому для повышения производительности функционирования СТЗ при сортировании плодов целесообразным является фильтрация получаемого изображения перед его логической обработкой.

С этой целью каждое изображение для минимизации искажений (например, вызванных неравномерностью освещения или шумом видеокamеры) обрезается таким образом, чтобы на вход алгоритма сегментации подавалась только та часть изображения, которая содержит движущуюся часть конвейера с яблоками. Указанные действия происходят с помощью аппаратных возможностей СТЗ.

Таким образом, структура разработанной системы технического зрения включает три основных элемента: фильтрацию, сегментацию и классификацию.

2. Обоснование и выбор метода сегментации изображения. Для сегментирования изображения, т.е. отделения изображений яблок от конвейера, который в данном случае является фоном, проведены экспериментальные исследования следующих трех алгоритмов:

- 1) алгоритм, в основе которого лежит вычитание фона;
- 2) алгоритм, основанный на анализе движения на последовательных кадрах (Optical Flow);
- 3) алгоритм сегментации изображения путем анализа цвета.

Рассмотрим каждый алгоритм сегментации изображения по схеме: обоснование идеи, описание алгоритма, анализ результатов его применения.

В основе идеи первого алгоритма лежит гипотеза, что конвейер статичен или движение его однообразно и незначительно, а перемещение и вращение яблок намного заметнее. На вход алгоритма

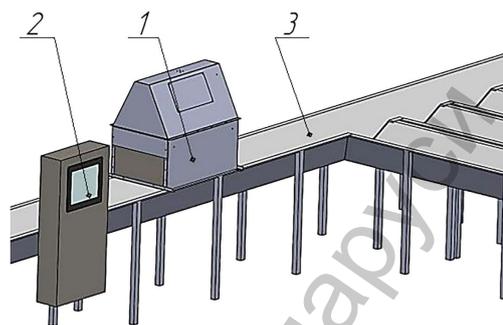


Рис. 1. Общий вид автоматизированной сортировочной станции плодов: 1 – оптический модуль; 2 – электронный блок управления; 3 – конвейер
Fig. 1. General view of the automated fruit sorting station: 1 - optical module; 2 - electronic control unit; 3 - conveyor

подаются изображение конвейера без яблок и анализируемая видеопоследовательность. Далее от каждого текущего кадра вычитается изображение фона. В результате должно получаться изображение, у которого значение пикселей фона равно нулю, а у движущихся объектов оно отлично от нуля.

Однако контуры яблок при съемке в таком случае получаются зачастую размытыми, поэтому данный алгоритм сегментации не может быть применен для отделения изображений яблок от конвейера.

Во втором алгоритме, основанном на анализе движения, предполагается, что вращение яблок будет происходить интенсивнее движения конвейера. На вход алгоритма подаются два изображения – текущее анализируемое изображение и предыдущее изображение видеопоследовательности. Далее применяется стандартный алгоритм OpticalFlow, реализованный в OpenCV 3, который позволяет определить направление и интенсивность движения для каждого пиксела изображения.

Так как направление движения конвейера и яблок одинаково, то из всех выходных параметров алгоритма OpticalFlow требуется знать только его интенсивность.

Экспериментальные исследования показали, что результаты работы данного алгоритма не дают желаемых результатов. Установлено, что алгоритм OpticalFlow достаточно затратен с точки зрения вычислительных ресурсов.

На рис. 3 изображен третий алгоритм сегментации, основанный на анализе цветового пространства изображения. Алгоритм основан на гипотезе, что конвейер черный, а все яблоки имеют красные, желтые или зеленые оттенки (или их комбинации), в этом случае они легко могут быть видны на фоне конвейера. На вход алгоритма поступает одно текущее изображение. Для анализа оно переводится в цветовой формат HSV: H (Hue) – цветовой тон, S (Saturation) – насыщенность, V (Value) – яркость. Преимуществом цветовой модели HSV перед наиболее часто используемой цветовой моделью RGB состоит в том, что в ней явно выделена компонента цвета H (в то время как в RGB цвет кодируется тремя компонентами – R (красный), G (зеленый), B (синий)). Данное свойство позволяет легко сегментировать зеленые, желтые или красные оттенки на цифровых изображениях яблок.

Способ перевода из цветового пространства HSV в RGB описывается следующими тремя формулами:

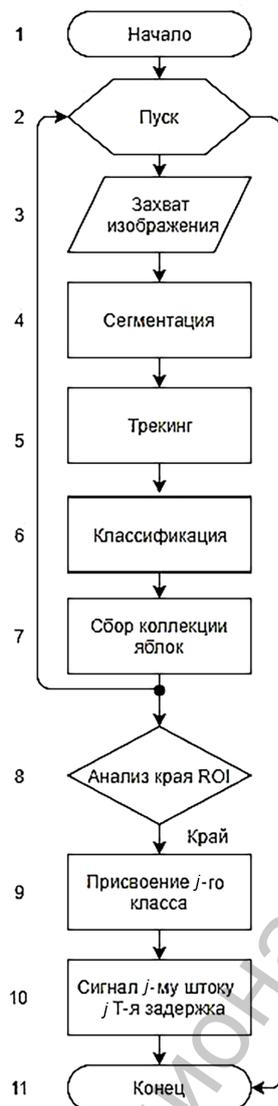


Рис. 2. Алгоритм функционирования ПО установки автоматической сортировки яблок

Fig. 2. Algorithm of functioning of the software for installation of automatic sorting of apples

$$H = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{MAX} = \text{MIN}, \\ 60 \cdot \frac{G - B}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 0, & \text{если } \text{MAX} = R \text{ и } G \geq B, \\ 60 \cdot \frac{G - B}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 360, & \text{если } \text{MAX} = R \text{ и } G < B, \\ 60 \cdot \frac{B - R}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 120, & \text{если } \text{MAX} = G, \\ 60 \cdot \frac{R - G}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 240, & \text{если } \text{MAX} = B, \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } \text{MAX} = 0; \\ 1 - \frac{\text{MIN}}{\text{MAX}}, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$V = \text{MAX},$$

где $H \in [0, 360]$, $S, V, R, G, B \in [0, 1]$, MAX – максимальное значение из R, G и B , а MIN – минимальное из них.

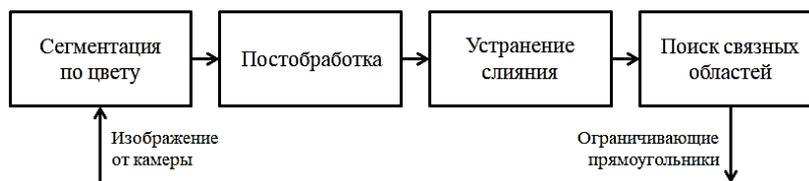


Рис. 3. Схема алгоритма сегментации на основе анализа цвета

Fig. 3. Layout of segmentation algorithm based on color analysis

Предложенная в данной работе сегментация изображений осуществляется по следующему правилу:

$$pix \in \text{яблоку, если} \begin{cases} h < 55, \\ h > 160, \\ s > 100, \\ v > 20, \end{cases} \quad (2)$$

$$pix \in \text{конвейеру,}$$

где pix – пиксел анализируемого изображения; h – значение цветового тона пиксела pix ; s – значение насыщенности пиксела pix ; v – значение яркости пиксела v в цветовой модели HSV.

3. Подбор коэффициентов для выбранного алгоритма сегментации. Значения параметров зависимости (2) были получены путем анализа гистограмм каждого канала изображения по отдельности и попарно на основе имеющейся выборки изображений движущихся на транспортере яблок.

После получения маски изображения по зависимости (2), где значение пиксела 255 кодирует образ яблока, а значение 0 кодирует образ конвейера, для устранения дефектов к ней последовательно применяются бинарные операции морфологического открытия и закрытия.

В процессе экспериментов замечено, что иногда возникают ситуации, что из-за большого размера яблоки в процессе движения на транспортере могут соприкоснуться друг с другом. По этой причине предложенный выше алгоритм может распознать два яблока как одно. Во избежание этого предложено анализировать гистограмму бинарной маски (после операций морфологического открытия или закрытия) анализируемого изображения.

Так как яблоки имеют шарообразную форму, то на гистограмме каждому яблоку соответствует синусоподобная кривая с локальными максимумами, находящиеся друг от друга практически с одинаковым расстоянием (периодом), равным шагу транспортирующих кареток конвейера.

Экспериментальными исследованиями установлено, что, численно определив положение этих локальных максимумов, предложенный алгоритм способен разделить соприкасающиеся яблоки друг от друга (рис. 4), благодаря чему появляется возможность с точностью до нескольких миллиметров определять диаметр движущихся на транспортере яблок в рабочем режиме. Поэтому для отделения изображений яблок от конвейера, который в данном случае является фоном, был принят алгоритм сегментации изображения путем анализа цвета.

4. Разработка алгоритма трекинга изображения для повышения достоверности классификации сортируемых плодов. Так как точно определить состояние яблока только по одной его проекции невозможно, то для окончательного принятия решения о его целостности необходимо сравнить несколько проекций. Эти проекции можно получить благодаря конструкции конвейера, который устроен таким образом, что в процессе прохождения яблок под модулем оптического сортировщика они начинают вращаться. В результате яблоко, проходя в рабочей зоне видеокамеры машинного зрения, успеваает попасть на несколько ее кадров. Чтобы не перепутать яблоки между собой, требуется сопоставить информацию, полученную по отдельным кадрам. Для этого в систему встроены алгоритм трекинга движущихся объектов (рис. 5).

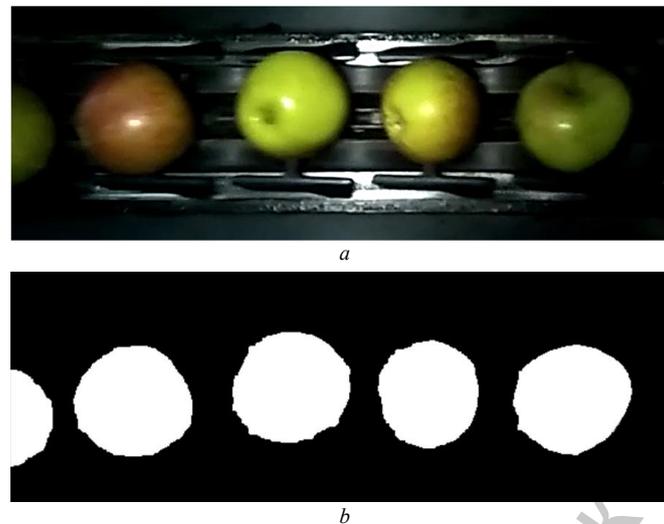


Рис. 4. Результат применения предложенного алгоритма сегментации, основанного на анализе цветового пространства HSV: *a* – до обработки, *b* – после обработки. Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2019 г.
 Fig. 4. Result of applying the proposed segmentation algorithm based on the analysis of the HSV color space: *a* - before processing, *b* - after processing. Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, 2019

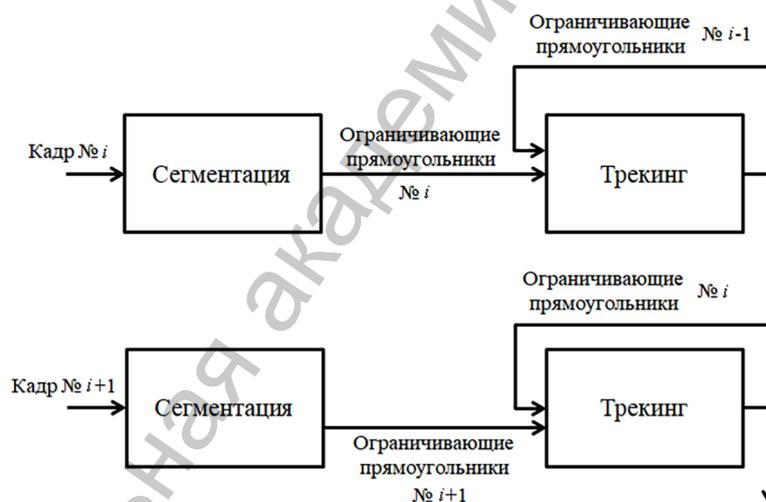


Рис. 5. Взаимодействие алгоритмов сегментации и трекинга
 Fig. 5. Interaction of segmentation and tracking algorithms

На вход алгоритма трекинга поступает набор координат прямоугольников, ограничивающих яблоки. Алгоритм трекинга учитывает информацию, сгенерированную им для предыдущего кадра видеопоследовательности (если он не первый), и выдает каждому ограничивающему прямоугольнику текущего кадра уникальный номер (назначает индивидуальный номер – ИД). Тем самым алгоритм сопоставляет яблоки на двух кадрах и позволяет идентифицировать одно и то же яблоко на разных кадрах как одно яблоко, а не как несколько разных.

На рис. 6 приведена блок-схема работы предложенного алгоритма трекинга.

Здесь $BBLis$ обозначает список координат ограничивающих прямоугольников (x_1, y_1, x_2, y_2) , поступающих на вход алгоритма; $ObjList$ – список объектов (ИД и координат ограничивающих прямоугольников (x_1, y_1, x_2, y_2)), сгенерированный алгоритмом трекинга для предыдущего кадра; $\min(ObjList)$ ($\max(ObjLis)$) обозначает, что из списка координат ограничивающих прямоугольников объектов выбирается наименьшая координата левого нижнего угла прямоугольника (наи-

большая координата правого нижнего угла). Регистрация объекта обозначает присвоение ему нового ИД и включение его в список объектов, где регистрация – удаление объекта из списка объектов, соотношение объектов означает присвоение объектам текущего кадра ИД, который выбирается из списка ИД объектов предыдущего кадра. Результат работы алгоритма трекинга объектов приведен на рис. 7.

Внешний диаметр яблок можно определить исходя из параметров, ограничивающих прямоугольников. Другие параметры, такие как механические повреждения и повреждения плодов вредителями, можно выявить только с помощью применения аппарата глубокого обучения (Deep Learning), т. е. искусственной нейронной сети (ИНС).

5. Основные особенности метода глубокого обучения. Глубокое обучение – это класс методов машинного обучения, в котором признаки для классификации образов определяются, задаются не вручную, а автоматически изучаются математическими моделями – искусственными нейронными сетями. Схематично процесс обучения ИНС показан на рис. 8.

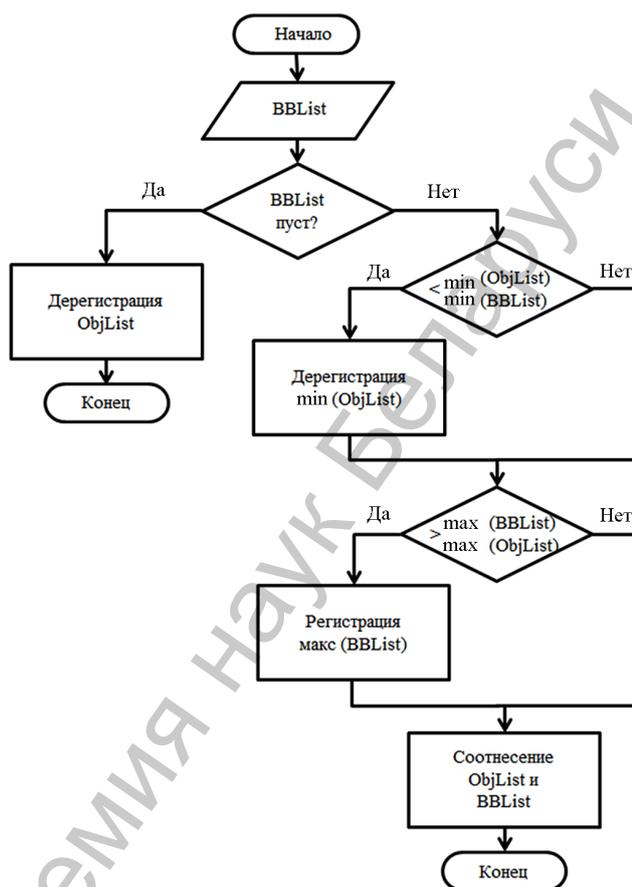


Рис. 6. Блок-схема предложенного алгоритма трекинга объектов
Fig. 6. Block diagram of the proposed object tracking algorithm

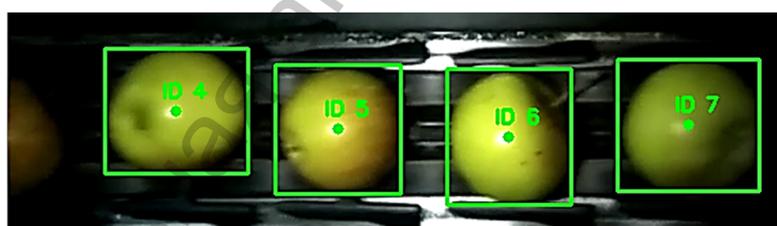


Рис. 7. Результат работы алгоритма трекинга объектов.
Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2019 г.
Fig. 7. Result of the object tracking algorithm.
Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, 2019

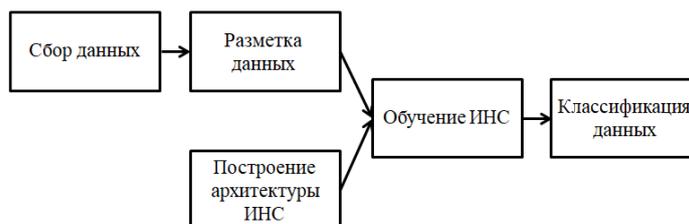


Рис. 8. Процесс обучения ИНС
Fig. 8. The process of learning ANN

6. *Обоснование процесса обучения искусственной нейронной сети глубокого обучения.*

Способность моделей глубокого обучения автоматически выделять признаки для классификации образов приводит к тому, что для их обучения требуется большой объем обучающих данных. Для оптимизации процесса формирования обучающей выборки создаются открытые базы данных миллионов цифровых изображений. Однако при решении конкретных практических задач нередки случаи, когда в базах данных отсутствуют изображения, содержащие искомые для конкретной технической задачи эталонные образы. Существует несколько подходов к формированию обучающей выборки:

- 1) на основе реальных изображений;
- 2) на основе синтетических изображений;
- 3) из синтетических данных, сгенерированных на основе реальных изображений.

Практика показывает, что наилучшие результаты дает метод обучения на основе реальных моделей, поэтому в дальнейшем обучение ИНС проводили именно этим методом.

Перед обучением ИНС собранные изображения поврежденных плодов размечались вручную. Распознаваемые объекты на изображениях яблок выделялись ограничивающими прямоугольниками одного из десяти классов: **leaf** (лист), **sepal** (чашелистик), **stem** (ножка), **blemish** (пятно), **net** (сетка), **pressure** (нажим), **rot** (гниль), **scratch** (царапина), **worm** (червяк), **apple** (яблоко).

Кроме обучающих данных необходимо было построить архитектуру ИНС, сконструированную для решения конкретной задачи [23–25]. Для распознавания дефектов на изображениях яблок использовались детекторы, которые способны указать местоположение объекта на изображении и его класс.

Одним из них является алгоритм, работа которого основана на суперпикселах. [Суперпиксел – это группа соседних пикселей, которые имеют общие свойства (например, яркость, цвет).]

При сегментации изображения на суперпиксели используется современный алгоритм SLIC (Simple Linear Iterative Clustering) [28–31]. Для кластеризации пикселей изображения он использует значения L , a , b цветового пространства CIE LAB, а также координаты пикселей x , y .

Дескриптором суперпиксела является вектор из десяти чисел, который содержит следующие значения: «круглость» и «квадратность» формы суперпиксела; средние значения цветов суперпиксела (три средних для каждого канала в пространстве HSV; дисперсии распределения цветов суперпиксела (отдельно для каждого канала); корреляция и неоднородность матрицы совместной встречаемости полутонового изображения суперпиксела.

Для классификации суперпикселей предварительно генерировался эталонный набор дескрипторов суперпикселей по размеченным ранее изображениям. Далее был обучен классификатор k ближайших соседей по эталонному набору дескрипторов, который в результате имеет точность распознавания, равную 0,85.

Во время работы алгоритма распознавания вектор дескриптора суперпиксела подавался на вход обученного классификатора, и на выходе мы получали номер класса суперпиксела.

После формирования обучающей выборки и выбора подходящей архитектуры ИНС осуществлено ее обучение. Для этого на вход ИНС поочередно подавались изображения обучающей выборки, а на выход – их разметка, т.е. координаты ограничивающих прямоугольников и соответствующие им классы. Необученная ИНС, пропуская через себя входное изображение, генерирует координаты ограничивающих прямоугольников и соответствующие им вероятности принадлежности объектов классам. Затем выход, полученный необученной ИНС, сравнивается с эталонным выходом, получая оценку схожести, и методом обратного распространения ошибки параметры нейронов ИНС корректируются таким образом, чтобы минимизировать оценку схожести. Обучение останавливается тогда, когда эта оценка достигает заранее установленного порога в 95 %.

В итоге результатом процесса обучения стала ИНС, которая получает изображение, поступающее от камеры, а на выходе выдает список повреждений яблока (если они имеются) вместе с их координатами.

Экспериментальным путем откорректирована аналитическая зависимость времени начала $N_i^{\text{ВЫКЛ}}$ и конца $N_i^{\text{ВЫКЛ}}$ подачи управляющего сигнала соленоида сбрасывателя яблок в зависимости от скорости движения конвейера:

$$\begin{cases} N_i^{\text{ВКЛ}} = P_j + \frac{K_1 L - V(t_{\text{обр}} + t_{\text{ср}})}{K_2}; \\ N_i^{\text{ВЫКЛ}} = N_i^{\text{ВКЛ}} + \frac{V t_{\text{откл}}}{K_2}. \end{cases} \quad (3)$$

где i – уникальный номер яблока; P_j – расстояние в импульсах до j -го механизма сбрасывания, соответствующего распознанному классу качества данного яблока; K_1 – коэффициент пересчета пикселей в метры; K_2 – коэффициент пересчета длины конвейера из импульсов в метры; L – расстояние центра распознанного яблока до края кадра, пиксели; V – скорость конвейера, м/с; $t_{\text{обр}}$ – время, затраченное на обработку последнего кадра i -го яблока, с; $t_{\text{ср}}$ – время срабатывания механизма сброса, с; $t_{\text{откл}}$ – время удерживания механизма сброса, с.

Данная зависимость позволяет осуществлять сброс яблок на скоростях движения главного конвейера от 0,15 до 0,87 м/с.

7. Технологическая линия сортировки яблок и ее испытание. На основе проведенных исследований в Научно-практическом центре НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства разработана технологическая линия сортировки и фасовки яблок ЛСП-4. Она состоит из двух частей: приемной и сортирующей.

Сортирующая часть линии (рис. 9) состоит из основного конвейера 1, конвейеров для выходной продукции 2 и 3, кареток 4, столов 5 и оптического сортировщика 6.

Предварительные испытания линии проводили на испытательном полигоне РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства». Анализ результатов испытаний показал, что технологическая линия обеспечивает высокую производительность труда и точность сортировки при минимальных повреждениях плодов, обеспечивая высокую эффективность работы. Производительность линии составляет 1,5–2,0 т/ч, или 12–16 т/смену, что эквивалентно ручному труду 20–26 рабочих-переборщиков, при этом численность обслуживающего персонала на линии составляет 8 человек.

Усовершенствованная по результатам предварительных испытаний линия сортировки яблок смонтирована в ОАО «Остромечово» Брестского района.

Выводы

В результате проведенных исследований обоснована принципиальная схема системы технического зрения для механизации технологического процесса сортировки яблок, разработано программное обеспечение на основе алгоритма сегментации цветов плодов, алгоритма трекинга и глубокого обучения ИНС, которые обеспечивают распознавание размеров и цветов плодов, а также повреждений от механического воздействия, вредителей и болезней. Результаты исследований внедрены в технологической линии сортировки и фасовки яблок ЛСП-4 разработки РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства».

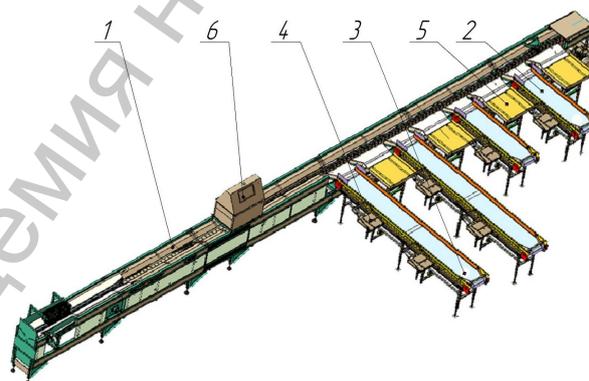


Рис. 9. Сортирующая часть линии ЛСП-4: 1 – основной конвейер; 2 и 3 – конвейеры; 4 – каретка; 5 – стол; 6 – оптический сортировщик

Fig. 9. Sorting part of the LSP-4 line: 1 - main conveyor, 2 and 3 - conveyor, 4 - carriage, 5 - table, 6 - optical sorter

Анализ результатов испытаний показал, что технологическая линия с системой технического зрения повышает эффективность труда при сортировке плодов, обеспечивая точность сортировки плодов не менее 88 % и повышение производительности труда в 2,5–3,2 раза по сравнению с ручным трудом, при этом повреждение плодов не превышает 1,5 %.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной научно-технической программы «Инновационные агропромышленные и продовольственные технологии» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Белсельхозмеханизация-2025».

Список использованных источников

1. Гурьянов, Д. В. Распознавание качества плодов / Д. В. Гурьянов // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10–12 нояб. 2014 г. / Мичур. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2014. – С. 177–182.
2. Применение методов люминесцентного анализа в системах технического зрения при сортировании плодов / М. В. Кирина [и др.] // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10–12 нояб. 2014 г. / Мичур. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2014. – С. 188–191.
3. Лакомов, Д. В. Обработка изображений при распознавании образов сельскохозяйственной продукции / Д. В. Лакомов // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. науч. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 10–12 окт. 2018 г. : в 2 т. / Тамб. гос. техн. ун-т [и др.]. – Тамбов, 2018. – Т. 1. – С. 261–263.
4. Бобров, В. П. Применение систем технического зрения / В. П. Бобров // Механизация и автоматизация пр-ва. – 1989. – № 9. – С. 23–25.
5. Бусаров, Н. А. Сбор и товарная обработка плодов и ягод / Н. А. Бусаров. – М. : Колос, 1970. – 247 с.
6. Рудник, Ю. А. Робототехническая система для сортирования яблок / Ю. А. Рудник, С. В. Журавлев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 10–12 нояб. 2014 г. / Мичур. гос. аграр. ун-т. – Мичуринск, 2014. – С. 32–34.
7. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе / Д. О. Хорт [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 1 (38). – С. 133–141. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>
8. Гурьянов, Д. В. Повышение эффективности сортирования яблок на основе цветных телевизионных датчиков : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Д. В. Гурьянов. – Мичуринск, 2004. – 199 л.
9. Ganganagowdar, N. V. An intelligent computer vision system for vegetables and fruits quality inspection using soft computing techniques / N. V. Ganganagowdar, A. V. Gundad // Agr. Engineering Intern.: CIGR J. – 2019. – Vol. 21, N 3. – P. 171–178.
10. Lu, Y. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples / Y. Lu, R. Lu // Trans. of the ASABE. – 2017. – Vol. 60, N 4. – P. 1379–1389. <https://doi.org/10.13031/trans.12158>
11. Гордеев, А. С. Автоматизированная обработка яблок : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / А. С. Гордеев – М., 1996. – 423 л.
12. Новые технологии и технические средства для механизации работы в садоводстве / Рос. науч.-исслед. ин-т информ. и технико-экон. исслед. по инженер.-техн. обеспечению агропром. комплекса ; подгот.: М. И. Куликов [и др.]. – М. : Росинформагротех, 2012. – 164 с.
13. Будаговская, О. Н. Универсальная полуавтоматическая установка для сортирования фруктов и овощей по качеству / О. Н. Будаговская // Перспективы отечественного садоводства : тез. докл. II респ. конф. молодых ученых и специалистов / Укр. науч.-исслед. ин-т садоводства ; редкол.: М. В. Андриенко (отв. ред.) [и др.]. – Киев, 1991. – С. 138.
14. Будаговская, О. Н. Оптико-электронный контроль качества яблок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02, 05.13.07 / О. Н. Будаговская. – М., 1993. – 24 с.
15. Training deep face recognition systems with synthetic data [Electronic resource] / A. Kortylewski [et al.]. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf>. – Date of access: 16.04.2018.
16. Чигорин, А. Классификация автодорожных знаков на основе свёрточной нейросети, обученной на синтетических данных / А. Чигорин, Б. Моисеев // 22-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению, ГрафиКон'2012, 1–5 октября 2012 г., Москва, Россия : тр. конф. = The 22nd International conference on computer graphics and vision: GrafCon'2012, October 1–5, 2012, Moscow, Russia : conf. proc. / Моск. гос. ун-т. – М., 2012. – С. 284–287.
17. Жиркова, А. А. Автоматизированная система гиперспектрального контроля дефектов яблок / А. А. Жиркова, П. В. Балабанов, А. Г. Дивин // Современная наука: теория, методология, практика : материалы III Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Тамбов, 13–14 апр. 2021 г. / Тамб. гос. техн. ун-т ; редкол.: П. В. Монастырев [и др.]. – Тамбов, 2021. – С. 291–296.
18. Роботизированный комплекс для сортировки яблок / П. В. Балабанов [и др.] // Цифровизация агропромышленного комплекса : сб. науч. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 21–23 окт. 2020 г. : в 2 т. / Тамб. гос. техн. ун-т [и др.]. – Тамбов, 2020. – Т. 2. – С. 44–47.
19. Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis / P. M. Mehl [et al.] // Appl. Engineering in Agriculture. – 2002. – Vol. 18, N 2. – P. 219–226. <https://doi.org/10.13031/2013.7790>

20. Li, C. Genetic algorithms (GAs) and evolutionary strategy to optimize electronic nose sensor selection / C. Li, P. H. Heinemann, P. M. Reed // *Trans. of the ASABE*. – 2008. – Vol. 51, N 1. – P. 321–330. <https://doi.org/10.13031/2013.24208>
21. Bennedsen, B. S. Identifying apple surface defects using principal components analysis and artificial neural networks / B. S. Bennedsen, D. L. Peterson, A. Tabb // *Trans. of the ASABE*. – 2007. – Vol. 50, N 6. – P. 2257–2265. <https://doi.org/10.13031/2013.24078>
22. Selective search for object recognition [Electronic resource] / J. R. R. Uijlings [et al.]. – Mode of access: <http://www.huppelen.nl/publications/selectiveSearchDraft.pdf>. – Date of access: 28.04.2018.
23. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [Electronic resource] / S. Ren [et al.]. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf>. – Date of access: 15.05.2018.
24. Rethinking the inception architecture for computer vision [Electronic resource] / C. Szegedy [et al.]. – Date of access: <https://arxiv.org/pdf/1512.00567.pdf>. – Mode of access: 15.05.2018.
25. ImageNet [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.image-net.org>. – Date of access: 05.04.2018.
26. LeCun, Y. The MNIST database of handwritten digits [Electronic resource] / Y. LeCun, C. Cortes, C. J. C. Burges. – Mode of access: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>. – Date of access: 16.03.2018.
27. Microsoft COCO: Common objects in context / T.-Y. Lin [et al.] // *Computer Vision – ECCV 2014 : 13th Europ. conf., Zurich, Switzerland, Sept. 6–12, 2014 : proceedings / ed.: D. Fleet [et al.]*. – Cham, 2014. – Pt. 5. – P. 740–755. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48
28. Tzutalin/LabelImg [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/tzutalin/labelImg>. – Date of access: 18.06.2018.

References

1. Gur'yanov D. V. Recognition of fruit quality. *Robototekhnika v sel'skokhozyaistvennykh tekhnologiyakh: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 10-12 noyabrya 2014 g.* [Robotics in agricultural technologies: proceedings of the International scientific and practical conference, November 10-12, 2014]. Michurinsk, 2014, pp. 177-182 (in Russian).
2. Kirina M. V., Sychev V. A., Chernega A. A., Deryabina M. A., Panoryadov V. M., Divin A. G. Application of methods of luminescence analysis in computer vision systems when sorting fruits. *Robototekhnika v sel'skokhozyaistvennykh tekhnologiyakh: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 10-12 noyabrya 2014 g.* [Robotics in agricultural technologies: proceedings of the International scientific and practical conference, November 10-12, 2014]. Michurinsk, 2014, pp. 188-191 (in Russian).
3. Lakomov D. V. Image processing for image recognition of agricultural products. *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnykh statei I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Tambov, 10-12 oktyabrya 2018 g.* [Digitalization of Agroindustrial Complex: collection of scientific articles I International scientific and practical conference, Tambov, October 10–12, 2018]. Tambov, 2018, vol. 1, pp. 261-263 (in Russian).
4. Bobrov V. P. Application of technical vision systems. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva* [Mechanization and Automation of Production], 1989, no. 9, p. 23-25 (in Russian).
5. Busarov N. A. *Collection and commodity processing of fruit and berries*. Moscow, Kolos Publ., 1970. 247 p. (in Russian).
6. Rudnik Yu. A., Zhuravlev S. V. Robotic system for sorting apples. *Robototekhnika v sel'skokhozyaistvennykh tekhnologiyakh: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 10-12 noyabrya 2014 g.* [Robotics in agricultural technologies: proceedings of the International scientific and practical conference, November 10-12, 2014]. Michurinsk, 2014, pp. 32-34 (in Russian).
7. Khort D. O., Kut'yev A. I., Smirnov I. G., Filippov R. A., Vershinin R. V. Developing algorithms for a berry recognition system used in robotized harvesting of garden strawberry. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK = Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*, 2020, no. 1 (38), pp. 133-141 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141>
8. Gur'yanov D. V. *Increasing the efficiency of apple sorting on the basis of color television sensors*. Ph.D. Thesis. Michurinsk, 2004. 199 p. (in Russian).
9. Ganganagowdar N. V., Gundad A. V. An intelligent computer vision system for vegetables and fruits quality inspection using soft computing techniques. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 171-178.
10. Lu Y., Lu R. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples. *Transactions of the ASABE*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 1379-1389. <https://doi.org/10.13031/trans.12158>
11. Gordeev A. S. *Automated processing of apples*. Ph.D. Thesis. Moscow, 1996. 423 p. (in Russian).
12. Kulikov M. I., Vorob'ev V. F., Kosyakin A. S., Bychkov V. V., Kadykalo G. I., Upadysheva G. Yu. (comp.) (et al.). *New technologies and technical means for the mechanization of work in horticulture*. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 2012. 164 p. (in Russian).
13. Budagovskaya O. N. Universal semi-automatic plant for sorting fruits and vegetables by quality. *Perspektivy otechestvennogo sadovodstva: tezisy dokladov II respublikanskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [Prospects for domestic gardening: abstracts of the II republican conference of young scientists and specialists]. Kiev, 1991, p. 138 (in Russian).
14. Budagovskaya O. N. *Optical-electronic quality control of apples*. Abstract of Ph.D. diss. Moscow, 1993. 24 p. (in Russian).

15. Kortylewski A., Schneider A., Gerig T., Egger B., Morel-Forster A., Vetter T. *Training deep face recognition systems with synthetic data*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1802.05891.pdf> (accessed 16.04.2018).
16. Chigorin A., Moiseev B. Classification of road signs based on a convolutional neural network trained on synthetic data. 22-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya po komp'yuternoi grafike i zreniyu, GrafiKon'2012, 1-5 oktyabrya 2012 g., Moskva, Rossiya: trudy konferentsii = *The 22nd International conference on computer graphics and vision: GrafiCon'2012, October 1–5, 2012, Moscow, Russia: conference proceedings*. Moscow, 2012, pp. 284-287 (in Russian).
17. Zhirkova A. A., Balabanov P. V., Divin A. G. Automated system for hyperspectral control of apple defects. *Sovremennaya nauka: teoriya, metodologiya, praktika: materialy III Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, Tambov, 13-14 aprelya 2021 g.* [Modern science: theory, methodology, practice: proceedings of the 3rd All-Russian (national) scientific-practical conference, Tambov, April 13-14, 2021]. Tambov, 2021, pp. 291-296 (in Russian).
18. Balabanov P. V., Divin A.G., Mishchenko S.V., Makarova V. S., Markov A. V., Sodomov Ya. O. Robotic complex for sorting apples. *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnykh statei II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Tambov, 21-23 oktyabrya 2020 g.* = *Digitalization of the agro-industrial complex: proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Tambov, October 21-23, 2020*. Tambov, 2020, vol. 2, pp. 44-48 (in Russian).
19. Mehl P. M., Chao K., Kim M., Chen Y. R. Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis. *Applied Engineering in Agriculture*, 2002, vol. 18, no. 2, pp. 219-226. <https://doi.org/10.13031/2013.7790>
20. Li C., Heinemann P. H., Reed P. M. Genetic algorithms (GAs) and evolutionary strategy to optimize electronic nose sensor selection. *Transactions of the ASABE*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 321-330. <https://doi.org/10.13031/2013.24208>
21. Bennedsen B. S., Peterson D. L., Tabb A. Identifying apple surface defects using principal components analysis and artificial neural networks. *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50, no. 6, pp. 2257-2265. <https://doi.org/10.13031/2013.24078>
22. Uijlings J. R. R., Van de Sande K. E. A., Gevers T., Smeulders A. W. M. *Selective search for object recognition*. Available at: <http://www.huppelen.nl/publications/selectiveSearchDraft.pdf> (accessed 28.04.2018).
23. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. *Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1506.01497.pdf> (accessed 15.05.2018).
24. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J. *Rethinking the inception architecture for computer vision*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1512.00567.pdf> (accessed 15.05.2018).
25. *ImageNet*. Available at: <http://www.image-net.org> (accessed 05.04.2018).
26. LeCun Y., Cortes C., Burges C. J. C. *The MNIST database of handwritten digits*. Available at: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (accessed 16.03.2018).
27. Lin T.-Y., Belongie S., Maire M., Perona P., Hays J., Ramanan D., Dollár P., Zitnick C. L. Microsoft COCO: Common objects in context. *Computer Vision - ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014: proceedings*. Cham, 2014, pt. 5, pp. 740-755. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48
28. *Tzatalin/LabelImg*. Available at: <https://github.com/tzatalin/labelImg> (accessed 18.06.2018).

Информация об авторах

Казакевич Петр Петрович – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: oan2011@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9102-2816>.

Юрин Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: anton-jurin@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9348-8110>

Прокопович Григорий Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: prokopovich@newman.bas-net.by, <http://orcid.org/0000-0002-3412-9174>.

Information about the authors

Petr P. Kazakevich - Corresponding Member, Ph.D. (Engineering), Professor. Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., Minsk 220072, Republic of Belarus). E-mail: oan2011@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-9102-2816>.

Anton N. Yurin - Ph.D. (Engineering), Associate Professor. Scientific and Production Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (1, Knorina Str., Minsk 220049, Republic of Belarus). E-mail: anton-jurin@rambler.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9348-8110>.

Grigory A. Prokopovich - Ph.D. (Technical), Associate Professor. Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: prokopovich@newman.bas-net.by; <http://orcid.org/0000-0002-3412-9174>.