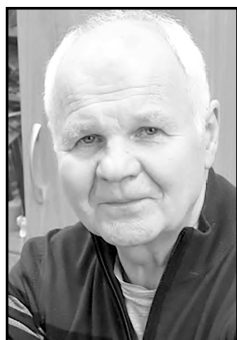


Интеллектуализация контроля вагонов в железнодорожном сортировочном парке



Сергей КОВАЛЁВ



Андрей СУХАНОВ

Железнодорожная сортировочная станция занимает центральное место в технологической цепочке грузовых перевозочных процессов, поскольку скорость переработки железнодорожных составов на ней определяет объём и стоимость перевозок. Поэтому развитие средств автоматизации и информатизации сортировочных процессов ведёт к повышению эффективности грузовых перевозок в целом.

Целью работы является формализация задачи контроля вагонов в железнодорожном сортировочном парке и разработка метода её решения, основанного на использовании алгоритмов распознавания и позиционирования динамических объектов путём интеллектуального анализа данных потокового видео.

В работе представлен новый подход к решению задачи контроля подвижных единиц в подгорочном (сортировочном) парке железнодорожных сортировочных станций. Приводятся основные критерии определения скорости движения и позиционирования групп вагонов при их движении после расформирования на сортировочной горке. Определено, что контроль подвижных

Ковалёв Сергей Михайлович — Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия.

Суханов Андрей Валерьевич — Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия.*

единиц в сортировочном парке является менее автоматизированным процессом по сравнению с контролем на сортировочной горке. Для решения поставленной задачи автоматизации контроля подвижных единиц в сортировочном парке предложен алгоритм на базе методов интеллектуального анализа видеоданных – компьютерного зрения – и представлена его модель реализации на конкретном объекте.

Методы работы основаны на теории компьютерного зрения и направлены на распознавание ключевых динамических объектов на потоковом видео с их последующим позиционированием.

Результатом проведённой работы является обоснование актуальности использования компьютерного зрения в процессе расформирования-формирования железнодорожных составов. В дальнейшем планируется совершенствование представленных разработок для подготовки готового программного продукта, позволяющего объективизировать информацию о сортировочном парке для повышения эффективности прицельного торможения на сортировочной горке.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, автоматизация сортировочных процессов, заполнение путей сортировочного парка, позиционирование железнодорожных подвижных единиц, интеллектуальный анализ видеоданных, цифровизация.

*Информация об авторах:

Ковалёв Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник Центра инновационных и интеллектуальных технологий на железнодорожном транспорте Ростовского филиала АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (ЦИИТ РостФ НИИАС), профессор кафедры автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, ksm@rfniias.ru.

Суханов Андрей Валерьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ростовского филиала АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» ЦИИТ РостФ НИИАС, доцент кафедры вычислительной техники и автоматизированных систем управления Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, a.suhanov@rfniias.ru.

Статья поступила в редакцию 01.04.2019, принята к публикации 14.08.2019.

For the English text of the article please see p. 105.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты № 17-20-01040 офм_м, 19-07-00263, 19-07-00195).

Сортировочная станция является важнейшим звеном технологической цепочки перевозочного процесса, поскольку себестоимость перевозок главным образом и напрямую зависит от долей простоя вагонов на ней [1]. Повышение эффективности технологических процессов, протекающих на сортировочных станциях и сортировочных горках, достигается за счёт совершенствования средств автоматизации и информатизации. Современные средства автоматизации сортировочных процессов, такие как КСАУ СП [2], MSR-32 [3], DDC-III [4] и другие, осуществляют полный контроль подвижных единиц (определение скорости движения и позиционирование) при следовании их по сортировочной горке. После выхода подвижной единицы из сортировочной горки на путь сортировочного парка определение скорости не производится, а позиционирование доступно только для последнего зашедшего в парк вагона, что приводит к необходимости имитационного моделирования движения вагонов на основе статистических данных с привлечением ручного труда осмотрщиков вагонов. Всё это приводит к уменьшению точности и объективности контроля движения вагонов в сортировочном парке и, как следствие, к превышению скоростей соударения вагонов и появлению окон на путях парка, что негативно влияет на эффективность сортировочного процесса в целом.

Целью работы является формализация задачи позиционирующего контроля вагонов при выходе их из сортировочной горки и следовании по путям железнодорожного сортировочного парка с определением скорости их движения и соударения. Кроме того, в работе представлен метод решения формализованной задачи, основанный на использовании алгоритмов распознавания и позиционирования динамических ключевых объектов на сцене путём интеллектуального анализа данных потокового видео с помощью средств компьютерного зрения.

В работе используются две группы методов компьютерного зрения, первая из которых реализует распознавание ключевых движущихся объектов на окружающем фоне, вторая — позиционирование известных заранее объектов на сцене.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные системы автоматизации железнодорожных сортировочных процессов [2–5] осуществляют полный контроль движения групп вагонов (отцепов) на сортировочной горке по прохождению ими контрольных участков (рис. 1). На тормозных позициях контроль ведётся посредством радиолокационных измерителей скорости, на путевых участках между тормозными позициями — посредством измерения скорости по датчикам счёта осей. Устройства контрольных участков позволяют точно определять скорость вагонов, соотносить её с математической моделью, полученной от системы автоматической регулировки скорости (АРС) и оперативно корректировать алгоритмы работы тормозных средств, а, при необходимости, и систем маршрутизации отцепов.

После выхода отцепа из вагонного замедлителя парковой тормозной позиции на сортировочный путь определение скорости движения и объединения отцепа со стоящими на путях вагонами не производится, расчёт ведётся исходя из имитационной модели АРС, при построении которой учитываются статические данные о состоянии продольного профиля пути, текущие метеорологические условия и ходовые свойства вагонов (весовая категория, тип буксы, условная длина).

Согласно «Методике проверки скорости соударения вагонов на путях сортиро-

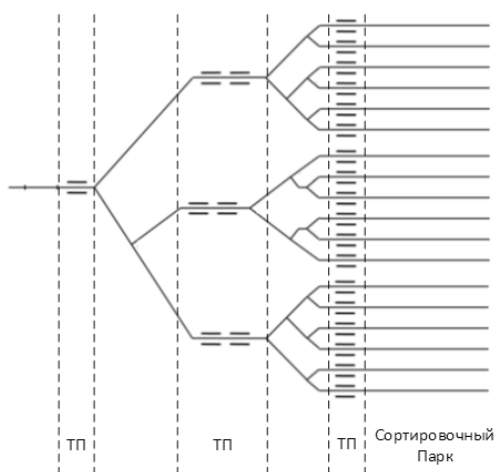


Рис. 1. Схематическое разделение сортировочной горки на контрольные участки с примыкающим сортировочным парком (ТП – тормозная позиция).



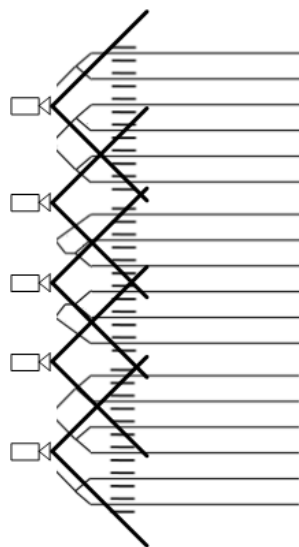


Рис. 2. Размещение камер видеонаблюдения для контроля.

вочных (подгорочных) парков»¹, в обязанности осмотрщика входят ежедневные измерения скоростей объединения вагонов в подгорочном парке для 20 вагонов при помощи радиолокационных измерителей скорости. Погрешность измерения скорости данным устройством $\pm 0,2$ км/ч, что эквивалентно 4,3 % от средней скорости движения вагонов в парке.

Количество перерабатываемых вагонов на крупной сортировочной станции, оборудованной двумя сортировочными горками, за смену в среднем составляет 9000 штук в сутки [6]. Следовательно, измерение осмотрщиками 80 вагонов в сутки (две смены на двух горках) эквивалентно покрытию всего 0,9 % от количества перерабатываемых вагонов. Кроме того, при ухудшении погодных условий резко снижается как количество, так и достоверность данных, что подтверждается анализом, проводимым в комплексной системе автоматизированного управления сортировочным процессом (КСАУ СП) [2]. Таким образом, достоверное знание о характере перемещения подвижных единиц на путях сортировочных парков в связи со всё большей автоматизацией процесса расформирования составов является всё более насущной потребностью служб железнодорожной автоматики и телемеханики.

¹ Распоряжение ОАО «РЖД» от 12.08.2010 г. № 1735р.

На основании вышеизложенного, задача контроля скорости движения и объединения вагонов на путях сортировочных парков при ведении роспуска на автоматизированных горках является весьма актуальной.

Решение данной задачи классическим способом (установка группы датчиков счёта осей на протяжённости всех путей сортировочного парка) не представляется эффективным по материальным и эксплуатационным показателям (общая длина путей сортировочного парка в среднем более 50 км). Для её решения необходимо разработать инструмент, позволяющий эффективно контролировать отцепы в сортировочном парке. В качестве такого инструмента могут быть использованы камеры видеонаблюдения, закреплённые на мачтах освещения парка (рис. 2).

Для автоматического преобразования видеосигналов в количественные характеристики движения контролируемых вагонов (скорость и положение) предлагается использование метода интеллектуального анализа видеоданных — компьютерного зрения, уже зарекомендовавшего себя в области коммерческих железнодорожных грузоперевозок при распознавании номеров вагонов [7], при контроле состояния железнодорожного пути [8], при обеспечении транспортной безопасности [9] и др.

Для решения задачи контроля движения вагонов в терминах компьютерного зрения [10] необходимо решить две подзадачи. Они — следующие:

1. Распознавание (сегментация) ключевых объектов.
2. Позиционирование ключевых объектов в видеопотоке.

В последующих разделах статьи описываются основные шаги решения поставленных выше задач, а также приводятся альтернативные методы реализации.

СЕГМЕНТАЦИЯ КЛЮЧЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Решение задачи сегментации подразумевает выделение контуров ключевых объектов на окружающем фоне. При сегментации движущихся объектов контуры определяются для сущностей, положение которых отлично хотя бы в двух последовательных кадрах [11]. Следовательно,

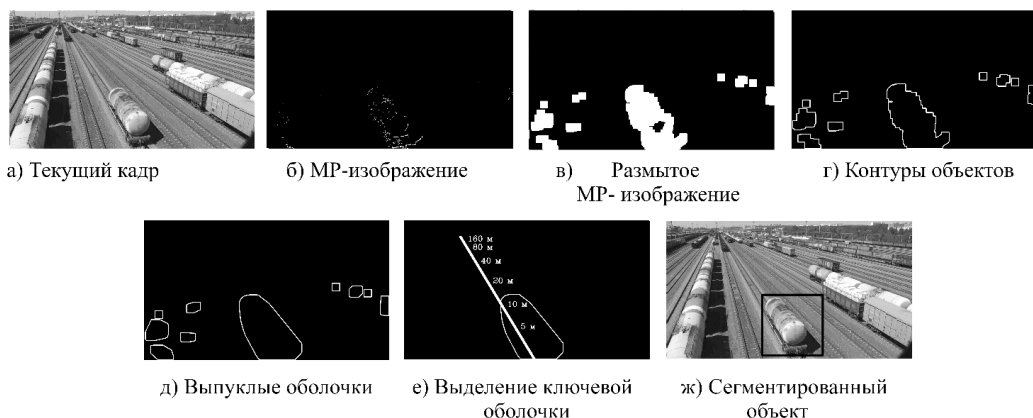


Рис. 3. Сегментация движущегося ключевого объекта-вагона через анализ межкадровой разницы.

первым этапом сегментации ключевых объектов будет определение точек, положение которых изменяется от кадра к кадру. Для его реализации в настоящей работе используется метод межкадровой разницы (МР) [12], в котором предлагается использовать разницу между интенсивностями пикселей двух последовательных кадров I_t и I_{t-1} . При этом для выявления движущихся точек необходимо выбрать граничное значение разницы, выше которого область полученного изображения будет отнесена к движущимся объектам, или – в противном случае – к фону (рис. 3б):

$$I(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } |I_t(x, y) - I_{t-1}(x, y)| > \tau, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – координаты пикселя;

τ – граничное значение разницы интенсивностей пикселей.

Выбор τ обусловлен эмпирическим вычислением минимально взятого значения, при котором ещё не заметен шум воздействия окружающего фона.

Следующим этапом является выделение контуров объектов. В представляемом исследовании для его реализации использован алгоритм выделения контуров, предлагаемый в [13]. Суть алгоритма состоит в вычислении контуров (рис. 3г) движущихся объектов на морфологически расширенном МР изображении (рис. 3в) с последующим их преобразованием к выпуклым оболочкам (рис. 3д).

Размер структурного блока морфологического расширения [14] выбирался равным половине минимального расстояния

(в пикселях) между рассматриваемым и соседним путями для получения непересекающихся контуров объектов. В качестве точек контуров использованы белые пиксели, у которых хотя бы один соседний пиксель имеет нулевую интенсивность. Для получения контуров в виде выпуклых оболочек в работе применён алгоритм Джарвиса, формирующий множество точек контура $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, такое, что угол между прямой $p_i p_i$ и прямой $p p_{i+1}$ – максимальный.

Полученные контуры, характеризующие расположение объектов, необходимо классифицировать на ключевые и не ключевые. Ключевыми будем считать контуры, удовлетворяющие двум критериям:

1. Контур расположен на линии анализируемого пути сортировочного парка.

2. Контур имеет размеры, сопоставимые с заранее известной длиной отцепы, значение которой получено от соответствующей системы автоматизации управления сортировочной горкой.

Проверка выполнения первого критерия является тривиальной и не требует пояснений. Проверка выполнения второго критерия требует сопоставления пикселей изображения с реальными координатами путей в парке. Для этого может быть использована формула калибровки камеры, представленная в [15] и позволяющая вычислить реальное расстояние на пути в метрах через расстояние на изображении в пикселях:

$$D = \frac{L \cdot K}{W / x - 1 + K}, \quad (2)$$



где D — искомое расстояние до объекта, м;
 L — длина пути, м;
 W — длина пути в пикселях;
 x — расстояние от начала пути до анализируемой точки на изображении в пикселях;

K — коэффициент наклона камеры, рассчитываемый по формуле:

$$K = \frac{W - M}{M}, \quad (3)$$

где M — расстояние от начала до середины пути в пикселях.

На рис. 3е представлена нанесённая экспертом линия анализируемого пути сортировочного парка со шкалой расстояний в метрах, полученной на основе формулы (2). Согласно информации, полученной от системы автоматизации управления сортировочным процессом, длина вагона составляет 14 метров, что соответствует длине выделенного объекта на рассчитанной шкале. Таким образом, изображённый на рис. 3е контур характеризует ключевой объект и является решением задачи сегментации.

На рис. 3ж представлено изображение, на котором сегментированный ключевой объект отмечен прямоугольником с минимальными размерами, позволяющими обвести все его контуры.

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОТОКЕ

Позиционирование решает задачу вычисления изменения положения объекта с известными начальными координатами относительно окружающего фона на основе известных характеристик объекта в предыдущем кадре. Благодаря использованию априорной информации об объекте позиционирования в качестве входных данных, такой подход является более эффективным и сопровождается меньшими временными затратами, чем повторная сегментация ключевого объекта в каждом новом кадре [16].

В предлагаемом исследовании в качестве априорных данных об объекте позиционирования используется изображение с размеченной областью расположения объекта (рис. 3ж).

В отличие от алгоритма сегментирования, позволяющего при использовании базовых подходов получить допустимое

решение первой подзадачи исследования, для позиционирования необходимо подобрать оптимальный комплексный подход, поскольку базовый алгоритм Adaboost [17], который формирует значение схожести каждого пикселя, соседнего к размеченной на обучающем изображении прямоугольной области, оказался не подходящим для позиционирования (рис. 4, 1 столбец).

Ниже приведено сравнение трёх современных алгоритмов позиционирования, позволяющих достичь наиболее допустимых результатов решения задачи позиционирования отцепов: многовариантное обучение (Multiple Instance Learning, MIL) [16], минимальная сумма квадратичных ошибок (Minimum Output Sum of Squared Error, MOSSE) [18], дискриминативный корреляционный фильтр с каналной и пространственной надёжностью (Discriminative Correlation Filter with Channel and Spatial Reliability, DCF-CSR) [19].

Алгоритм MIL основан на той же идее, что и Adaboost. Огромная разница состоит в том, что, кроме исходных данных, алгоритм также рассматривает соседние области изображения, которые потенциально считает расположением объекта с некоторым значением доверия. Это позволяет скорректировать позиционирование в случае неверного определения границ объекта на предыдущем шаге.

Алгоритм MOSSE ведёт поиск области в кадре, максимально похожей на изображение из множества, полученного путём небольших аффинных преобразований входного изображения (области с объектом). В качестве критерия поиска новой области с объектом на текущем кадре авторы предлагают использовать максимальное значение корреляции G между изображением I , являющимся потенциальной областью с объектом на тестовом изображении, и идеальным фильтром h , характеризующим входное изображение, в пространстве Фурье:

$$G = F(I) \odot F(h)^*, \quad (4)$$

где $F(\cdot)$ — быстрое преобразование Фурье;

\odot — поэлементное умножение матриц;

$*$ — комплексное сопряжение матрицы.

Задача сводится к поиску идеального фильтра h , Фурье преобразование которого удовлетворяет формуле:

$$\min_{F(h)^*} \sum_i |F(I_i) \odot F(h)^* - F(g_i)|^2, \quad (5)$$

где I_i – i -ое аффинное преобразование входного изображения;

g_i – идеальный отклик на i -ое аффинное преобразование.

Идеальный отклик представляется в виде Гауссовой функции:

$$g = \exp\left(-\frac{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}{2.0}\right), \quad (6)$$

где x_c, y_c – координаты центра области;

x, y – координаты точки на изображении.

Алгоритм DCF-CSR является одним из наиболее современных алгоритмов позиционирования. Он, подобно MOSSE, использует корреляционные фильтры. Отличительной особенностью алгоритма является использование карты пространственной надёжности, позволяющей игнорировать заведомо известные шумы путём присвоения каждой точке значения принадлежности к позиционируемому объекту, что приводит формулу (5) к виду:

$$\min_{F(h)^*} \left(\sum_i w_i |F(I_i) \odot F(h)^* - F(g_i)|^2 \right), \quad (7)$$

где w_i – вес соответствующего фильтра на основе степени аффинности преобразования, которое он реализует на входном изображении.

С точки зрения точности наиболее эффективным алгоритмом позиционирования является DCF-CSR. Для сравнения остальных алгоритмов было использовано среднее отношение числа точек перекрытия областей позиционирования к общему числу точек области позиционирования DCF-CSR. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение точности позиционирования

Алгоритм	Точность
Adaboost	0,53
MIL	0,91
MOSSE	0,67
DCF-CSR	1

Таблица 2

Сравнение скорости позиционирования

Алгоритм	FPS
Adaboost	24
MIL	15
MOSSE	45
DCF-CSR	7

Сравнение быстроты алгоритмов на Intel Core i54200U (8 Гб DDR3) с использованием библиотек OpenCV 4.0 показано в табл. 2.

Для определения скорости движения отцепы и пройденного им расстояния была использована шкала, определённая на рис. 3е. Исходное и обработанное видео с использованием позиционирования DCF-CSR выгружены на YouTube^{2,3}. Результаты исследования внедрены в качестве экспериментального проекта в подгоровном парке нечётной горки сортировочной станции Инская Западно-Сибирской железной дороги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана задача контроля подвижных единиц в подгоровном парке же-

² Vehicle tracker NIAS. [Электронный ресурс]: <https://youtu.be/x-IV7zwyp6k>.

³ Video for vehicle tracking (NIAS) [Электронный ресурс]: <https://youtu.be/tGm9mKFyQ4U>.

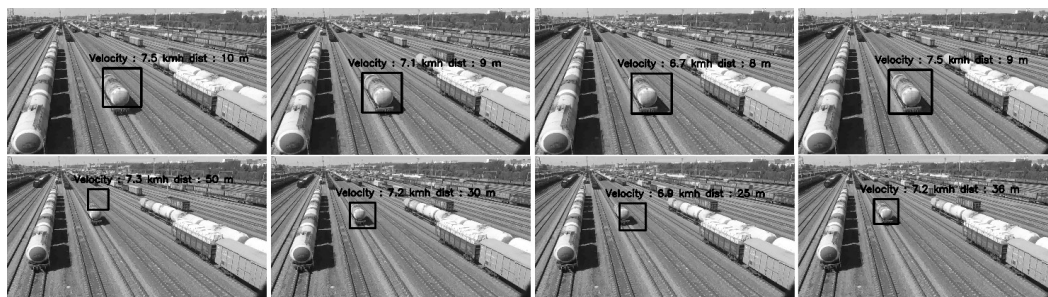


Рис. 4. Сравнение алгоритмов позиционирования (1 столбец – Adaboost, 2 столбец – MIL, 3 столбец – MOSSE, 4 столбец – DCFCSR).



лезнодорожной сортировочной станции и представлен алгоритм её решения. Предлагаемая разработка является актуальной в связи с неэффективностью использования традиционных подходов, применяемых на сортировочной горке. В работе описаны основные критерии задачи и представлены шаги возможного решения, а также проиллюстрированы результаты контроля движения одновагонного отцепа в парке.

Как следует из проведённого исследования, разработанный алгоритм является актуальным в использовании на сортировочных железнодорожных станциях, а также может быть применён в других областях, где целью является автоматический контроль скорости и местоположения объектов относительно расположения видеокамеры.

Результатом настоящей работы является обоснование актуальности использования компьютерного зрения в области железнодорожных сортировочных процессов. Внедрение разрабатываемых алгоритмов в системы автоматизации железнодорожных сортировочных процессов (например, КСАУ СП) позволит объективизировать получаемую информацию о состоянии сортировочного парка. Это в итоге создаст возможность более точной подстройки подсистемы прицельного торможения на горке, что сократит количество опасных соударений и предотвратит появление «окон» между отцепами на сортировочных путях.

В качестве дальнейших исследований планируется совершенствование представленного алгоритма для контроля движущихся отцепов, содержащих два и более вагона, а также тестирование разработанного подхода при плохой видимости (ночное время суток и неблагоприятные погодные условия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалёв С. М., Ковалёв В. С., Суханов А. В. Интеллектуальный подход к прогнозированию нештатных ситуаций в процессе расформирования поездов на сортировочных горках // Труды V научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2016, 17–18 ноября 2016 г., Москва, Россия). — М.: ОАО «НИИАС», 2016. — С. 168–172.
2. Шабельников А. Н., Соколов В. Н. КСАУ СП-новое направление автоматизации сортировоч-

ных горок // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 8. — С. 2–4.

3. Hansmann R. S., Zimmermann U. T. Optimal sorting of rolling stock at hump yards / R. S. Hansmann, U. T. Zimmermann // Mathematics-key technology for the future. — 2007. — № 8. — pp. 189–203.

4. Zhang C. [et al]. Analysis of hump automation in China // Traffic and Transportation Studies. — 2000. — pp. 285–290.

5. Кобзев В. А. Автоматизированное управление на сортировочных станциях // Мир транспорта. — 2010. — № 5. — С. 60–66.

6. Шабельников А. Н. Совершенствование комплексной системы автоматизации управления сортировочным процессом и горочных технических средств в рамках реализации проекта «цифровая сортировочная станция» // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте: Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции «ТрансЖАТ — 2018». — Ростов-на-Дону. — 243 с.

7. Артемьев И. С. Новый подход к идентификации подвижных единиц // Автоматика, связь, информатика. — 2016. — № 11. — С. 11–14.

8. Васин Н. Н., Диязитдинов Р. Р. Система технического зрения для контроля состояния железнодорожного пути // Компьютерная оптика. — 2016. — № 3. — С. 410–415.

9. Гречухин И. А., Каркищенко А. Н. Интеллектуальная обработка видеoinформации в задачах транспортной безопасности // Железнодорожный транспорт. — 2011. — № 4. — С. 45–47.

10. Mahalingam T., Subramoniam M. A robust single and multiple moving object detection, tracking and classification // Applied Computing and Informatics. — 2018. — № 1. — pp. 1–10.

11. Tokmakov P., Schmid C., Alahari K. Learning to segment moving objects // International Journal of Computer Vision. — 2017. — № 3. — pp. 1–20.

12. Singla N. Motion detection based on frame difference method // International Journal of Information & Computation Technology. — 2014. — № 15. — pp. 1559–1565.

13. Aksaç A., Öztürk O., Özeyer T. Real-time multi-objective hand posture/gesture recognition by using distance classifiers and finite state machine for virtual mouse operations // 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). — IEEE, 2011. — pp. 457–461.

14. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. — БИНОМ. Лаб. знаний, 2006. — С. 93–103.

15. Шубникова И. С., Палагута К. А. Анализ способов и алгоритмов определения параметров объекта и расстояния до него по изображению // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». — 2013. — Т. 1. — С. 352–355.

16. Babenko B., Yang M. H., Belongie S. Visual tracking with online multiple instance learning // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — IEEE, 2009. — pp. 983–990.

17. Yeh Y. J., Hsu C. T. Online selection of tracking features using AdaBoost // 16th International Conference on Computer Communications and Networks. — IEEE, 2007. — pp. 1183–1188.

18. Bolme D. S. [et al]. Visual object tracking using adaptive correlation filters // Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — IEEE, 2010. — pp. 2544–2550.

19. Lukezic A. [et al]. Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2017. — pp. 6309–6318. ●