

УДК 681.518.3

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-88-94

Исследование возможности создания на основе современного смартфона измерительной системы для оценки параметров перемещения объекта

Ю. А. Порсев, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. Ю. Вдовин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Е. М. Марков, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. Г. Корнилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

При изучении разнообразных быстропротекающих процессов в настоящее время широко применяют высокоскоростную съемку. Основным сдерживающим фактором для ее дальнейшего распространения остается высокая стоимость необходимого оборудования. При этом современные мобильные устройства (в том числе смартфоны) постоянно совершенствуются, некоторые модели оснащены видеокамерами с высокой скоростью записи – 1000 кадров/с и выше.

В статье исследуется возможность создания на основе одной из современных моделей смартфонов измерительной системы для оценки параметров перемещения объектов. Приведена структурная схема системы, создан макет подобной системы. Для проверки работоспособности созданного макета системы было разработано программно-аппаратное средство имитации движения объекта на платформе Arduino Uno с двигателем и кареткой, перемещающейся по направляющим. Приведены графики изменения координаты и скорости объекта, полученные с использованием программы Tracker 5.1.5. Выполнена теоретическая оценка погрешности определения скорости объекта с помощью реализованного макета системы. Кроме того, выполнена оценка диапазона скоростей объекта, которые можно измерять посредством созданной системы, а также диапазона допустимых перемещений объекта.

Результаты проведенных экспериментов доказывают возможность создания на основе рассмотренной модели смартфона измерительной системы для оценки скорости движущихся малых объектов с определенными ограничениями. При этом для создания полноценной измерительной системы, не требующей дополнительной обработки получаемого видеоизображения на ПК и способной осуществлять расчет нужных результатов непосредственно по окончании процесса измерения, необходима разработка собственного программного обеспечения, что целесообразно делать с использованием существующих свободных библиотек.

Ключевые слова: высокоскоростная видеосъемка, измерительная система, параметры перемещения объекта, имитатор.

Введение

Область применения высокоскоростных камер в настоящее время чрезвычайно широка и включает изучение быстропротекающих процессов (сварки [1], взрывов и ударов [2]), изучение движения потока частиц в струе жидкости [3] и плазмы [4] и даже в медицине, например, при диагностике различных голосовых расстройств [5]. В текущий момент продолжается ее проникновение и во многие другие сферы науки и техники, например, в область испытаний стрелкового оружия, где традиционно применяются другие методы измерений [6–12]. При этом основным сдерживающим фактором остается стоимость подобного оборудования, которая по-прежнему достаточно высока.

При этом современные мобильные устройства (в том числе смартфоны) постоянно совершенствуются и получают все более широ-

кие функциональные возможности: запись и воспроизведение мультимедиа, подключение к интернету, функции оплаты, распознавание лиц или отпечатков пальцев.

Современные мобильные устройства имеют операционную систему (ОС) и могут содержать в себе сенсорные экраны, а также разнообразные датчики: акселерометры, компасы, магнитометры и гироскопы. Более того, параллельно с расширением функциональных возможностей мобильных устройств, происходит совершенствование характеристик их отдельных элементов. Так, например, современные смартфоны могут содержать в своем составе видеокамеры с высокой скоростью записи (по утверждениям производителей – 1000 кадров/с и выше – <https://www.smartprix.com/bytes/best-phones-to-capture-slow-motion-videos>).

С учетом всего этого вполне реальной становится идея использовать смартфон в качестве основной части измерительной системы, например, для оценки параметров перемещения различных объектов (затворной рамы стрелкового оружия, деталей конвейера и пр.). Преимущества такого подхода очевидны: существенное уменьшение стоимости измерительной системы, обусловленное использованием стандартных, массово выпускаемых комплектующих, существенное повышение мобильности и портативности системы.

Целью настоящей статьи является исследование возможности создания измерительной системы на основе смартфона (на примере модели Xiaomi MI 10Pro). Для этого проведем эксперимент, который позволит оценить конкретные характеристики созданного макета подобной системы (диапазон измеряемых скоростей движения объекта, диапазоны величин возможных перемещений объекта и размеров самого объекта, погрешности при измерении времени, расстояния и скорости и пр.).

Описание эксперимента

Измерительная система состоит из современного смартфона, оснащенного высокоскоростной видеокамерой, штатива для фиксации смартфона в заданном положении и персонального компьютера или ноутбука с программным обеспечением, при помощи которого производится обработка результатов (рис. 1). Необходимо также отметить, что для подобных систем важное значение имеют условия освещенности, поэтому в некоторых случаях систему необходимо будет дополнять источниками света.



Рис. 1. Структурная схема системы
Fig. 1. System block diagram

Параметры высокоскоростной камеры смартфона приведены в табл. 1 (<https://www.kimovil.com/ru/xiaomi-mi-10-pro/camera>).

Таблица 1. Параметры высокоскоростной камеры Xiaomi MI 10Pro
Table 1. Xiaomi MI 10 Pro High-speed Camera Parameters

Параметр	Значение
Разрешение	1920×1080
Максимальная частота кадров	960

Для создаваемой измерительной системы чрезвычайно важную роль будут иметь применяемые алгоритмы обработки видеоизображения. К настоящему моменту для оценки различных параметров движения объектов по видеоизображению существует достаточно большой выбор ПО: программа Tracker 5.1.5 (<https://physlets.org/tracker/>) с открытым исходным кодом, свободные библиотеки OpenCV (<https://opencv.org/>) и OSP (<https://www.compadre.org/osp/webdocs/programming.cfm>).

Существующее свободное ПО позволяет:

- отслеживать объект и получать данные о его координатах, скорости и ускорении;
- создавать кинематические и динамические модели объектов с заданной массой;
- получать данные о моделировании в виде электронных таблиц и графиков;
- использовать видео большинства форматов (mov / avi / flv / mp4 / wmv и т. д.);
- применять встроенные фильтры яркости/контрастности, исправлять искажения (в том числе радиальные) на исследуемых объектах;
- осуществлять выбор системы координат, масштаба, точек начала и завершения анализируемого фрагмента видео.

Так как нашей целью не является создание полноценной измерительной системы, то можно выбрать программу Tracker 5.1.5, обладающую всеми необходимыми функциями обработки видеофрагментов.

Для исследования работы измерительной системы в различных режимах могут применяться разнообразные средства имитации (имитаторы) [13]. Для отладки разрабатываемой системы и оценки ее точности разработано средство имитации движения объекта на платформе Arduino Uno с драйвером двигателя L298N и кареткой, направляющими и двигателем (которые применяются в CD/DVD-приводах). Средство имитации запрограммировано следующим образом: при подаче питания на платформу Arduino, после инициализации подключенного двигателя посредством драйвера, осуществляется возвратно-поступательное движение каретки по направляющим, что может служить имитацией движения, например, затворной рамы оружия. Структурная схема средства имитации приведена на рис. 2.

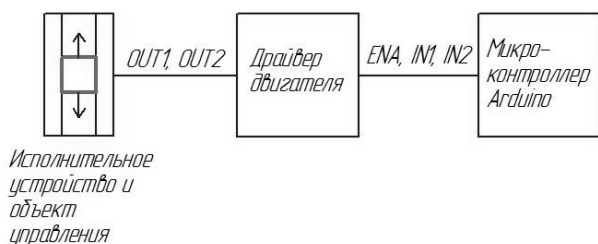


Рис. 2. Структурная схема созданного средства имитации

Fig. 2. Block diagram of the created imitation tool

После инициализации средства имитации несколько циклов возвратно-поступательного

движения были записаны с помощью высокоскоростной видеокамеры. Полученный видеофайл обрабатывался в программе Tracker 5.1.5. Для обработки результатов требуется внести необходимые характеристики исследуемого объекта. Величина перемещения каретки в одном направлении составляет 38 мм.

Первые эксперименты показали, что при использовании режима с заявленной производителем частотой записи 960 кадр/с полученный видеофайл содержит по 4 одинаковых кадра в анализируемом потоке, следовательно, реальная частота составляет лишь 240 кадр/с.

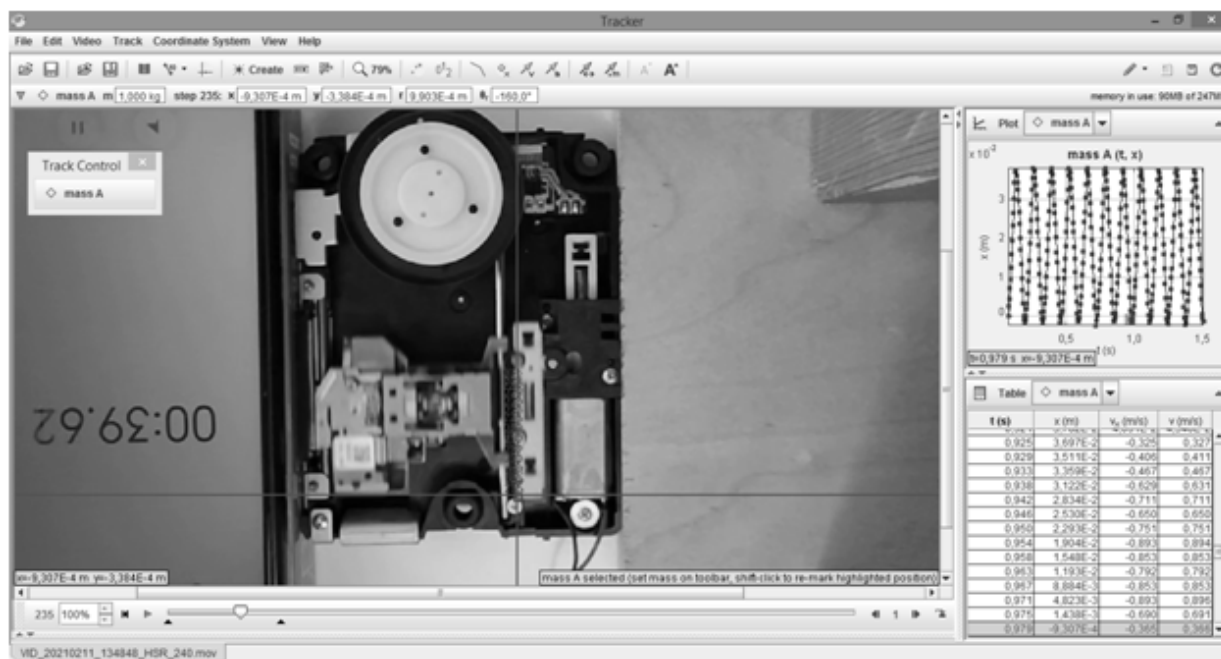


Рис. 3. Использование программы Tracker 5.1.5

Fig. 3. Using the Tracker 5.1.5 program

Полученные графики изменения координаты и скорости объекта приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

В целом результаты, приведенные на рис. 4, 5, показывают, что работа как спроектированного средства имитации движения объекта, так и самой измерительной системы достаточно стабильна.

Инструментальная погрешность измерения расстояния с использованием видеокамеры связана с разрешением матрицы и составляет 0,5 пикселя. Тогда при разрешении по вертикали 1080 пикселей (что соответствует длине примерно в 270 мм) абсолютная погрешность измерения расстояния в проведенном эксперименте $\Delta x = \frac{0,5 \cdot 270}{1080} \approx 0,125$ мм. Инструментальная погрешность измерения времени

с использованием видеокамеры определяется частотой съемки и для рассматриваемой модели составляет $\Delta t = \frac{0,5}{240} \approx 2,08$ мс.

Таким образом, при оценке, например, средней скорости движения на измерительной базе длиной $x = 38$ мм можем получить относительную погрешность измерения $\delta V \leq \delta x + \delta t = \frac{0,125}{38} + \frac{2,08}{65} \approx 3,5\%$ (по графику на рис. 4 можно определить среднее время движения каретки в одну сторону $t = 65$ мс). При этом необходимо иметь в виду, что это значение получено без учета различных оптических искажений, характерных для оценки расстояния с помощью видеокамеры [14]. С другой стороны, полученную погрешность можно уменьшить, если иметь изображение с разрешением

в несколько пикселей на миллиметр для минимизации относительной ошибки его масштабирования, а также «пиксельной» погрешности [15].

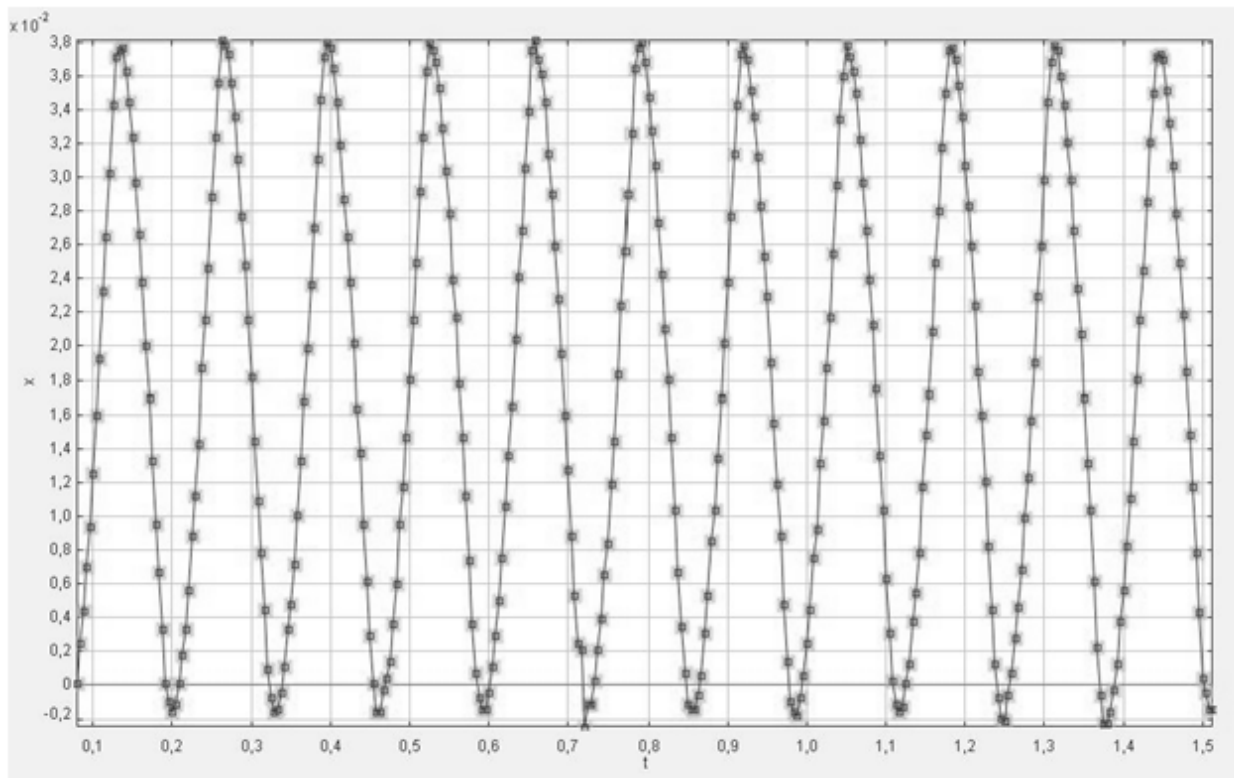


Рис. 4. График изменения координаты объекта
Fig. 4. Object coordinate change graph

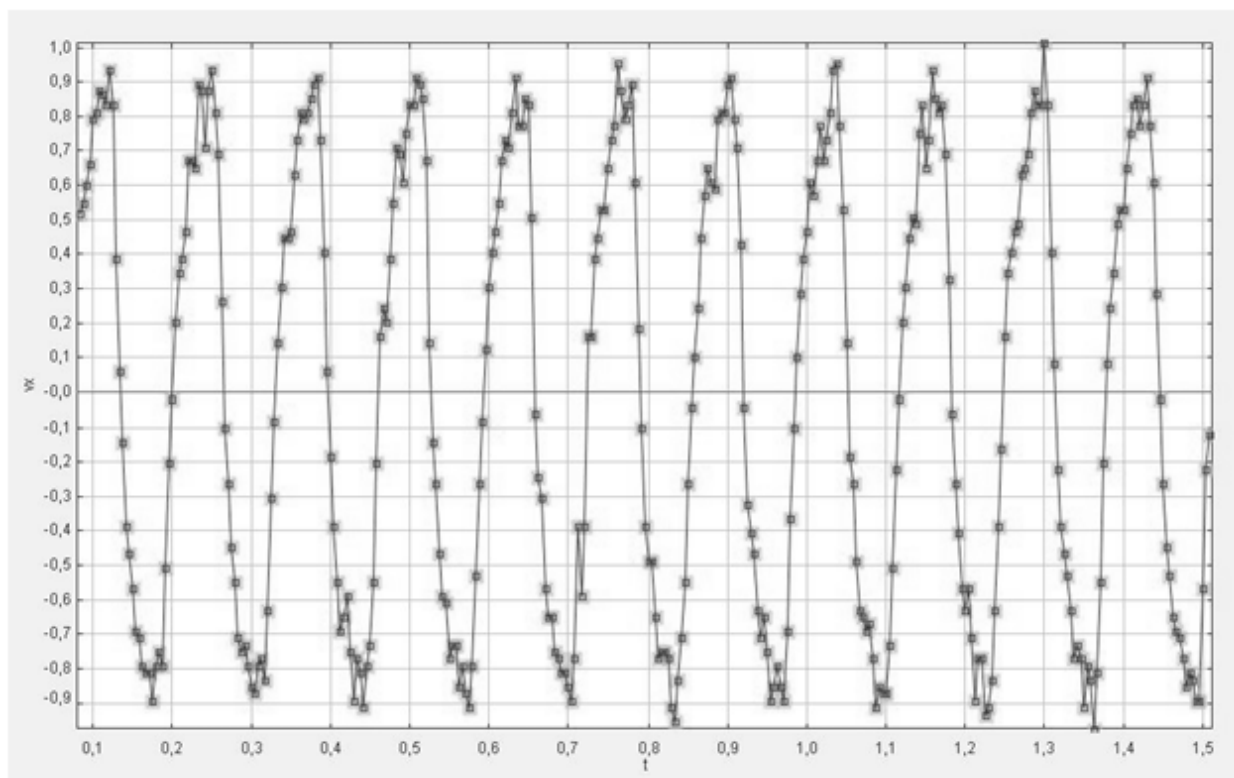


Рис. 5. График изменения скорости объекта
Fig. 5. Graph of change of object speed

Для оценки конкретных параметров измерительной системы (диапазона допустимых скоростей объекта, диапазона допустимой величины перемещения объекта) можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta V \leq \delta x + \delta t \\ \delta x = \frac{\Delta x}{x_{\min}} = \frac{0,5l_{\text{pix}}}{x_{\min}} \\ x_{\max} = l_{\text{pix}} \cdot M \\ \delta t = \frac{\Delta t}{t_{\min}} = \frac{0,5}{f \cdot x_{\min}} \\ \frac{x_{\min}}{V_{\max}} \geq \frac{2}{f} \\ \frac{x_{\max}}{V_{\min}} \leq t_{\max} \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь δV , δx , δt – относительные погрешности оценки скорости, расстояния и времени соответственно; Δx и Δt – абсолютные погрешности оценки расстояния и времени (в данном случае инструментальные) соответственно; x_{\min} и x_{\max} , t_{\min} и t_{\max} , V_{\min} и V_{\max} – минимальные и максимальные значения дальности перемещения, времени движения, скорости объекта соответственно; l_{pix} – размер (в мм) одного пикселя на изображении; M – размер (в пикселях) большей стороны изображения; f – частота съемки камеры.

Первые 4 соотношения очевидны, пятое обусловлено тем, что за время регистрации необходимо получить хотя бы два кадра (желательно, большее число), последнее ограничивает время регистрации максимальным временем записи t_{\max} , которое может позволить видеокamera смартфона.

Если ограничить допустимые погрешности величинами $\delta x \leq 0,02$, $\delta t \leq 0,08$ и установить для получаемого изображения соотношение в 10 пикселей/мм, то, проведя элементарные расчеты по (1), получим диапазон допустимых перемещений от 2,5 до 192 мм. А если дополнительно ограничить его величиной $x_{\min} = 10$ мм, то с учетом достаточно большого времени записи доступного для рассматриваемого смартфона и составляющего, по крайней мере, несколько минут систему можно использовать при регистрации скоростей движения объекта в диапазоне от 0,001 до 1,2 м/с.

Выводы

Полученные результаты доказывают возможность создания и использования предложенного варианта построения измерительной

системы для оценки скорости в диапазоне скоростей от тысячных долей м/с до единиц м/с движущихся малых объектов на расстояния, составляющие десятки миллиметров с погрешностью, не превышающей единиц процентов.

Однако для создания полноценной измерительной системы нужно разрабатывать собственное ПО, которое позволило бы получать результат непосредственно по окончании процесса измерения (испытания). Такое ПО целесообразно создавать с использованием упомянутых ранее свободных библиотек.

Более того, учитывая весьма существенные вычислительные мощности современных смартфонов, реальной становится идея полного исключения необходимости использования в составе измерительной системы ПК, таким образом, вся измерительная система (за исключением элементов освещения) будет реализована в смартфоне. Такая система будет способна осуществлять расчет нужных результатов непосредственно по окончании измерения.

Следует отметить, что применение подобных систем оценки параметров перемещения (скорости, ускорения) объектов видимых элементов возможно в различных областях науки и техники, где требуется оценка параметров движения малых объектов с указанными параметрами (измерение скорости деталей конвейера, прутков арматуры и пр.), в том числе в зависимости от предъявленных заказчиком требований – с использованием различных вариантов видеокamer и мобильных устройств.

Библиографические ссылки

1. Информационно-измерительный комплекс для исследования процессов плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке / С. В. Болотов, А. В. Хомченко, А. В. Шульга, Е. Л. Болотова // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 6 (91). С. 4–11. DOI:10.30987/1999-8775-2020-6-4-11.
2. Орлов М. Ю., Богомолов Г. Н. К пробитию однородных и двухслойных стальных пластин с ударником с закругленной головной частью // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : Международная молодежная научная конференция, 2018. С. 310–312.
3. Оптические исследования динамики развития водяной струи высокого давления / И. А. Знаменская, Д. А. Нерсесян, Н. Н. Сыроев, Е. Ю. Коротеева, Я. Н. Ширшов // Вестник Московского университета. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 2016. № 4. С. 68–75.
4. Иордан В. И., Кобелев Д. И., Астахов Е. С. Диагностика распределенных параметров гетерогенного газотермического потока методами обра-

ботки потока изображений при высокоскоростной видеосъемке // Параллельное программирование и компьютерное моделирование процессов и явлений в естественнонаучных областях с использованием параллельных вычислений. Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2019. Т. 3, № 1. С. 89–93.

5. Осипенко Е. В., Султонова К. Б. Высокоскоростная съемка гортани как метод оценки вибраторных характеристик голосовых складок // Российская оториноларингология. 2013. № 4. С. 98–102.

6. Петухов К. Ю. Алгоритмы обработки аналоговых сигналов при цифровых измерениях в информационно-измерительных системах для стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2003.

7. Афанасьева Н. Ю. Информационно-измерительная система на основе световых экранов для испытаний стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2003.

8. Афанасьев В. А. Совершенствование моделей и программно-аппаратных средств для контроля изделий по внешнебаллистическим параметрам : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2013.

9. Афанасьев В. А., Лялин В. Е. Проектирование информационно-измерительных систем на основе световых мишеней для контроля изделий стрелкового оружия по внешнебаллистическим параметрам : монография. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. 364 с.

10. Казаков С. В. Разработка и исследование информационно-измерительной системы на основе акустических мишеней для испытаний стрелкового оружия на открытой местности: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2002.

11. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. М. : ЦНИИ информации, 1974. 228 с.

12. Шкворников П. Н., Платонов Н. М. Экспериментальная баллистика. М. : Оборонгиз, 1953. 392 с.

13. Вдовин А. Ю. Средства имитации для автоматизированных систем, применяемых при испытаниях стрелкового оружия // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 246–258. DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-2-246-258.

14. Писарев С. А., Чирков Д. В., Федорова Е. А. Анализ aberrаций и способов минимизации их влияния на результаты исследований быстротекающих динамических процессов с использованием видеокамеры высокоскоростной съемки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 6–15. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-6-15.

15. Чирков Д. В., Федорова Е. А. К вопросу определения характеристик движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 53–63. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-53-63.

References

1. Bolotov S.V., Khomchenko A.V., Shul'ga A.V., Bolotova E.L. [Information-measuring complex for research of processes of melting and transfer of electrode metal during arc welding]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. No 6. Pp. 4-11 (in Russ.). DOI: 10.30987/1999-8775-2020-6-4-11.

2. Orlov M.Yu., Bogomolov G.N. *K probituyu odnorodnykh i dvukhsloinykh stal'nykh plastin s udarnikom s zakruglennoi golovnoi chast'yu* [To break through homogeneous and double-layer steel plates with a drummer with a rounded head part], *Aktual'nye problemy sovremennoi mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoi mekhaniki. Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya* [Proc. Actual problems of modern continuum mechanics and celestial mechanics], 2018, pp. 310-312 (in Russ.).

3. Znamenskaya I.A., Nersesyan D.A., Sysoev N.N., Koroteeva E.Yu., Shirshov Ya. N. [Optical research of the dynamics of the development of a high-pressure water jet]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. FIZIKA. ASTRONOMIYA*, 2016, vol. 3, no 4, pp. 68-75 (in Russ.).

4. Iordan V.I., Kobelev D.I., Astakhov E.S. [Diagnostics of the distributed parameters of a heterogeneous gas-thermal flow by methods of image flow processing in high-speed video shooting]. *Parallel'noe programmirovaniye i komp'yuternoe modelirovaniye protsessov i yavlenii v estestvennonauchnykh oblastyakh s ispol'zovaniem parallel'nykh vychislenii. Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii*, 2019, vol. 3, no 1, pp. 89-93 (in Russ.).

5. Osipenko E.V., Sul'tonova K.B. [High-speed laryngeal shooting as a method for evaluating the vibratory characteristics of vocal folds] *Rossiiskaya otorinolaringologiya*, 2013, no 4, pp. 98-102 (in Russ.).

6. Petukhov K.Yu. *Algoritmy obrabotki analogovykh signalov pri tsifrovyykh izmereniyakh v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh dlya strelkovogo oruzhiya* [Algorithms for processing analog signals in digital measurements in information-measuring systems for small-arms]: PhD thesis. Izhevsk, 2003 (in Russ.).

7. Afanas'eva N.Yu. *Informatsionno-izmeritel'naya sistema na osnove svetovykh ekranov dlya ispytaniy strelkovogo oruzhiya* [Information-measuring system based on light screens for testing small arms]: PhD thesis. Izhevsk, 2003 (in Russ.).

8. Aphanasiev V.A. *Sovershenstvovaniye modelei i programmno-apparatnykh sredstv dlia kontrolya izdelii po vneshneballisticheskim parametram* [Improvement of models and hardware and software for controlling products by external ballistic parameters]: PhD thesis. Izhevsk, 2013 (in Russ.).

9. Afanas'ev V.A., Ljalin V.E. *Proektirovaniye informacionno-izmeritel'nykh sistem na osnove svetovykh mishenej dlja kontrolya izdelij strelkovogo oruzhiya po vneshneballisticheskim parametram* [Design of information and measurement systems based on light targets

for the control of small arms products by external ballistic parameters]. Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Tech. Univ. Press, 2020. (in Russ.).

10. Kazakov S.V. *Razrabotka i issledovanie informatsionno-izmeritel'noi sistemy na osnove akusticheskikh mishenei dlya ispytaniy strelkovogo oruzhiya na otkrytoi mestnosti* [Development and research of an information-measuring system based on acoustic targets for testing small arms in open areas]: PhD thesis. Izhevsk, 2002. (in Russ.).

11. Konovalov A. A., Nikolaev Yu. V. *Vneshnjaja ballistika* [External Ballistic]. Moscow, CNII informacii, 1974, 228 p. (in Russ.).

12. Shkvornikov P.N., Platonov N.M. *Eksperimental'naya ballistika* [Experimental Ballistics]. Moscow : Oborongiz Publ., 1953, 392 p. (in Russ.).

13. Vdovin A.Yu. [Imitation tools for automated systems used in small arms testing]. *Izvestiya Sara-*

tovskogo Universiteta. Novaja serija. Serija: Matematika. Mechanica. Informatica, 2021, vol. 21, no 2, pp. 246–258 (in Russ.). DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-2-246-258.

14. Pisarev S.A., Chirckov D.V., Fedorova E.A. [Analysis of Aberrations and Ways to Minimize Their Impact on the Results of Studies of Fast-Flowing Dynamic Processes Using a High-Speed Video Camera]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol 23, no 4, pp. 6-15 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-6-15.

15. Chirckov D.V., Fedorova E.A. [To the Question of Determining the Characteristics of the Object Motion Based on High-Speed Video Recording]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol 24, no 1, pp. 53-63 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-53-63.

Research of the Possibility of Creating a Measuring System Based on a Modern Smartphone for Estimating the Parameters of Object Movement

Yu. A. Porsev, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. Yu. Vdovin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

E. M. Markov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I. G. Kornilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

When studying different fast-moving processes, high-speed video recording is now widely used. The main deterrent for its further distribution remains the high cost of the necessary equipment. Herewith modern mobile devices (including smartphones) are constantly improved, some models are supplied with video cameras with high recording speed – 1000 frames/s and higher.

In the paper the possibility of creating a measuring system based on one of the modern smartphone models to analyze the parameters of object motion is studied. The block diagram of the system is given; a layout of such a system has been created. To verify the workability of the developed model of the system, a software and hardware facility was developed to imitate the motion of an object on the Arduino Uno platform with an engine and a carriage moving along the guides. Graphs of changing the coordinates and speed of the object obtained using the program Tracker 5.1.5 are shown. A theoretical estimate of the error in determining the speed of an object using the implemented model of the system is performed. In addition, the estimation of the range of object speeds that can be measured using the developed system, as well as the range of permissible object movements was performed.

The results of the performed experiments prove the possibility of creating a measuring system on the basis of the considered model of the smartphone to assess the speed of moving small objects with certain limitations. At the same time, to create a full-fledged measuring system that does not require additional processing of the received resulting video image on a PC and is capable of calculating the necessary results immediately after the end of the measurement process, it is necessary to develop our own software, which is advisable to do using the existing free libraries.

Keywords: high-speed video recording, measuring system, object movement parameters, imitator

Получено: 02.04.2021