

УДК: 623.4.018

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-53-63

К вопросу определения характеристик движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки*

Д. В. Чирков, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Е. А. Федорова, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассматриваются вопросы применения высокоскоростной видеосъемки для определения элементов движения различных объектов.

Описывается методика выбора параметров высокоскоростной видеосъемки в зависимости от предполагаемой скорости движения объекта, позволяющая минимизировать эффект слеодообразования, который оказывает существенное влияние на результаты определения элементов движения объекта при значительном изменении скорости его движения на исследуемом участке траектории.

Представлены зависимости для погрешностей определения элементов движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки. Сделаны выводы, что наибольшее влияние на точность получаемых результатов оказывает отношение величины масштабирующего элемента к размеру области съемки.

На основе результатов экспериментальных исследований определения скорости движения пули винтовки Иж-61 показано, что определение элементов движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки по точности не уступает специализированному измерительному оборудованию.

Представлены экспериментальные исследования влияния методов обработки видеофайлов на точность результатов определения элементов движения объектов, находящихся во вращательном движении. Результаты исследований показали, что применяемые методы обработки видеофайлов (графический и автоматизированный) не оказывают принципиального влияния на точность определения элементов движения. Так, при определении скорости пули винтовки Иж-61 специализированным прибором РС-4М по восьми измерениям средняя скорость составила 119 м/с при среднеквадратическом отклонении 6,07, а при использовании высокоскоростной видеосъемки с учетом масштабирования изображения по дульному срезу ствола – 117,58 м/с при среднеквадратическом отклонении 6,32. При этом автоматизированный метод обработки видеофайлов с применением специализированных программ видеоанализа позволяет принципиально сократить время обработки и исключить влияние человеческого фактора на результаты измерений.

Ключевые слова: высокоскоростная видеосъемка, быстропотекающие динамические процессы, стрелковое оружие, видеофайл.

Введение

В работе [1] рассматривались общие принципы применения высокоскоростной видеосъемки при исследовании быстропотекающих процессов, были описаны способы минимизации влияния аббераций, возникающих при формировании изображений видеокамерой с использованием различных объективов и скорости видеосъемки. Также отмечалось, что основные погрешности при определении элементов движения исследуемых объектов на основе высокоскоростной видеосъемки возникают в ходе непосредственной обработки видеофайлов.

Настоящая статья посвящена вопросам определения элементов движения исследуемых объектов на основе высокоскоростной видеосъемки, произведена оценка влияния различных способов обработки видеофайлов на точ-

ность получения результатов и представлено сопоставление характеристик движения некоторых объектов, определенных на основе высокоскоростной видеосъемки и с применением специализированного измерительного оборудования.

В общем случае экспериментальное определение элементов движения объекта возможно на основе различных принципов, при этом обязательным условием является фиксация (тем или иным способом) времени движения объекта на исследуемом участке траектории. Все способы экспериментального определения элементов движения объектов (вне зависимости от принципов их работы) можно классифицировать по определяемой характеристике: путь, скорость или ускорение объекта. Например, в оружейной практике широкое применение для определения скорости пули нашли измерительные приборы

на основе фотоблокирующих устройств, позволяющие определить среднюю скорость на некотором фиксированном участке пути [2–4]. Авторами работ [5, 6] аналогичный принцип был применен для определения скорости ведущего звена автоматики.

При определении элементов движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки определяемым параметром является его перемещение. Кроме того, скоростная видеосъемка позволяет определить не только среднюю скорость движения объекта на некотором участке его траектории, но и при достаточной скорости съемки построить зависимости изменения элементов движения по времени.

Цель исследования – разработка метода выбора параметров высокоскоростной видеосъемки, обеспечивающих наименьшие погрешности при определении элементов движения исследуемого объекта.

Общие сведения и анализ возникающих погрешностей при определении элементов движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки

Важнейшим параметром при определении элементов движения объекта на основе высокоскоростной видеосъемки является ее скорость. Под скоростью (кадров/с) или частотой съемки (Гц) необходимо понимать время между про-

цессом начала построения двух соседних кадров. При этом не менее важным параметром является время формирования изображения, минимальное и максимальное значения которого представлены в руководстве по эксплуатации высокоскоростных видеокамер.

На рисунке 1 графически представлена зависимость максимального времени построения изображений от скорости съемки для видеокамеры Olympus i-speed 3 (максимальная скорость съемки 150 000 кадров/с) при минимальном времени срабатывания затвора камеры 2,169 мкс (Камера Olympus i-speed 3. Руководство по эксплуатации на англ. языке. 2011. С. 215–216).

Представленная на рисунке 1 зависимость в указанном диапазоне скоростей съемки может быть описана функцией (с точностью до 1 мкс)

$$t_{\max} = \frac{1000}{n_c} - 0,004,$$

откуда скорость (частота) съемки

$$n_c = \frac{1000}{t_{\max} + 0,004}. \quad (1)$$

Таким образом, время построения изображения для камеры Olympus i-speed 3 при определенной скорости съемки будет лежать в диапазоне 2,169 мкс ... t_{\max} .



Рис. 1. Зависимость максимального времени построения изображений от скорости видеосъемки для камеры Olympus i-speed 3

Fig. 1. Dependence of the maximum imaging time on the video shooting speed for the Olympus i-speed 3 camera

Поэтому в любом случае при исследовании движущихся объектов имеет место эффект слепообразования (эффект размытого затвора, или rolling shutter effect) [7]. Данный эффект приводит к тому, что размер объекта в направлении движения всегда будет больше на величину

произведения скорости объекта (V_0) на время построения изображения (t_n).

На рисунке 2 представлено изображение пули при выстреле из пневматической винтовки Иж-61 на расстоянии 0,3 м от дульного среза ствола, полученное при скорости съемки

20 000 кадров/с с использованием видеокамеры Olympus i-speed 3.

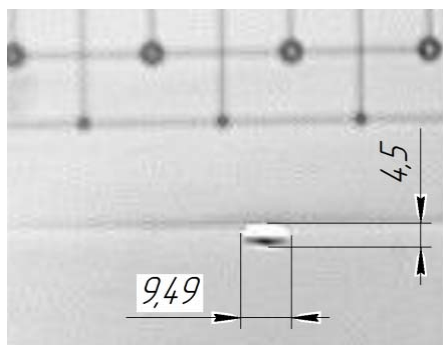


Рис. 2. Изображение пули при выстреле из пневматической винтовки Иж-61, полученное при использовании видеокамеры Olympus i-speed 3 со скоростью съемки 20 000 кадров/с

Fig. 2. Image of a bullet when fired from an Izh-61 air rifle, obtained using an Olympus i-speed 3 video camera at a shooting speed of 20,000 frames per second

Изображение масштабировалось по диаметру пули (4,5 мм), при этом ее длина на изображении ($l_{и}$) – 9,49 мм, когда как реальный ее размер ($l_{н}$) составляет 5,5 мм. В зафиксированной точке траектории скорость движения пули составила 121 м/с (определена с использованием прибора для измерения скорости пули РС-4М), тогда время построения изображения для рассматриваемого случая:

$$t_{и} = \frac{l_{и} - l_{н}}{n_c} = 0,033 [\text{мс}].$$

В соответствии с данными, представленными на рисунке 1, диапазон времени построения изображений при скорости съемки 20 000 кадров/с составляет 2,169 мкс ... 0,047 мс. Время построения изображения во многом определяется насыщенностью содержания фона съемки.

Увеличение скорости съемки приводит к уменьшению слеодообразования. В целом при выборе частоты видеосъемки в зависимости от предполагаемой максимальной скорости движения исследуемого объекта можно воспользоваться зависимостью (1). Допустимое максимальное время построения изображения может быть определено как

$$t_{\max} \leq \frac{\eta_c l_o}{100V_{o\max}}, \quad (2)$$

где η_c – допустимый относительный след, %; l_o – истинный размер объекта в направлении его движения, м; $V_{o\max}$ – предполагаемая максимальная скорость объекта, м/с.

В соответствии с зависимостями (1) и (2) при определении элементов движения пули калибра 4,5 мм, длиной 5,5 мм, допустимого увеличения объекта 10 % и предполагаемой скоростью объекта до 140 м/с скорость съемки должна быть выше 126 000 кадров/с. На практике при найденном значении скорости съемки слеодообразование будет меньше 10 %, так как истинное и максимальное время построения изображений, как было показано, могут значительно отличаться.

На рисунке 3 представлен пример определения следа 4,5-мм пули при скорости ее движения 125 м/с и частоте съемки 50 000 кадров/с.

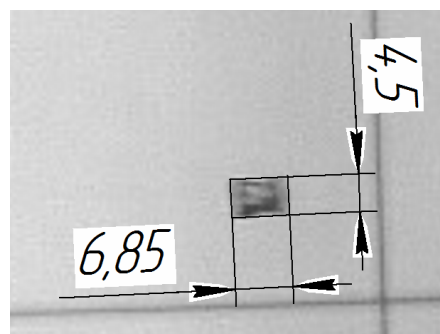


Рис. 3. Изображение пули при выстреле из пневматической винтовки Иж-61, полученное при использовании видеокамеры Olympus i-speed 3 со скоростью съемки 50 000 кадров/с

Fig. 3. Image of a bullet when fired from an Izh-61 air rifle, obtained using an Olympus i-speed 3 video camera at a shooting speed of 50,000 frames per second

Согласно зависимости (2) при максимальном времени построения изображения 0,016 мс относительный след (η_c) должен составить 36,4 %, а в соответствии с рисунком 3 он составил 22,6 %. При этом чем выше скорость съемки, тем меньше будет разница между истинным и максимальным временем построения изображения. Результаты множества экспериментальных работ, связанных с исследованием движения различных объектов с применением видеокамеры Olympus i-speed 3, позволили определить следующую зависимость для потребной скорости съемки, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными:

$$n_c = \frac{500}{t_{\max} + 0,00073}. \quad (3)$$

Необходимость минимизации эффекта слеодообразования возникает в случае значительного изменения скорости объекта на рассматриваемом участке движения, когда от кадра к кадру

размер объекта на изображении будет сильно изменяться. В этом случае при использовании видеокамеры Olympus i-speed 3 скорость съемки можно определить в соответствии с выражениями (2) и (3). Так, например, при определении элементов движения ведущего звена автоматики в стрелковом оружии с учетом предполагаемой максимальной скорости движения $V_{\max} = 10$ м/с, размером объекта слежения $I_0 = 10$ мм и допустимым относительным следом $\eta_c = 10$ % требуемая скорость съемки составит 4963 кадров/с, т. е. с учетом возможных значений скоростей съемки для рассматриваемой видеокамеры необходимо установить скорость 5000 кадров/с.

При малом изменении скорости объекта за рассматриваемый интервал следаобразование не будет оказывать принципиального влияния на результаты измерений.

В целом при определении элементов движения поступательно двигающегося объекта на основе скоростной видеосъемки можно выделить две основные взаимосвязанные погрешности, которые определяются размером пикселя на изображении:

1) относительная ошибка масштабирования изображения;

2) «пиксельная» погрешность [8].

Относительная ошибка масштабирования определяется отношением размера одного пикселя изображения к размеру масштабирующего элемента L_m :

$$\eta_m = \frac{pix}{L_m}. \quad (4)$$

«Пиксельная» погрешность составляет ± 1 pix от измеренного перемещения объекта [9].

Максимальная суммарная ошибка определения перемещения объекта может быть определена как

$$\eta_{\Sigma_n} = \pm (L\eta_m + pix), \quad (5)$$

где L – перемещение объекта за рассматриваемое время, мм.

Суммарная погрешность определения скорости движения объекта (без учета погрешности определения времени) составит

$$\eta_{\Sigma_v} = \pm \frac{\eta_{\Sigma_x}}{t}, \quad (6)$$

где t – время движения объекта, мс.

Увеличение скорости съемки приводит к существенному уменьшению ее области с одновременным увеличением погрешности опреде-

ления элементов движения объекта. Например, при скорости съемки 2000 кадров/с с использованием видеокамеры Olympus i-speed 3 разрешение получаемых изображений составляет 1280×1024 пикселей, при 3000 – 1068×800 , при 10 000 – 540×404 , при 50 000 – 180×132 , а при 150 000 – 72×52 .

В таблице 1 представлены характеристики области съемки и разрешения получаемого изображения при скоростях от 5000 до 150 000 кадров/с с использованием объектива Nikon (фокусное расстояние 50 мм). Камера устанавливалась строго перпендикулярно к объекту на расстоянии 2 м от него.

Таблица 1. Изменение области съемки при увеличении ее скорости

Table 1. Changing the shooting area with an increase in its speed

Скорость съемки, кадров/с	Размеры изображения, мм		Разрешение изображения, пиксели	
	длина	ширина	длина	ширина
5000	612,7	456,5	804	600
10000	406,1	310,6	540	400
30000	202,3	154,7	264	196
50000	138,6	101,64	180	132
100000	84,3	60,2	108	80
150000	53,8	40	72	52

Из представленных данных следует, что в рассматриваемом случае размер 1 пикселя составил $\approx 0,77$ мм. Предположим, что в области съемки движется объект, фиксируемый видеокамерой со скоростью съемки 150 000 кадров/с. За время между двумя кадрами объект переместится на расстояние 5 мм, тогда скорость объекта составит 750 ± 127 м/с. Как видно, погрешность определения скорости является недопустимой. Уменьшение ошибки возможно за счет увеличения числа кадров. В этом случае при скорости объекта 750 м/с можно получить видеофайл с максимальной длиной 10 кадров, соответственно, ошибка составит 23,1 м/с.

Таким образом, характеристики видеокамеры позволяют осуществить выбор оптимальных параметров съемки из условия минимизации ошибок определения элементов движения исследуемого объекта.

Для примера произведем оценку возможности определения скорости движения пули автомата АК-74 с использованием видеокамеры Olympus i-speed 3. Известно, что начальная скорость движения пули составляет 900 м/с, баллистический коэффициент [10] – $8,6$ м²/кг, соответственно, падание скорости пули на 1 м пути

на начальном этапе движения составит не более 1 м/с, что позволяет при скорости съемки свыше 5000 кадров/с считать изменение скорости движения пули в области съемки несущественным.

Примем в качестве начальных условий съемки данные таблицы 1. Результаты оценки погрешностей определения скорости движения пули представлены в таблице 2.

Таблица 2. Оценка погрешностей определения скорости пули автомата АК-74 при различных параметрах скоростной видеосъемки

Table 2. Estimation of errors in determining the bullet velocity of the AK-74 assault rifle with different parameters of high-speed video recording

Скорость съемки, кадров/с	Величина масштабирующего элемента, мм	Относительная ошибка масштабирования, %	Максимальное кол-во кадров	Перемещение пули при скорости 900 м/с, мм	Погрешность определения скорости пули, м/с
5000	600	0,13	3	540 ± 1,47	900 ± 2,45
10000	400	0,19	4	360 ± 1,45	900 ± 3,62
30000	200	0,38	6	180 ± 1,45	900 ± 7,25
50000	140	0,55	7	126 ± 1,46	900 ± 10,43
100000	80	0,96	8	072 ± 1,43	900 ± 17,89
150000	50	1,54	8	048 ± 1,51	900 ± 28,31

Из таблицы 2 следует, что погрешность определения скорости зависит прежде всего от области съемки и увеличивается при ее уменьшении. Кроме того, на практике число полученных кадров, на которых объект будет зафиксирован полностью, получится меньше, следовательно, для рассматриваемого случая оптимальной будет скорость съемки от 30 000 до 50 000 кадров/с, при которых как минимум будет получен видеофайл длиной 4-5 кадров.

Экспериментальные исследования применения высокоскоростной видеосъемки для определения элементов движения объекта

Для экспериментального подтверждения выводов, сделанных выше, проведем сравнитель-

ное сопоставление определения средней скорости движения пули пневматической винтовки Иж-61 на начальном этапе ее движения посредством высокоскоростной видеосъемки (с применением видеокамеры Olympus i-speed 3) и при использовании прибора для измерения скорости пули РС-4М (Регистраторы скорости полета пули РС-4М. Руководство по эксплуатации). Прибор позволяет производить измерения скорости объекта в диапазоне 60...1300 м/с с погрешностью измерения 1 %. Скорость пули на основе высокоскоростной видеосъемки определялась на расстоянии 10...50 мм от дульного среза ствола, а с использованием прибора РС-4М – на расстоянии 0,3 м. Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 4.

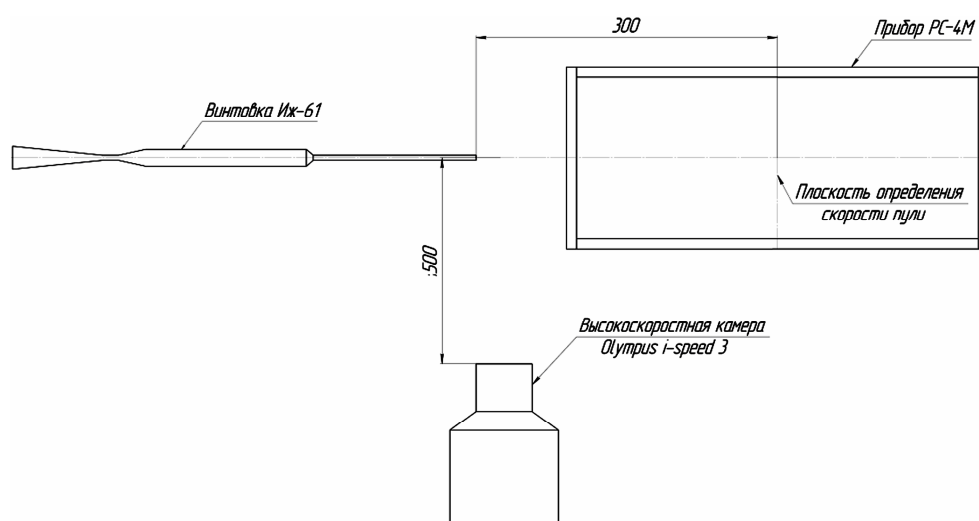


Рис. 4. Схема проведения эксперимента для сопоставления определения скорости пули на основе высокоскоростной видеосъемки и при помощи прибора РС-4М

Fig. 4. Scheme of the experiment to compare the determination of the bullet velocity based on high-speed video recording and using the RS-4M device

С учетом экспериментального значения 285 кг/м^2 баллистического коэффициента 4,5-мм пули падение скорости на участке от дульного среза до 0,3 м составит $\approx 1,2 \text{ м/с}$, что позволяет им пренебречь при сопоставлении результатов экспериментального определения скорости пули.

На рисунке 5 представлены изображения движения пули у дульного среза ствола. Видеосъемка осуществлялась с применением камеры Olympus i-speed 3 со скоростью 50 000 кадров/с при использовании объектива с фокусным расстоянием 50 мм. Камера устанавливалась перпендикулярно движению объекта на расстоянии, обеспечивающем его нахождение в центральной области съемки.

На рисунке 5, а представлено изображение, масштабированное по диаметру колодки мушки винтовки Иж-61, на рисунке 5, б – по диаметру пули.

При масштабировании по колодке мушки размер одного пикселя изображения составил 0,42 мм, относительная ошибка масштабирования – 3,5 %, а по диаметру пули – 0,43 мм при относительной ошибке масштабирования 9,5 %.

В таблице 3 представлены результаты определения скорости движения пули и погрешности, рассчитанные в соответствии с зависимостями (4)–(6).

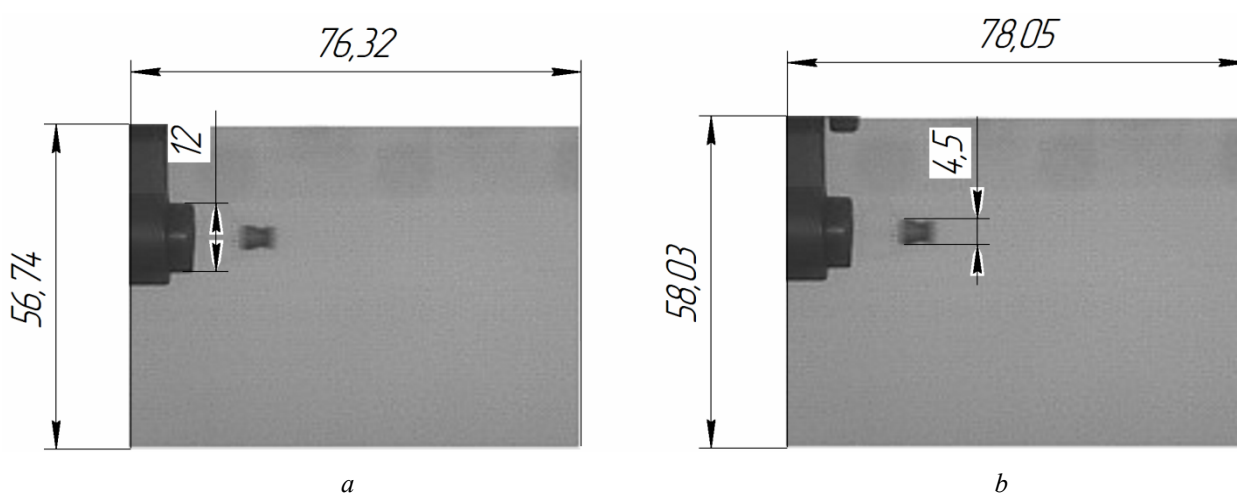


Рис. 5. Масштабирование изображения пули у дульного среза ствола винтовки Иж-61: а – по диаметру колодки мушки; б – по диаметру пули

Fig. 5. Image of a bullet at the muzzle of an Izh-61 rifle barrel: а - the image is scaled by the diameter of the front sight; б - the image is scaled by the bullet diameter

Таблица 3. Результаты определения скорости пули винтовки Иж-61 на основе высокоскоростной видеосъемки и при помощи прибора РС-4М

Table 3. The results of determining the bullet velocity of the Izh-61 rifle based on high-speed video recording and using the RS-4M device

№ п/п	Кол-во кадров	Путь пули, мм		Скорость, м/с		$\eta_{\Sigma, \nu}$, м/с		V_{PC4M} , м/с**
		1*	2*	1*	2*	1*	2*	
1	26	56,26	60,71	112,5	121,42	$\pm 4,80$	$\pm 12,39$	$114 \pm 1,14$
2	23	55,02	58,12	125,04	132,09	$\pm 4,37$	$\pm 12,55$	$126 \pm 1,26$
3	23	53,34	58,84	121,22	133,37	$\pm 4,24$	$\pm 12,70$	$127 \pm 1,27$
4	25	55,05	47,88	114,69	120,58	$\pm 4,01$	$\pm 11,45$	$116 \pm 1,16$
5	24	54,67	56,17	118,84	122,11	$\pm 4,16$	$\pm 11,60$	$118 \pm 1,18$
6	26	55,25	56,00	106,25	112,00	$\pm 3,86$	$\pm 10,64$	$110 \pm 1,10$
7	25	56,50	56,00	117,71	116,66	$\pm 4,11$	$\pm 11,08$	$117 \pm 1,17$
8	23	54,74	56,37	124,41	128,11	$\pm 4,35$	$\pm 12,17$	$124 \pm 1,24$
Ср.	24,37	55,10	56,26	117,58	123,29	$\pm 4,24$	$\pm 11,82$	$119 \pm 1,19$
σ	-----	0,98	3,78	6,32	7,42	-----	-----	6,07

1* – величина, полученная при масштабировании изображения по диаметру колодки мушки;

2* – величина, полученная при масштабировании изображения по диаметру пули;

** – скорость пули, полученная с применением прибора РС-4М.

Данные в таблице 3 наглядно демонстрируют влияние точности масштабирования изображения на результаты определения элементов движения тела при помощи высокоскоростной видеосъемки. Полученные результаты в целом хорошо соотносятся с результатами измерений при помощи прибора РС-4М. Увеличение масштабирующего элемента может позволить принципиально увеличить точность определения элементов движения, однако это требует проведения дополнительных юстировочных работ, связанных с масштабированием изображений с высокоскоростной камеры при установленных режимах съемки, что в определенных случаях является достаточно проблематичным (например, при определении элементов движения пули на участке траектории, удаленном от дульного среза, когда установить с приемлемой точностью плоскость движения объекта затруднительно).

Также отметим, что погрешности измерений элементов движения, определенные в соответствии с зависимостями (4)–(6), являются несколько завышенными, но гарантирующими нахождение реальных величин в указанных диапазонах отклонений.

Экспериментальное исследование влияния метода обработки видеоматериалов на точность определения элементов движения объектов

При определении элементов движения объектов на основе высокоскоростной видеосъемки выделяют два метода:

- обработка изображений на основе графических редакторов (графический метод);
- автоматизированная обработка видеофайлов на основе применения специализированных программ видеоанализа.

Данные, представленные выше, получены на основе применения графического метода. К его недостаткам относится высокая трудоемкость (в особенности при необходимости обработки большого массива изображений) и наличие человеческого фактора (при масштабировании изображений и при определении перемещений объекта).

Программы видеоанализа позволяют значительно уменьшить время при обработке видеофайлов, а также в автоматизированном режиме получить зависимости изменения по времени различных параметров с одновременным исключением влияния человеческого фактора. В этом случае основным недостатком является сложность использования стандартных программ видеоанализа при исследовании объектов, совершающих сложные пространственные движения.

В рамках описываемого исследования проведено сопоставление результатов определения элементов движения объектов, находящихся во вращательном движении, при помощи скоростной видеосъемки с использованием двух обозначенных методов обработки видеофайлов и при использовании лазерного цифрового бесконтактного тахометра DT-2234A. В автоматизированном режиме обработка видеофайлов осуществлялась [11] с применением программы видеоанализа Tracker (Программный продукт Tracker 5.1.5. URL: <https://physlets.org/tracker/> (дата обращения 18.02.2021)).

В экспериментах использовались 5 объектов со скоростью вращения от 1000 до 33 000 об/мин. Скорость видеосъемки варьировалась от 5000 до 30 000 кадров/с. Изображения исследуемых объектов представлены на рисунке 6.

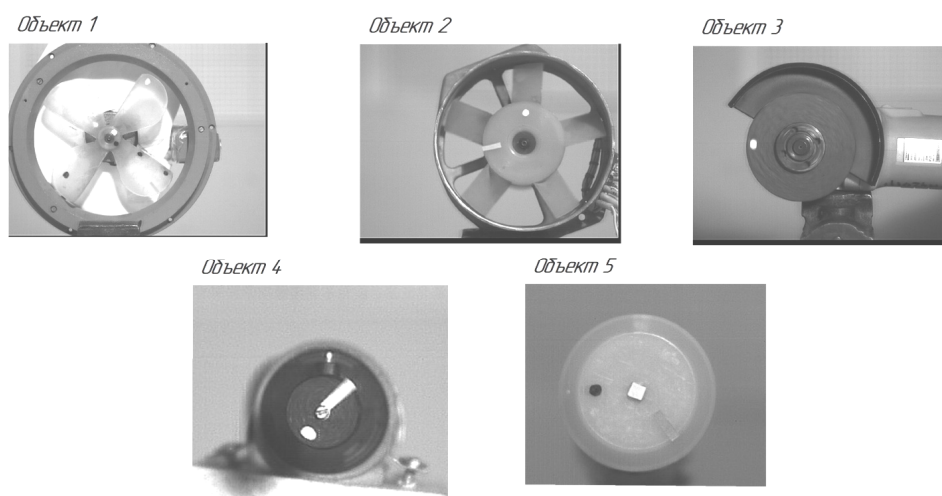


Рис. 6. Изображения объектов исследования

Fig. 6. Images of research objects

При исследовании вращательного движения объектов на основе высокоскоростной видеосъемки не требуется масштабирование элементов, что несколько повышает точность определения. Основная ошибка при графической обработке будет связана с точностью позиционирования элемента слежения (маркера) от изображения к изображению. При автоматизированной обработке погрешности определения элементов движения практически сведены к нулю.

На рисунке 7 представлен пример определения углов поворота для объекта № 1 при скоро-

сти съемки 5000 кадров в секунду графическим методом.

На рисунке 8 представлен пример определения зависимости углов поворота и угловой скорости для того же случая при использовании программы Tracker.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации тахометра DT-2234A (Тахометр DT-2234A. Руководство по эксплуатации) погрешность измерения частоты оборотов составляет $\pm (0,05 \% + 1 \text{ об/мин})$. При проведении опытов для каждого объекта с помощью тахометра было произведено 10 измерений (табл. 4).



Рис. 7. Графический способ обработки результатов: *a* – начальное положение; *b* – определение угла между начальным и промежуточным положением

Fig. 7. Graphical method of processing the results: *a* - initial position; *b* - determination of the angle between the initial and intermediate positions

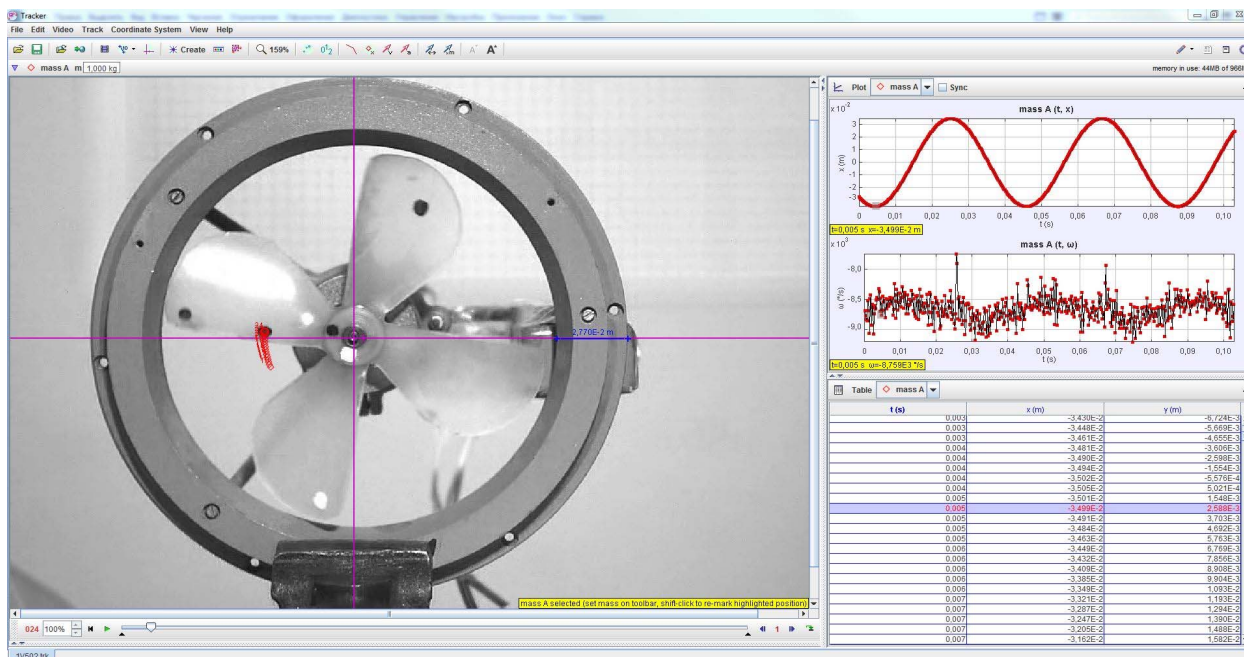


Рис. 8. Определение результатов с помощью программы видеонализа Tracker

Fig. 8. Determination of results using the video analysis program Tracker

Таблица 4. Результаты измерения частоты оборотов исследуемых объектов на основе электронного тахометра DT-2234A

Table 4. The results of measuring the speed of the investigated objects on the basis of the electronic tachometer DT-2234A

№ опыта	Объект № 1	Объект № 2	Объект № 3	Объект № 4	Объект № 5
1	1444	2949	10900	33488	1195
2	1447	2948	11003	33489	1192
3	1445	2945	11018	33287	1140
4	1445	2946	11077	33416	1179
5	1447	2943	11117	33563	1183
6	1444	2947	11090	33613	1175
7	1445	2946	11100	33656	1180
8	1444	2941	11099	33636	1172
9	1443	2944	11089	33659	1178
10	1447	2943	11108	33563	1171
ср.	1445	2945	11060	33537	1177
σ	1,37	2,36	64,28	113,06	14,25

В таблицу 5 сведены средние значения результатов определения частоты вращения для исследуемых объектов при помощи скоростной видеосъемки и с использованием тахометра DT-2234A.

Из представленных в таблице 5 данных можно заключить следующее.

1. Результаты определения частоты вращения объектов на основе лазерного тахометра DT-2234A хорошо соотносятся с результатами,

полученными на основе скоростной видеосъемки.

2. Графический и автоматизированный методы обработки видеофайлов показали хорошую точность, однако время обработки видеофайлов в автоматизированном режиме несопоставимо меньше.

3. Наибольшие отклонения исследуемых величин получены для объекта № 3 с частотой вращения более 33 000 об/мин, что говорит о недостаточной скорости видеосъемки.

Таблица 5. Результаты определения частоты вращения исследуемых объектов с применением различных способов

Table 5. Results of determining the frequency of rotation of the objects under study using various methods

№ объекта	Скорость съемки, кадров/с	Результаты определения частоты вращения, об/мин		
		1*	2*	3*
1	5000	1445 ± 4,12	1443,40	1445,18
	7500		1444,96	1440,92
	10 000		1446,3	1447,8
2	5000	2945 ± 7,07	2943,4	2937
	10 000		2936,7	2941
3	5000	11078 ± 192,83	–**	11240,02
	10 000		10899,94	10966,46
	15 000		10958,60	10931,98
4	5000	33537 ± 339,17	–**	33472,01
	10 000		33722,29	32982
	20 000		33836,94	34660
	30 000		34127,39	33545,25
5	2000	1177 ± 42,75	1146,019	1123,8
	5000		1146,497	1139,8
	10 000		1146,019	1113,9

*1 – средние значения частоты вращения исследуемых объектов, определенные при использовании тахометра DT-2234A с учетом $\pm 3\sigma$;

*2 – значения, полученные на основе высокоскоростной съемки с автоматизированной обработкой видеофайлов в программе видеоанализа Tracker;

*3 – значения, полученные на основе высокоскоростной съемки с применением графического метода обработки изображений;

** – обработка результатов в автоматическом режиме невозможна в связи с малой скоростью съемки.

Выводы

1. Разработана методика определения потребных параметров высокоскоростной видеосъемки, позволяющая минимизировать эффект следообразования, который оказывает существенное влияние на результаты определения элементов движения объекта при значительном изменении его скорости на рассматриваемом участке.

2. Представлены зависимости для определения погрешностей измерения скорости поступательнодвигающихся объектов на основе использования высокоскоростной видеокамеры и метод выбора параметров видеосъемки, позволяющие минимизировать возникающие погрешности при определении элементов движения объектов. Приведен анализ возможности использования видеокамеры Olympus i-speed 3 для определения скорости пули автомата АК-74, позволивший сделать вывод, что на погрешности определения элементов движения наибольшее влияние оказывает отношение величины масштабирующего элемента к размерам области съемки.

3. Результаты экспериментальных работ позволили сделать вывод, что определение элементов движения различных объектов на основе высокоскоростной видеосъемки позволяет получить результаты по точности, не уступающие результатам измерений, полученным при использовании специализированного измерительного оборудования. Так, при определении скорости пули винтовки Иж-61 специализированным прибором РС-4М по восьми измерениям средняя скорость составила 119 м/с при среднеквадратическом отклонении 6,07, а при использовании высокоскоростной видеосъемки с учетом масштабирования изображения по дульному срезу ствола – 117,58 м/с при среднеквадратическом отклонении 6,32.

4. Экспериментальная оценка влияния метода обработки изображений с целью определения элементов движения для объектов, находящихся во вращательном движении, позволила сделать вывод, что применение программ видеоанализа позволяет незначительно увеличить точность определения элементов движения объекта и принципиально сократить время, затрачиваемое на обработку видеофайлов.

Библиографические ссылки

1. Писарев С. А., Чирков Д. В., Федорова Е. А. Анализ aberrаций и способов минимизации их влияния на результаты исследований быстропротекающих 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.

2. Антонов А. В., Вдовин А. Ю. Упрощенная имитационная модель сигнала оптического датчика при пересечении дробовым снопом светового экрана // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. 2018. С. 305–309.

3. Патент № RU 2661069 С1. Способ определения зависимости баллистических характеристик снаряда от условий стрельбы и информационно-вычислительная система для его осуществления / Роговенко О. Н. 2018.

4. Ланно Е. А. Использование средств измерения скорости метаемого элемента в судебной баллистической экспертизе: историко-правовой аспект // Судебная экспертиза Беларуси. 2017. № 2. С. 25–30.

5. Красноперова Е. А., Вдовин А. Ю., Егоров С. Ф. Корреляционный анализ сигналов оптических датчиков системы на основе световых экранов // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. 2020. С. 266–272.

6. Вдовин А. Ю., Марков Е. М., Корнилов И. Г. Современная автоматизированная система для оценки скорости перемещения затвора стрелкового оружия // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 3. С. 82–87.

7. Karpenko A. Digital video stabilization and rolling shutter correction using gyroscopes. CSTR, 2011, vol. 1, no. 2, p. 13.

8. Архипов И. О., Аккузин Р. Т. Измерение размеров структурных элементов зашумленного графического изображения на основе его пространственно-хроматической модели // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. № 2 (66). С. 100–102.

9. Коновалов А. А., Николаев Ю. В. Внешняя баллистика. М.: ЦНИИ информации, 1979. 228 с.

10. Фаткуллов И. Р., Фаткуллова Л. Н. Обзор возможностей программ видеоанализа в спорте // Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгафта. 2018. № 5 (159). С. 280–283.

11. Hockicko P., Trpišová B., Ondruš J. Correcting students' misconceptions about automobile braking distances and video analysis using interactive program tracker. *J. of science education and technology*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 763–776.

References

1. Pisarev S.A., Cpirkov D.V., Fedorova E.A. [Analysis of aberrations and ways to minimize their impact on the results of studies of fast 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.

2. Antonov A.V., Vdovin A.Yu. [Simplified simulation model of an optical sensor signal when a shot sheaf crosses the light screen]. *Informacionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*, 2018, pp. 305-309 (in Russ.).

3. Rogovenko O.N. *Sposob opredeleniya zavisimosti ballisticheskikh harakteristik snaryada ot uslovij strel'by*

i informacionno-vychislitel'naya sistema dlya ego osushchestvleniya [Method for determining the dependence of the ballistic characteristics of a projectile on the conditions of firing and an information and computing system for its implementation]. Patent RF, no. RU 2661069 C1, 2018 (in Russ.).

4. Lappo E.A. [Use of means of measuring the velocity of a thrown element in the forensic ballistic expertise: historical and legal aspect]. *Sudebnaya ekspertiza Belarusi*, 2017, no. 2, pp. 25-30 (in Russ.).

5. Krasnoperova E.A., Vdovin A.Yu., Egorov S.F. [Correlation analysis of signals from optical sensors of a system based on light screens]. *Informacionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii*, 2020, pp. 266-272 (in Russ.).

6. Vdovin A.Yu., Markov E.M., Kornilov I.G. [Modern automated system for assessing the speed of movement of the bolt of small arms]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 82-87 (in Russ.).

7. Karpenko A. [Digital video stabilization and rolling shutter correction using gyroscopes]. *CSTR*, 2011, vol. 1, no. 2, p. 13.

8. Arhipov I.O., Akkuzin R.T. [Measurement of the size of the structural elements of a noisy graphic image based on its spatial-chromatic model]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2015, no. 2, pp. 100-102 (in Russ.).

9. Kononov A.A., Nikolaev Yu.V. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow, CNII informacii, 1979. 228 p. (in Russ.).

10. Fatkullov I.R., Fatkullova L.N. [Review of the possibilities of video analysis programs in sports]. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta*, 2018, no. 5, pp. 280-283 (in Russ.).

11. Hockicko P., Trpišová B., Ondruš J. Correcting students' misconceptions about automobile braking distances and video analysis using interactive program tracker. *J. of science education and technology*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 763-776.

To the Question of Determining the Characteristics of the Object Motion Based on High-Speed Video Recording

D.V. Chirkov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

E.A. Fedorova, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Experimental studies of the influence of video file processing methods on the accuracy of the results of determining the motion elements of objects in rotational motion are presented. The results of the research showed that the applied methods of video file processing (graphical and automated) do not have a fundamental impact on the accuracy of determining the motion elements. At the same time, the automated method of returning video files using specialized video analysis programs allows you to fundamentally shorten the return time and eliminate the influence of the human factor on the measurement results.

Based on the results of experimental studies of determining the velocity of rifle bullets IZH-61, it is shown that the definition of the elements of movement of an object based on a high-speed camera accuracy is not inferior to the specialized equipment.

The dependences for the errors in determining the elements of object motion based on high-speed video recording are presented. It is concluded that the ratio of the size of the scaling element to the size of the survey area has the greatest impact on the accuracy of the results obtained.

The paper describes a method for selecting the parameters of high-speed video shooting depending on the estimated speed of the object, which minimizes the effect of "trace formation", which has a significant impact on the results of determining the elements of the object's movement with a significant change in the speed of its movement in the studied section of the trajectory. So, when determining the bullet velocity of the Izh61 rifle with a specialized RS4M device according to eight measurements, the average speed was 119 m / s with a standard deviation of 6.07, and when using high-speed video recording, taking into account image scaling along the muzzle of the barrel - 117.58 m / s deviation of 6.32. The paper deals with the use of high-speed video recording to determine the motion elements of various objects.

Keywords: high-speed video filming, fast dynamic processes, small arms, video file.

Получено 20.02.2021

Образец цитирования

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.

For Citation

Chirkov 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.