



CALCULATION OF VIDEO RECORDED VEHICLE SPEED AND DECELERATION AT A CAMERA ANGLE OF 45° RELATIVE TO THE VEHICLE MOTION TRAJECTORY

PIOTR KRZEMIENIĆ, ROBERT GRUŻEWSKI, ZYGMUNT WITKOWSKI

Institute of Forensic Research, Kraków, Poland

Abstract

The paper is a continuation of an article by the authors on the impact of camera angle relative to the roadway on the uncertainty of vehicle speed and deceleration calculations from video recordings. While in the previous article (Krzemień, Grużewski, Witkowski, 2017) camera orientation perpendicular to the road was discussed, the present paper concerns the results of tests of speed and deceleration calculations for a camera set at an angle of 45° relative to the roadway. In this configuration, greater uncertainties of the calculations were to be expected, as the perspective foreshortening increased, but it turned out that this was not the rule. In order to investigate the uncertainty, data analysis was performed by graphical methods and by comparing 3D images, using the authors' optimization algorithm operating on the Monte Carlo principle. The speed was measured with a five-Hz GPS receiver and the deceleration with an XL Meter. Due to the fact that the video recording was made with a good quality fixed-frame camera (25 fps), the uncertainties obtained under given conditions could be taken as the lowest. It was found that in general the smaller the camera angle relative to the roadway the greater the uncertainty. The reason was the increase in the perspective foreshortening and the influence of the uncertainty of determining vehicle position relative to the roadway width. The observed decrease in uncertainty of calculations with an increase in the camera angle relative to the road may have been the result of the authors' gaining of experience in conducting the analysis. Another reason was the reduction in the distance of the camera from the road, which resulted in better visibility of the vehicle.

Keywords

Monitoring cameras; Vehicle speed and deceleration; Uncertainty; Image distortion.

Received 17 September 2018; accepted 12 December 2018

1. Introduction

The use of external monitoring and on-board vehicle camera recordings as evidence is increasingly frequent in court cases concerning road accidents. Such recordings can provide a valuable source of information on vehicle motion parameters – speed or deceleration in particular – provided proper measurement methods are applied (Krzemień, Grużewski, Witkowski, 2015). In road accident reconstruction, special attention should be paid to potential risks related to video recordings analysis. What should be done first

in such an analysis is to determine the frequency of the recording. In some recordings, there is no timestamp displayed in the film frames, so you have to make sure the time displayed by the player is identical with the actual time of recording. It is not the time when the accident happened that matters. What matters is whether one second of the recording did last one second in real life. Visual monitoring cameras are most often controlled by a common control device, which does not guarantee that the frame rate of their recording will be identical. Particular frames of the image can be taken by individual cameras depending on the detection of

movement in the frame, or the adjustment can be regulated centrally. Since the frame count recorded by the control device divided by the number of cameras may not be an integer, once for a given period of time, one or several cameras may receive one extra frame in the current second. Moreover, the programs that download the recording to popular file formats may supplement the “missing” frames in order to preserve their constant number in each second. In practice frames can be reproduced. Such programs frequently convert the recording frequency, and therefore when securing the camera footage it is recommended to first store the original file format recorded on the disc, and only then download the file offered by the vision system software. Then there is a chance that an expert in video footage analysis will be able to get more information, which will enable more accurate determination of the time of each frame. Sometimes the downloaded film is played faster or more slowly, or the time for such a recording goes faster or more slowly. For these reasons, when securing the video recording, as much information as possible should be obtained about the system and the camera itself – which is of great help to expert witnesses – for example, by using the method proposed by Křížák (2018). When in any doubt, an experiment should be performed at the scene of the accident using the same system and its configuration, e.g. by driving within the area captured by the frame at a known speed, or by video-recording a stopwatch face. Should this not be feasible, an IT expert in the analysis of the time of footage should be employed. More information on the subject can be found in publications by Moser and Burg (2017), and Wach (2017), as well as Ciepka and Reza (2014).

The aim of the present study was to establish the impact of the orientation (angle) of an external camera relative to the roadway on the uncertainty of speed and deceleration calculations concerning a video-recorded vehicle. In the tests, a good quality camera was used, so the calculated uncertainties for the given configuration of the vehicle and roadway should be treated as the lowest. The differences between XL-Meter readings and those obtained by GPS are also presented. A hypothesis was formulated that the calculation accuracy will increase with image quality, recording rate, decrease in camera angle relative to the roadway, and decrease in vehicle drive duration. Both the previous (Krzemień et al., 2017) and the present paper are the result of research project no. 3/W/2016-2017 executed at the Institute of Forensic Research in Krakow.

2. Materials and methodology

2.1. Test objects

The tests were performed using an Opel Astra car with an XL-Meter (decelerometer) mounted on the windscreen and a DOD LS460W on-board vehicle camera with a built-in GPS (5 Hz) receiver for recording the real speed, considered in this study as a reference value. From the outside the vehicle motion was recorded by a Canon EOS 60D camera with a frame rate of 25 fps of resolution 1920×1080 . Prior to the tests the decelerometer was zeroed. A portable computer installed in the car was used for uploading the measurements taken by the decelerometer. The decelerometer did not transpose the measured data to the vehicle centre of gravity, but for the purposes of road accident reconstruction, in the case of the executed horizontal and rectilinear motion and the relatively small longitudinal tilts of the body, the uncertainties are negligible. This device indicated the MFDD (*Mean Fully Developed Deceleration*), and computed the braking curve by integration of the recorded acceleration. In the operating manual of the XL-Meter there is no information on the measurement uncertainty in road tests. The producer of the 1999 version, which was used for the tests, provides the resolution of readings, i.e. speed – 0.1 km/h, deceleration – 0.1 m/s², distance – 0.1 m, time – 0.01 s and “sensitivity” (accuracy) of $\pm 1\%$ of the displayed physical value. It is specified that 5° angle error in the levelling range of ± 1 g results in 0.4% error of deceleration measurement. The measuring frequency was 200 Hz. The manual for the newer version (which we did not have at our disposal) stated that deceleration recording resolution was 0.0021 m/s², and for the other measurements, the resolution was 0.01 of the measured value. In the DOD manual there is no information on the accuracy of speed measurements.

2.2. Methodology

During the tests, the driver’s task was to reach speeds of 30, 50 and 100 km/h, and for each run to achieve zero (driving with no braking), mean and highest decelerations. For each orientation of the camera (90°, 45° and 15°), nine drives were performed.

The calculations were done by means of two methods – graphic and 3D comparative. The methods were described by Krzemień et al. (2017). In the graphic method, the frame image from the external camera is imposed on a 2D view of the road (top view) in any graphic software. The 2D view of the road was scaled against characteristic points (lampposts). The accura-

cy of the measurements taken at the test scene was up to 0.1 m. Two frames were selected: (1) the beginning of braking (after several analyses of the recorded film and after having noticed, for example, a change in the height of the vehicle front or after an overall analysis of speeds on individual sections of the road), and (2) termination of braking (immediately after the car came to a halt). As it was impossible in the video footage to capture the phase of increasing braking forces, two variants of calculations were done, i.e. taking this phase into account and disregarding it. This affected the uncertainty of calculations. The image from the video was scaled radially (Fig. 1) against reference points of the vehicle's closest trajectories. This meant that the view of the road was positioned perpendicularly to the camera orientation, and the frame was either zoomed in or out so as to make the radii passing through the posts between which the vehicle moved pass through the same posts in a 2D top (bird's eye) view. Having data on the braking/drive time (frame count), the distance and the basis of the recording time, the speed and braking deceleration were calculated. This was done in a simulation program and/or a Monte Carlo based optimization program written for this project in the Octave environment. By performing, for example, 1000 iterations, braking deceleration and speed were optimized for the purpose of calculating the uncertainty of the result, at the same time searching very closely through the area of potential solutions. Another aim of the optimization was to reduce the calculations compared with those done manually in the PC-Crash program. The limitations were the ranges of braking time and distance (Świder, 2012).

In the 3D images comparative method, the recorded image was compared with an image from the virtual camera of the simulation program (PC-Crash 11.1.0, Dr. Steffan Datentechnik, Linz, Austria). Having matched, by way of lens change, the view in the program frame with that recorded by the external camera (the frames must be of the same dimensions), simulation drives (runs) were iterated so that the braking/drive time and vehicle's positions matched. The 3D method is more accurate because it takes into account stretching of the image at its edges. However, the stretching is rather theoretical and is not necessarily identical with the recording from the real camera – usually the latter is larger, and other lens flaws, e.g. distortion and refraction, have an additional effect. The use of this method resulted in the calculation of velocity and braking deceleration. Having determined the uncertainty of braking time as well as the initial and final positions of the vehicle, an optimization script, created by the authors, was also employed to calculate

the uncertainties of velocity and braking deceleration. The final data were processed in a spreadsheet, calculating the uncertainties obtained for each method compared with the reference velocity (from GPS) and from the XL-Meter decelerometer.

In rows 6 and 9 of the tables, “failed” tests are included, which indicate the cases where there was a short power supply break in the car, of which the authors became aware only during the analysis of the data. During this break in power supply the parameters measured inside the car were not recorded correctly. However, it was decided not to repeat these drives because they had been executed at a constant speed, and so the number of performed drives was sufficient for the tests described in part I of the publication (Krziemień et al., 2017).

3. Examples of results of calculations with graphic and 3D methods

Figure 1 illustrates camera orientation relative to the roadway and the correct way of superimposing a view from the camera onto a sketch of the research area.

A zoomed-in part of the view in Fig. 1 is shown in Fig. 2. As can be noticed, radial scaling was performed relative to two posts in the middle (no. 2 and no. 3), and part of the frame was placed perpendicular to the camera orientation (the black line in Fig. 1). The red line indicates the distance between two reference posts seen in foreshortened perspective, the yellow lines – the intersection of the view of the vehicle's left headlight with the posts and the final location of the vehicle's left headlight (after the vehicle stopped). When the view from the camera is adequately scaled with the plane sketch, the profile of the vehicle after it has stopped (here: at post no. 3) can be easily superimposed onto the plane sketch.

Figure 3 presents the view from the camera with the corresponding 3D image from the PC-Crash simulation window. The view from the camera was constructed from two frames in the graphic program in such a way that it contained the position of the vehicle at the beginning and end of the measurement, which lasted about 70 frames at a frame rate of 25 fps.

The graphic program enables image correction so that lens distortion (stretching at the edges of the image) is reduced. An example given in the aforementioned article (Krziemień et al., 2017) also shows that the view is best scaled in the vehicle motion area (here: the two posts in the middle). An analysis of the two positions of the vehicle indicates that at the be-

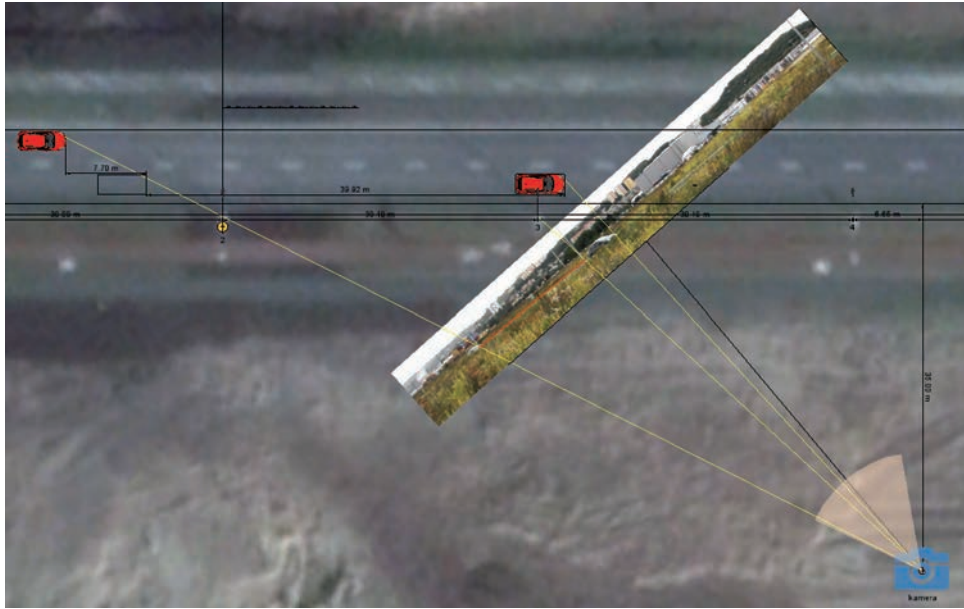


Fig. 1. An example of a correct (perpendicular to the camera's optical axis) superimposition of a view from a camera onto a plane sketch of the research area.

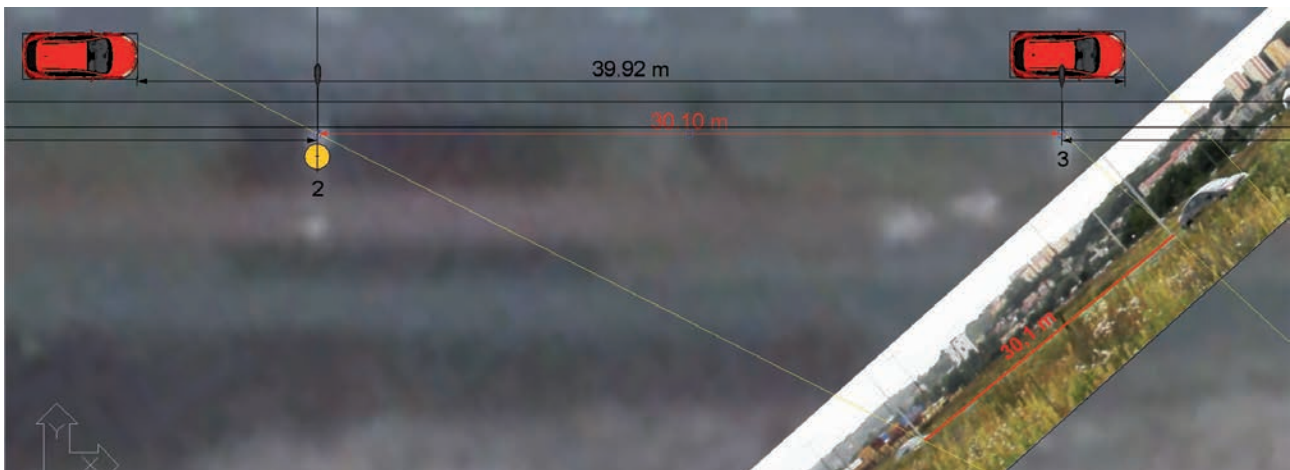


Fig. 2. Zoom-in view from Fig. 1 (the yellow circle indicates the test cone in the region of which the driver was supposed to start braking).



Fig. 3. Real view vs. 3D view obtained in PC-Crash.

gining of the measurement the vehicle's left headlight had already passed by the post, while in the 3D program it had not. This difference results from not knowing the exact lateral position of the vehicle and concerns the 2D scaling presented in Figs 1 and 2 and the reconstruction of vehicle positions using the 3D image. During the tests it was found that such a situation is the result of the uncertainty related to the possible lateral displacement of the vehicle (across the roadway width); this does not indicate a higher uncertainty of one method over the other (graphic method vs. 3D method).

Fig. 4 shows how a change in the vehicle's lateral position on the roadway can affect the uncertainty of the readout of the distance from the reference object seen in top (bird's eye) view. Looking at the view from the camera presented in Fig. 3 may lead to the reasonable conclusion that it is difficult or even impossible to decide on which half of the roadway the vehicle was being driven (actually it was the right-hand half).

Moreover, even if it can be determined which half of the roadway the car was being driven in, a doubt arises as to whether it was travelling closer to the right-hand edge of the road, or in the middle of the roadway half (lane), or closer to the roadway axis. Some camera footages do not raise any doubts about vehicles' lateral position, but in the presented example for the given orientation of the camera and the position of the vehicle relative to the roadway and reference object (the post), the distance increased by 7.7 m (after the vehicle's lateral displacement by 4.2 m). Depending on the velocity and braking deceleration as well as roadway width such an uncertainty – in the discussed case – may amount even to about 100%, e.g. for a speed of 40 km/h and braking deceleration of 8.0 m/s². The smaller the error of braking distance determination compared with the real value, and the low-

er the braking deceleration and the higher the initial velocity, the lower the uncertainty. There may be cases where the uncertainty becomes insignificant, which is why each situation should be analysed separately.

4. Results

Table 1 presents the numerical values of the following measured/calculated parameters:

- number of frames n read between the beginning and end of a drive/braking;
- time t ("time from frames") that has passed between the beginning and end of the drive/braking, calculated from formula $t = n/25$ [s];
- distance s covered by the vehicle between the beginning and end of the drive/braking read from image analysis;
- deceleration $MFDD_{XL-Met.}$ computed by XL-Meter from $a(t)$;
- vehicle's initial velocity v_{obl} (at the beginning of braking) and deceleration a_{obl} calculated by iteration in the PC-Crash simulation program and/or using the optimization script written by the authors, based on the Monte Carlo principle, assuming that:

$$s = v_{obl} \cdot \frac{t_n}{2} + \frac{v_{obl}^2}{2 \cdot a_{obl}} - \frac{a \cdot t_n^2}{24} \quad [\text{m}],$$

$$t_n = \frac{v_{obl}}{2 \cdot a} + t_n \quad [\text{s}],$$

where:

- v_{obl} [m/s] – the calculated initial velocity of the vehicle,
- s [m] – vehicle's stopping distance read by the 2D or 3D method,
- t_n [s] – time of deceleration increment;

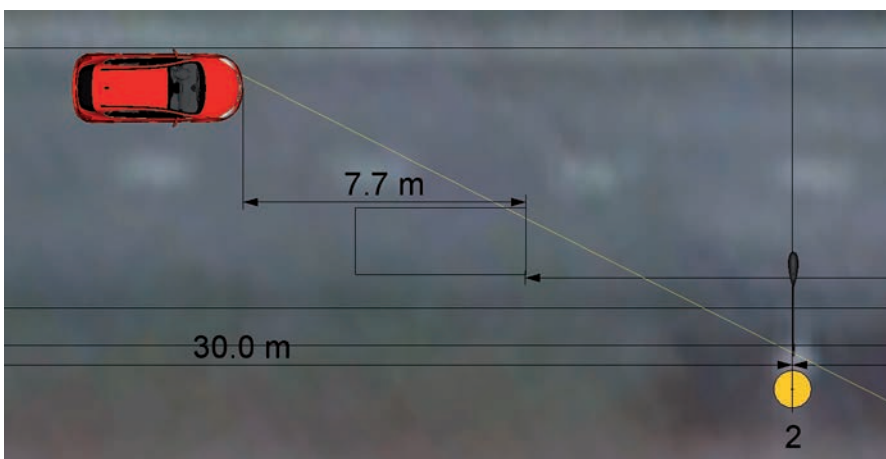


Fig. 4. The effect of the vehicle's lateral displacement on the distance read.

- vehicle's initial velocity (at the beginning of braking) v_{XL-Met} computed by XL-Meter by integration of the measured $a(t)$;
- vehicle's velocity v_{GPS} read immediately prior to the beginning of braking, measured by GPS.

The uncertainty of the accurate indication of the measurement section was interpreted by taking into account the minimum and maximum number of the analysed frames. Consequently, the minimum and maximum values of parameters s , a_{obl} and v_{obl} were also calculated, i.e. their uncertainty was estimated.

Table 2 shows the per cent levels of the uncertainty of the calculated velocity in relation to that indicated by the decelerometer and GPS as well as the deceleration calculated in relation to the reference one. When there was no braking of the vehicle on the given section, i.e., when the XL-Meter did not take any measurements, the word "none" was entered in the appropriate boxes in the tables. Additionally, the tables

include the so-called initial calculations, which were done when the vehicle was driven at a constant velocity before braking started. They were done when there was a problem with determining the moment when the velocity decrease started. In reconstruction practice, if a recording of the motion prior to braking is available, this is considered a favourable situation, because drives at a constant velocity are characterized by the least uncertainty of the calculated velocity.

The performed calculations demonstrated that uncertainty differences depended on the adopted time of increment of braking forces (Table 2).

5. Discussion of results

The present paper is a continuation of an article by the authors (Krzemień et al., 2017) in which calculation uncertainties at a perpendicular camera orienta-

Table 1

Results obtained for placing of the camera at an angle of 45° to the road axis – both methods

Test – method	n – frame count min/max	t – time from frames [s] min/max	s – distance [m] min/max	t_n [s]	a_{obl} [m/s ²] min/max	$MFDD$ $_{XL-Met}$ [m/s ²]	v_{obl} [km/h] min/max	v_{XL-Met} [km/h]	v_{GPS} [km/h]
1 – graphic, initial	32/32	1.28/1.28	33.5/33.5	none	none	none	94.00/94.00	none	96
1 – 3D	69/71	2.76/2.84	39/41	0.0	9.68/10.00	9.9	98.93/102.20	99.5	96
1 – 3D	69/73	2.76/2.92	39/41	0.2	9.83/10.00	9.9	96.26/97.9	99.5	96
1 – graphic	69/71	2.76/2.84	38/40	0.0	9.44/10.00	9.9	96.46/101.72	99.5	96
1 – graphic	69/72	2.76/2.88	38/40	0.2	9.85/10.00	9.9	95.06/96.47	99.5	96
2 – 3D	175/177	7.00/7.08	97/98	0.0	3.87/3.99	3.8	98.72/100.76	98.7	97
2 – 3D	175/177	7.00/7.08	97/98	0.2	3.98/4.12	3.8	98.67/100.77	98.7	97
3 – 3D	87/87	3.48/3.48	96.5/96.5	0	none	none	99.8/99.8	none	100
4 – graphic, initial	64/64	2.56/2.56	31.8/31.8	none	none	none	45.00/45.00	none	43
4 – 3D	34/35	1.36/1.40	7.9/8.2	0.0	8.08/8.84	9.4	40.7/43.3	50.0	48
4 – 3D	34/35	1.36/1.40	7.9/8.2	0.2	9.45/10.00	9.4	40.8/42.66	50.0	48
4*) – 3D	57/58	2.28/2.32	16/17	0.0	5.96/6.53	6.8	49.72/53.65	44.6	43
4 – 3D	57/58	2.28/2.32	16/17	0.2	6.53/7.16	6.8	49.85/53.68	44.6	43
5 – graphic, initial	39/39	1.56/1.56	20.6/20.6	none	none	none	47.00/47.00	none	43
5 – 3D	101/103	4.04/4.12	25/26	0.0	2.95/3.18	2.7	43.72/46.29	43.4	43
5 – 3D	101/103	4.04/4.12	25/26	0.2	3.10/3.35	2.7	43.72/46.31	43.4	43
7 – 3D	30/32	1.2/1.28	6.5/7.0	0.0	7.98/9.66	8.8	36.69/41.81	32.3	31
7 – 3D	30/32	1.2/1.28	6.5/7.0	0.2	9.44/10.00	8.8	36.70/38.81	32.3	31
8 – graphic, initial	99/99	3.96/3.96	31.8/31.8	none	none	none	29.00/29.00	none	27
8 – 3D	60/61	2.40/2.44	11.5/12.0	0.2	4.21/4.54	3.8	33.96/35.99	27.9	27
8 – graphic	60/61	2.40/2.44	11.5/13.0	0.2	4.22/4.91	3.8	34.02/38.93	27.9	27
8 – graphic	60/61	2.40/2.44	11.5/13.0	0.0	3.87/4.5	3.8	33.99/38.92	27.9	27

*) Due to the fact that the entire braking process may not have been included in the frame, Test no. 4 was repeated, at lower braking intensity.

tion relative to the roadway and vehicle motion trajectory were presented. It was found, *inter alia*, that:

- The uncertainty of the velocity calculated from the motion of the braked vehicle relative to the velocity indicated by the XL-Meter increased with a decrease in the initial velocity. For a velocity of ca. 100 km/h, the highest uncertainty ranged from -10 to +8%, and for velocities of ca. 50 and 30 km/h the range was from -24% do +20%. Obviously, this is true only for tests with braking, because only then was the XL-Meter capable of showing the velocity. The calculated velocity uncertainties were higher and more frequent on the negative side, which indicates that the velocity values were underrated more often in comparison with the readings on the device.
- The uncertainty of the velocity calculated from the motion of the braked vehicle compared with the velocity indicated by the GPS receiver also increased with a decrease in the initial velocity. For a velocity of ca. 100 km/h, the highest uncertainty was in the range from -2% to +9%, for a velocity of ca. 50 km/h – from -20% to +25%, and for ca. 30 km/h from -17% to +5%. In this case the tendency to underrate the calculation results compared with the GPS readings was not so strong.
- In the tests not involving braking, the highest calculated uncertainty (compared with GPS indicated velocity) was much lower, and for all the velocities did not exceed the range from -6% to +2%.
- The uncertainty of the velocity displayed by the XL-Meter compared with the GPS indicated velocity did not exceed +9%, and generally was ca. +4%. The device, therefore, displayed a velocity higher than that indicated by the satellite receiver.
- There was no clear relationship observed between the uncertainty of velocity calculation and taking into account or not taking into account the incre-

Table 2
Uncertainty levels of results from Table 1

Test – method	t_n [s]	v_{obl} to v_{XLMet} [%] min/max	v_{obl} to v_{GPS} [%] min/max	v_{XLMet} to v_{GPS} [%]	a_{obl} to $MFDD_{XL-Met}$ [%] min/max
1 – graphic, initial	none	none	-2.08/-2.08	none	none
1 – 3D	0.0	-0.57/2.71	3.05/6.46	3.65	-2.22/1.01
1 – 3D	0.2	-3.26/-1.61	0.28/1.98	3.65	-0.71/1.01
1 – graphic	0.0	-3.06/2.23	0.48/5.96	3.65	-4.65/1.01
1 – graphic	0.2	-4.46/-3.05	-0.98/0.49	3.65	-0.50/1.01
2 – 3D	0.0	0.02/2.09	1.77/3.88	1.75	1.84/5.0
2 – 3D	0.2	-0.03/2.09	1.72/3.89	1.75	4.74/8.42
3 – 3D	0.0	none	-0.2/-0.2	none	none
4 – graphic, initial	none	none	4.65/4.65	none	none
4 – 3D	0.0	-18.6/-13.4	-15.21/-9.79	4.17	-14.04/-5.96
4 – 3D	0.2	-18.4/-14.68	-15.00/-11.12	4.17	0.53/6.38
4*) – 3D	0.0	11.48/20.29	15.63/24.77	3.72	-12.35/-3.97
4 – 3D	0.2	11.77/20.36	15.93/24.84	3.72	-3.97/5.29
5 – graphic, initial	none	none	9.30/9.30	none	none
5 – 3D	0.0	0.74/6.66	1.67/7.65	0.93	9.26/17.77
5 – 3D	0.2	0.74/6.71	1.67/7.70	0.93	14.81/24.07
7 – 3D	0.0	13.94/29.84	18.35/34.87	4.19	-9.32/9.77
7 – 3D	0.2	13.62/20.15	18.39/25.19	4.19	7.27/13.64
8 – graphic, initial	none	none	7.41/7.41	none	none
8 – 3D	0.2	21.72/29.00	25.78/33.30	3.33	10.79/19.47
8 – graphic	0.2	21.93/39.53	26.00/44.19	3.33	11.05/29.21
8 – graphic	0.0	21.83/39.50	25.89/44.15	3.33	1.84/18.42

ment of braking forces. Sometimes the uncertainty was higher, at other times it was lower. It depended on whether the investigator captured this phase of motion in the selected frames, or whether the frames already covered the full braking.

- The uncertainty of the calculated deceleration compared with that indicated by the XL-Meter for braking at a velocity of ca. 100 km/h was in the range of -7% to +43%, for a velocity of ca. 50 km/h, from -15% to +10%, and for ca. 30 km/h, from -17% to +53%. The mean values were much lower and were in the range from -8% to +11%.
- A tendency of increasing uncertainty of the calculated velocities and braking deceleration with increasing intensity (deceleration) of braking can be observed.
- Generally – the lower the velocity and the shorter the braking distance the higher the uncertainty of calculations. However, there were tests that indicated no such relationship.
- At the current state of research it does not seem possible to demonstrate considerably greater accuracy of the method of 3D image analysis over the graphic method of radial scaling.

The results obtained previously were compared with the data obtained at a camera orientation at 45°. A comparison of the data from the paper by Krzemień et al. (2017) with the data presented in Tables 1 and 2 leads to the following findings:

1. At a camera orientation at an angle of 45°, the uncertainty of the velocity calculated from the motion of the braked vehicle compared with the XL-Meter indicated velocity increased with a decrease in the initial velocity. For the velocity of ca. 100 km/h, the highest uncertainty was in the range from -4 to +3% (less than at the angle of 90°), for the velocity of ca. 50 km/h the range was from -19% to +20% (close to the situation at 90°), and for ca. 30 km/h from +22% to +40% (higher than at an angle of 90°). The calculated velocity uncertainties were higher on the positive side, which means that the values were more frequently overrated compared with the device readings. This is a reverse tendency in relation to the tendency for a camera orientation at an angle of 90°.
2. The uncertainty of the velocity calculated from the motion of the braked vehicle compared with the GPS displayed velocity also increased with a decrease in the initial velocity. For the velocity of ca. 100 km/h, the highest uncertainty was in the range from 2% to +7% (slightly less than at the angle of 90°), for the velocity of ca. 50 km/h the range was from -15% to +25% (less than at 90°), and for ca.

30 km/h from +7% to +44% (higher than at an angle of 90°). In this case, there was a higher tendency to overrate the velocity compared with the readings displayed by the satellite receiver (unlike at the camera orientation angle of 90°).

3. In the tests not involving braking, the highest calculated uncertainty (compared with the velocity indicated by the GPS receiver) for all the velocities did not exceed the range from -2% to +9%. This shows that the uncertainties increased compared with those found for the camera orientation angle of 90°.
4. The uncertainty of the XL-Meter displayed velocity compared with the GPS indicated velocity did not exceed +4%, and on average was ca. +3%. The device, therefore, displayed a velocity higher than the GPS receiver, but this tendency was much weaker compared with that described in the paper by Krzemień et al. (2017). This is all the more interesting when you bear in mind that the camera orientation cannot have affected the readings of either device. Neither can it be accounted for by less experience of the person operating the XL-Meter because the tests for the angle of 45° were performed later than those for the angle of 90°. It may have been caused by different levelling of the device, although this was done according to the producer's recommendations. The differences in the readings may have been affected by a slightly different location of the device on the windscreen relative to the vehicle centre of gravity.
5. The uncertainty of calculated deceleration compared with that indicated by the XL-Meter for braking at a velocity of ca. 100 km/h was in the range from -5% to +8% (less than at the angle of 90°), for a velocity of ca. 50 km/h the range was from -14% to +24% (higher than at the angle of 90°), and for ca. 30 km/h from -9% to +29% (lower than at 90°). The mean values for all the velocities and decelerations were lower and in the range from -6% to +9% (lower than at the camera orientation angle of 90°).

6. Conclusions

In view of the aim and the specific nature of these types of cases involving the analysis of video monitoring, the tests were not carried out in a laboratory, which makes it impossible to give an unambiguous explanation as to why not all the uncertainties increased at a lower angle of camera orientation. The change in camera orientation caused a change in its distance from the roadway from 76 to 35 m, which made the

perspective closer and facilitated analysis of the image. On the other hand, however, the perspective foreshortening increased as did the impact of the vehicle's lateral position on the roadway on the accuracy of the readout.

Since it is impossible to precisely reconstruct the vehicle's lateral position, it is impossible to prove whether the method of 3D image analysis is more accurate than the graphic method of radial scaling.

The fact that in some calculations the uncertainty increased, but decreased in other calculations, may have been caused by the increasing experience of the image analysts. This is because, as mentioned in the paper by Krzemień et al. (2017), the analysis was performed subjectively on a computer screen, although not without the use of measurements and cross-checked distances, proper proportions maintained.

References

1. Ciępka, P., Reza, A. (2014). Możliwości ustalenia prędkości uczestnika wypadku na podstawie analizy zapisu monitoringu. (In) *Materiały z V Konferencji certyfikowanych rzeczoznawców w Europejskim Centrum Certyfikacji Rzeczoznawców i Specjalistów Techniki Samochodowej TÜVPOL, 26÷28 marca 2014 r. Trzebieszowice*. Wrocław: TÜVPOL. CD.
2. Krzemień, P., Gružewski, R., Witkowski, Z. (2017). Wpływ kąta usytuowania optycznej osi kamery monitoringu względem jezdni na odczyt prędkości i opóźnienia hamowania pojazdu z zapisu wideo. Część 1. (In) J. Wierciński (Ed.), *Paragraf na Drodze. Numer specjalny 2017. Prawne i kryminalistyczne problemy ruchu drogowego. XV Konferencja Problemy Rekonstrukcji Wypadków Drogowych* (pp. 167–177). Kraków: Wydawnictwo IES.
3. Krzemień, P., Gružewski, R., Witkowski, Z. (2015). Zapis z kamer samochodowych jako źródło informacji o prędkości pojazdów. (In) J. Wierciński (Ed.), *Paragraf na Drodze. Numer specjalny 2015. Prawne i kryminalistyczne problemy ruchu drogowego. XIV Konferencja Problemy Rekonstrukcji Wypadków Drogowych* (pp. 187–202). Kraków: Wydawnictwo IES.
4. Křížák M. (2018). Wykorzystanie zapisu kamer wideo w analizie wypadków drogowych. Studium przypadku. *Paragraf na Drodze*, 55–66.
5. Moser, A., Burg, H. (2017). Ocena prędkości pojazdu z wykorzystaniem obrazów wideo i danych ze skaningu laserowego w programie PC-Crash. (In) J. Wierciński (Ed.), *Paragraf na Drodze. Numer specjalny 2017. Prawne i kryminalistyczne problemy ruchu drogowego. XV Konferencja Problemy Rekonstrukcji Wypadków Drogowych* (pp. 217–223). Kraków: Wydawnictwo IES.
6. Świder, P. (2012). *Teoria ruchu samochodu, cz. 1*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
7. Wach, W. (2017). Zwiększenie dokładności czasowej klatek wideo przez interferencję częstotliwości różnych zapisów. (In) J. Wierciński (Ed.), *Paragraf na Drodze. Numer specjalny 2017. Prawne i kryminalistyczne problemy ruchu drogowego. XV Konferencja Problemy Rekonstrukcji Wypadków Drogowych* (pp. 297–309). Kraków: Wydawnictwo IES.

Corresponding author

dr inż. Piotr Krzemień
e-mail: piotkrzemien@tlen.pl

OBLICZENIE PRĘDKOŚCI I OPÓŹNIENIA POJAZDU Z NAGRANIA WIDEO PRZY USTAWIENIU KAMERY POD KĄTEM 45° WZGLĘDEM TORU RUCHU POJAZDU

1. Wstęp

W sprawach sądowych dotyczących wypadków drogowych coraz częściej zabezpieczane są zapisy z kamer monitoringu zewnętrznego, a także z kamer samochodowych. Nagrania te mogą stanowić cenne źródło informacji o parametrach ruchu pojazdu – w szczególności do obliczenia prędkości czy opóźnienia – pod warunkiem zastosowania prawidłowych metod pomiarowych (Krzemień, Gruzewski, Witkowski, 2015). Przy rekonstrukcji wypadków drogowych należy zwrócić uwagę na potencjalne niebezpieczeństwa związane z analizą zapisów wideo. Pierwszą czynnością w takiej analizie powinno być pozyskanie danych zapisu, tj. częstotliwości. Część nagrań nie zawiera znaku czasu wyświetlanego w kadrze filmu, należy więc się upewnić, czy czas wyświetlany przez odtwarzacz jest tożsamy z czasem nagrania. Nie chodzi tu o godzinę zdarzenia, lecz o to, czy jedna sekunda zapisu w rzeczywistości trwa jedną sekundę. Kamery monitoringu wizyjnego najczęściej zarządzane są wspólnym sterownikiem, co nie oznacza, że częstotliwość ich zapisu będzie jednakowa. Poszczególne klatki zapisu mogą być rozdzielane pomiędzy kamery w zależności od wykrywania ruchu w kadrze lub w sposób odgórnie ustalony. Ze względu na to, że liczba klatek zapisywanych przez sterownik podzielona przez liczbę kamer może nie być całkowita, raz na okres jedna lub kilka kamer może otrzymywać o jedną klatkę więcej w aktualnej sekundzie. Dodatkowo programy, którymi zgrywany jest zapis do popularnych formatów plików, mogą uzupełniać „brakujące” klatki, aby zachować stałą ich liczbę w każdej sekundzie. W praktyce klatki mogą być powielane. Programy te często konwertują częstotliwość zapisu, dlatego przy zabezpieczaniu zapisu monitoringu wskazane jest zapisanie oryginalnego formatu pliku zarejestrowanego na dysku, a dopiero później zgranie takiego pliku, jaki oferuje nam oprogramowanie systemu wizyjnego. Wówczas istnieje szansa, że biegly z zakresu badań zapisów wideo pozyska znacznie więcej informacji i mogą one być bardziej precyzyjne w zakresie ustalania czasu poszczególnych klatek. Zdarza się też, że zgrany film z monitoringu jest odtwarzany w szybszym lub wolniejszym tempie, lub czas dla takiego filmu biegnie szybciej lub wolniej. Z powyższych powodów przy zabezpieczaniu zapisu należy pozyskać jak najwięcej informacji o systemie i samej kamerze, co jest bardzo przydatne biegłym, choćby w metodzie zaprezentowanej w pracy Křižáka (2018). W razie jakichkolwiek wątpliwości należy wyko-

nać eksperyment na miejscu zdarzenia przy użyciu tego samego systemu i jego konfiguracji, np. poprzez przejazd w obszarze kadru ze znaną prędkością lub filmowanie zegara/stopera. W razie braku takiej możliwości należy skorzystać z pomocy biegłego informatyka specjalizującego się w analizie tego typu nagrań. Obszerniejszej wiedzy na temat tego zagadnienia dostarczają publikacje Mosera i Burga (2017), Wacha (2017) oraz Cięпки i Rezy (2014).

Celem niniejszych badań było ustalenie wpływu orientacji kamery zewnętrznej względem drogi na niepewność obliczenia prędkości i opóźnienia zarejestrowanego pojazdu. Do badań użyto kamery dobrej jakości, zatem obliczone niepewności dla danej konfiguracji kamery względem pojazdu i drogi należy traktować jako najmniejsze. Dodatkowo przedstawiono różnice wskazań opóźnieniomierza XL-Meter w stosunku do pomiaru GPS. Postawiono tezę, że dokładność obliczeń będzie wzrastała wraz z jakością obrazu, częstotliwością zapisu, zmniejszaniem się kąta orientacji kamery względem drogi, jak i czasem przejazdu samochodu. Poprzednia (Krzemień i in., 2017) oraz niniejsza praca jest rezultatem projektu badawczego nr 3/W/2016-2017 realizowanego w Instytucie Ekspertyz Sądowych im. Prof. dra Jana Sehna w Krakowie.

2. Materiały i metody

2.1. Obiekty badań

W celu realizacji zadania badawczego wykorzystano samochód marki Opel Astra, w którym na przedniej szybie zamontowano opóźnieniomierz XL-Meter oraz kamerę samochodową DOD LS460W z wbudowanym odbiornikiem GPS (5 Hz) służącym do pomiaru rzeczywistej prędkości uznanej w niniejszej pracy za wzorcową. Z zewnątrz ruch pojazdu był rejestrowany kamerą aparatu fotograficznego Canon EOS 60D z częstotliwością 25 klatek na sekundę o rozdzielczości 1920 × 1080. Przed rozpoczęciem jazd badawczych opóźnieniomierz został wypoziomowany (wyzerowany). W samochodzie zainstalowano komputer przenośny, którym czytano pomiary dokonane opóźnieniomierzem. Opóźnieniomierz nie transponował zmierzonych parametrów do środka masy samochodu, jednak w przypadku realizowanego poziomego i prostoliniowego ruchu oraz stosunkowo małych przechyłów wzdłużnych nadwozia niepewności

są pomijalne z punktu widzenia rekonstrukcji wypadków drogowych. Przyrząd ten wyznaczał średnie pełne opóźnienie hamowania MFDD (*Mean Fully Developed Deceleration*), a także obliczał prędkość hamowania, całkując zarejestrowane przyspieszenie. Instrukcja obsługi przyrządu XL-Meter nie zawiera informacji dotyczących niepewności pomiarowej uzyskanej w badaniach drogowych. Producent wersji przyrządu z 1999 r., którego użyto do badań, podaje rozdzielczość wskazań, tj. prędkość – 0,1 km/h, opóźnienie – 0,1 m/s², droga – 0,1 m, czas – 0,01 s oraz „wrażliwość” (dokładność) równą ±1% aktualnie wyświetlanej wartości fizycznej. Podano, że 5° kąтового błędu w wypoziomowaniu w zakresie ±1 g skutkuje 0,4% błędem pomiaru opóźnienia. Pomiar dokonywany jest z częstotliwością 200 Hz. W instrukcji do nowszej wersji przyrządu (którym nie dysponowano) stwierdzono, że rozdzielczość rejestrowania opóźnienia wynosi 0,0021 m/s², a pozostałe wskazania podawane są w rozdzielczości 0,01 badanej wielkości. Dokładność wskazań prędkości przez kamerę DOD nie została zamieszczona w instrukcji przyrządu.

2.2. Metody

Badanie polegało na wykonaniu przez kierowcę przejazdów, w których starał się on rozwinąć prędkości 30, 50 i 100 km/h, i dla każdej z nich uzyskiwać opóźnienia zerowe (jazda bez hamowania), średnie i największe. Dla każdej z orientacji kamery (90°, 45° i 15°) wykonano po 9 przejazdów.

Obliczenia prowadzono dwiema metodami – graficzną i porównawczą 3D. Metody te opisali Krzemień i in. (2017). Metoda graficzna polegała na nałożeniu widoku kadru z kamery zewnętrznej na widok 2D drogi (z góry) w dowolnym programie graficznym. Widok drogi 2D był skalowany względem punktów charakterystycznych (słupów latarni), pomiary wykonano na miejscu badań z dokładnością do 0,1 m. Wybierano dwie klatki: (1) początku hamowania (po wielokrotnej analizie wideo i zauważeniu np. zmiany wysokości przodu pojazdu lub po cząstkowej analizie prędkości na poszczególnych odcinkach) oraz (2) końca hamowania (tuż po zatrzymaniu się samochodu). Ponieważ w analizie wideo nie było możliwe uchwycenie fazy narastania sił hamowania, obliczenia wykonano dwuwariantowo, tj. uwzględniając tę fazę oraz ją pomijając. Wpływało to na niepewność obliczeń. Skalowania obrazu z kamery dokonywano promieniowo (rys. 1) względem punktów odniesienia najbliższych trajektorii pojazdu. Oznaczało to, że widok drogi ustawiano prostopadle do orientacji kamery, a kadr powiększano lub zmniejszano w taki sposób, aby promienie prowadzone przez słupy, między którymi jechał pojazd, przechodziły przez te same słupy w widoku 2D z góry. Znając czas hamowania/przejazdu (liczba klatek) i drogę oraz podstawę czasu nagrania, obliczano prędkość i opóźnienie hamo-

wania. Wykonywano to w programie symulacyjnym i/lub w programie optymalizacyjnym działającym na zasadzie Monte Carlo, napisanym na potrzeby niniejszego projektu w środowisku Octave. Wykonując np. 1000 iteracji, optymalizowano zatem opóźnienie hamowania i prędkość w celu obliczenia niepewności wyniku, przeszukując jednocześnie z dużą gęstością obszar możliwych rozwiązań. Optymalizacja miała też na celu skrócenie obliczeń względem prowadzonych w trybie ręcznym w programie PC-Crash. Ograniczeniami były zakresy czasu i długości drogi hamowania (Świder, 2012).

Druga metoda porównawcza obrazów 3D polegała na zestawianiu obrazu monitoringu z obrazem z wirtualnej kamery programu symulacyjnego (użyto programu PC-Crash 11.1.0, Dr. Steffan Datentechnik, Linz, Austria). Po dopasowaniu, poprzez zmianę ogniskowej, widoku w kadrze programu z widokiem kamery zewnętrznej (kadry muszą mieć takie same wymiary), wykonywano iteracyjnie przejazdy symulacyjne, tak aby zgadzał się czas hamowania/przejazdu oraz poszczególne położenia samochodu. Metoda 3D jest o tyle dokładniejsza, że pozwala uwzględnić rozciągnięcie obrazu na jego krańcach, jednak jest ono niejako teoretyczne i niekoniecznie tożsamy z zapisem realnej kamery – zazwyczaj to drugie jest większe i dodatkowo nakładają się inne wady soczewki, np. dystorsja i refrakcja. Rezultatem zastosowania tej metody było obliczenie prędkości i opóźnienia hamowania. Po określeniu niepewności czasu hamowania oraz początkowego i końcowego usytuowania samochodu stosowano również autorski skrypt optymalizacyjny, aby obliczyć niepewności prędkości i opóźnienia. Ostatnie dane obrabiano w arkuszu kalkulacyjnym, obliczając niepewności poszczególnych metod w stosunku do prędkości wzorcowej (z GPS) oraz opóźnieniomierza XL-Meter.

Jako próby „nieudane” w wierszach tabel o numerach 6 i 9 oznaczono sytuacje, w których nastąpiła krótka przerwa zasilania wewnątrz pojazdu, o czym autorzy dowiedzieli się, dopiero analizując dane. Podczas tej przerwy nie zostały poprawnie zarejestrowane parametry mierzone wewnątrz samochodu. Nie zdecydowano się jednak na powtórzenie owych przejazdów ze względu na to, że były one wykonywane ze stałą prędkością, a zatem wykonano ich już wystarczająco wiele do badań opisanych w pierwszej części publikacji (Krzemień i in., 2017).

3. Przykłady wyników obliczeń metodami graficzną oraz 3D

Na rysunku 1 zaprezentowano orientację kamery względem drogi oraz właściwy sposób nakładania widoku z kadru kamery na szkic.

Powiększenie fragmentu widoku z rys. 1 zaprezentowano na rys. 2. Można tu zauważyć, że skalowania

dokonano promieniowo względem dwóch środkowych słupów (nr 2 i 3), a wycinek kadru ustawiono prostopadłe do orientacji kamery (linia czarna na rys. 1). Linia czerwoną oznaczono odległość między dwoma referencyjnymi słupami widzianą w skrócie perspektywicznym, liniami żółtymi – przecięcie się widoku lewego reflektora samochodu ze słupami oraz położenie ostateczne lewego reflektora samochodu (po jego zatrzymaniu). Gdy widok kadru jest odpowiednio zeskalowany z rysunkiem płaskim, to możliwe jest naniesienie na rysunek płaski sylwetki pojazdu po zatrzymaniu (tu: przy słupie oznaczonym numerem 3).

Rysunek 3 przedstawia natomiast widok z kamery z odpowiadającym mu widokiem 3D z okna programu PC-Crash do rekonstrukcji wypadków drogowych. Widok z kamery złożono z dwóch klatek w programie graficznym, tak aby zawierał usytuowanie pojazdu w chwili początku i końca pomiaru, który trwał ok. 70 klatek przy częstotliwości nagrania 25 kl./s.

W programie graficznym możliwa jest taka korekcja obrazu, aby zostało zniwelowane zniekształcenie obiektu (rozciągnięcie na krańcach obrazu). Również we wspomnianej już powyżej publikacji (Krzemień i in., 2017) podano przykład, że skalowania kadru najlepiej dokonywać w obszarze ruchu pojazdu (tu: dwa środkowe słupy). Obserwując oba usytuowania pojazdów, można zauważyć, że pojazd w chwili początku pomiaru lewym reflektorem przejechał już obok słupa, a w oknie 3D programu – jeszcze nie. Jest to różnica wynikająca z nieznamościami dokładnego usytuowania poprzecznego pojazdu i dotyczy skalowania 2D zaprezentowanego na rys. 1 i 2 oraz rekonstruowania położenia pojazdu z wykorzystaniem widoku 3D. W toku badań zaobserwowano, że taka sytuacja wynika z niepewności związanej z możliwym przesunięciem samochodu wszerz jezdni, nie jest to wyznacznikiem większej niedokładności jednej metody od drugiej (graficznej od 3D).

Na rys. 4 zaprezentowano z kolei, jak zmiana usytuowania pojazdu wszerz jezdni może wpłynąć na niepewność odczytu odległości od obiektu referencyjnego widzianego w widoku z góry. Obserwując widok z kamery zaprezentowany na rys. 3, można wyciągnąć słuszny wniosek, że stwierdzenie, którą połową jezdni jedzie samochód (w rzeczywistości prawą), jest bardzo utrudnione, a wręcz niemożliwe.

Dodatkowo, jeśli nawet uda się rozpoznać, którą połową jezdni jechał pojazd, to powstaje wątpliwość, czy jechał on bliżej prawej krawędzi jezdni czy środkiem połowy jezdni, czy też bliżej jej osi. Zdarzają się nagrania z kamer pokazujące, że usytuowanie poprzeczne pojazdów nie budzi wątpliwości, jednak we wskazanym przykładzie dla przedmiotowej orientacji kamery i pojazdu względem drogi oraz obiektu referencyjnego (tu słupa) odległość wzrosła o 7,7 m (po poprzecznej zmianie pozycji pojazdu na jezdni o 4,2 m). W zależności od prędko-

ści i opóźnienia hamowania oraz szerokości jezdni niepewność taka – w tym konkretnym przykładzie – może wynosić nawet ok. 100%, np. dla 40 km/h i opóźnienia hamowania 8,0 m/s². Im mniejszy udział błędu ustalenia drogi hamowania w stosunku do rzeczywistej i im mniejsze opóźnienie hamowania oraz im większa prędkość początkowa, tym ta niepewność mniejsza. Mogą się zdarzyć również przypadki, kiedy stanie się ona nieistotna, dlatego sytuacje takie należy poddawać indywidualnej analizie.

4. Wyniki

Tabela 1 przedstawia wartości liczbowe następujących zmierzonych/obliczonych parametrów:

- liczba odczytanych klatek n pomiędzy chwilami początku i końca jazdy/hamowania;
- czas t („czas z klatek”), który upłynął pomiędzy chwilami początku i końca jazdy/hamowania, obliczony ze wzoru $t = n/25$ [s];
- odległość s przebyta przez pojazd pomiędzy chwilami początku i końca jazdy/hamowania odczytana z analizy obrazu;
- opóźnienie $MFDD_{XL-Met}$ obliczone przez urządzenie XL-Meter ze zmierzonego przebiegu $a(t)$;
- prędkość początkowa pojazdu v_{obl} (na początku hamowania) i opóźnienie a_{obl} obliczone iteracyjnie w programie symulacyjnym PC-Crash i/lub autorskim skryptem optymalizacyjnym działającym na zasadzie Monte Carlo, przy założeniu, że:

$$s = v_{obl} \cdot \frac{t_n}{2} + \frac{v_{obl}^2}{2 \cdot a_{obl}} - \frac{a \cdot t_n^2}{24} \quad [\text{m}],$$

$$t_h = \frac{v_{obl}}{2 \cdot a} + t_n \quad [\text{s}],$$

gdzie:

v_{obl} [m/s] – obliczona prędkość początkowa pojazdu,
 s [m] – długość drogi zatrzymania odczytana metodą 2D lub 3D,

t_n [s] – czas narastania opóźnienia.

- prędkość początkowa pojazdu (na początku hamowania) v_{XL-Met} obliczona przez urządzenie XL-Meter poprzez całkowanie zmierzonego przebiegu $a(t)$;
- prędkość pojazdu v_{GPS} odczytana w chwili tuż przed rozpoczęciem hamowania zmierzona urządzeniem GPS.

Niepewność dokładnego wskazania odcinka pomiarowego ujęto poprzez uwzględnienie minimalnej i maksymalnej liczby analizowanych klatek nagrania. W konsekwencji obliczono także minimalne i maksymalne wartości parametrów s , a_{obl} i v_{obl} , czyli oszacowano ich niepewność.

Tabela 2 zawiera wartości procentowe niepewności prędkości obliczonej w odniesieniu do wskazanej przez opóźnieniomierz i urządzenie GPS oraz opóźnienia obliczonego do wskazanego. W sytuacjach, w których pojazd nie był hamowany na badanym odcinku, czyli gdy opóźnieniomierz XL-Meter nie dokonywał pomiaru, w tabelach wpisywano słowo „brak”. Dodatkowo w tabelach zamieszczono tzw. obliczenia początkowe, które dotyczyły jazdy ze stałą prędkością jeszcze przed rozpoczęciem hamowania. Wykonywano je wówczas, gdy istniał problem z rozpoznaniem początku zmniejszania prędkości. W praktyce rekonstrukcyjnej jeśli dysponuje się rejestracją ruchu przed hamowaniem, to jest to sytuacja korzystna, bo przejazdy ze stałą prędkością cechuje najmniejsza niepewność co do obliczanej prędkości.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że niepewności różniły się w zależności od przyjętego czasu narastania sił hamujących (tabela 2).

5. Omówienie wyników i dyskusja

Niniejsza publikacja jest kontynuacją pracy autorów (Krzemień i in., 2017), w której przedstawiono niepewności obliczeń przy prostopadłej orientacji kamery względem jezdni i toru jazdy samochodu. Stwierdzono w niej m.in., że:

- Niepewność prędkości obliczonej z ruchu hamowanego pojazdu w stosunku do prędkości wskazanej przez XL-Meter zwiększała się wraz ze zmniejszeniem prędkości początkowej. Dla prędkości rzędu 100 km/h największa niepewność wynosiła od -10 do +8%, a dla prędkości ok. 50 i 30 km/h – od -24% do +20%. Dotyczy to tylko prób z hamowaniem, gdyż tylko wówczas przyrząd XL-Meter jest w stanie wskazać prędkość. Obliczone niepewności prędkości były większe i częstsze po stronie ujemnej, co oznacza, że wartości prędkości były częściej zaniżone względem wskazań przyrządu.
 - Niepewność prędkości obliczonej z ruchu hamowanego pojazdu w stosunku do prędkości wskazanej przez odbiornik GPS również zwiększała się wraz ze zmniejszeniem prędkości początkowej. Dla prędkości rzędu 100 km/h największa niepewność wynosiła od -2% do +9%, dla prędkości ok. 50 km/h – od -20% do +25%, a dla ok. 30 km/h – od -17% do +5%. Tu obserwowano mniejszą tendencję do zaniżenia wyników obliczeń względem wskazania odbiornika GPS.
 - Dla prób z niehamowanym pojazdem największa obliczona niepewność (względem prędkości wskazanej przez odbiornik GPS) była znacznie mniejsza i dla wszystkich prędkości nie przekraczała od -6% do +2%.
 - Niepewność prędkości wskazanej przez przyrząd XL-Meter w stosunku do prędkości, jaką wskazywał odbiornik GPS, nie przekroczyła +9%, a zazwyczaj wynosiła ok. +4%. Przyrząd ten wyświetlał zatem prędkość większą niż wskazywał odbiornik satelitalny.
 - Nie odnotowano widocznej zależności niepewności obliczenia prędkości w przypadku uwzględnienia (bądź nie) czasu narastania sił hamujących. Niepewność raz zwiększała się, a raz się zmniejszała, zależało to od tego, czy badający w wybranych klatkach zapisu uchwycił tę fazę ruchu czy też obejmowały one już pełne hamowanie.
 - Niepewność opóźnienia obliczonego względem zmierzonego przez przyrząd XL-Meter dla hamowania z prędkości ok. 100 km/h wynosiła od -7% do +43%, dla prędkości ok. 50 km/h – od -15% do +10%, a dla ok. 30 km/h – od -17% do +53%. Wartości średnie były znacznie mniejsze i kształtowały się w granicach od -8% do +11%.
 - Można zauważyć pewną tendencję wzrostu niepewności obliczanych prędkości i opóźnienia hamowanego pojazdu wraz ze wzrostem intensywności (opóźnienia) hamowania.
 - Generalnie – im mniejsza prędkość i krótszy czas hamowania, tym większa jest niepewność obliczeń, jednak pojawiały się próby, w których tak nie było.
 - Na obecnym etapie badań nie da się wykazać istotnie większej dokładności metody analizy obrazu 3D nad metodą graficzną skalowania promieniowego.
- Uzyskane uprzednio wyniki porównano z danymi otrzymanymi przy orientacji kamery pod kątem 45°. Porównanie danych z pracy Krzemienia i in. (2017) z danymi z tabel 1 i 2 prowadzi do następujących ustaleń:
1. Niepewność prędkości obliczonej z ruchu hamowanego pojazdu w stosunku do prędkości wskazanej przez XL-Meter przy orientacji kamery pod kątem 45° zwiększała się wraz ze zmniejszeniem prędkości początkowej. Dla prędkości rzędu 100 km/h największa niepewność wynosiła od -4 do +3% (mniej niż przy 90°), dla prędkości ok. 50 km/h – od -19% do +20% (zbliżone do sytuacji przy 90°), a dla ok. 30 km/h – od +22% do +40% (większe niż przy kącie 90°). Obliczone niepewności prędkości były większe i częstsze po stronie dodatniej, co oznacza, że wartości były częściej zawyżone względem wskazań przyrządu. Jest to tendencja odwrotna niż dla orientacji kamery pod kątem 90°.
 2. Niepewność prędkości obliczonej z ruchu hamowanego pojazdu w stosunku do prędkości wskazanej przez odbiornik GPS również zwiększała się wraz ze zmniejszeniem prędkości początkowej. Dla prędkości rzędu 100 km/h największa niepewność wynosiła od -2% do +7% (nieznacznie mniej niż przy 90°), dla prędkości ok. 50 km/h – od -15% do +25% (mniej niż przy 90°), a dla ok. 30 km/h – od +7% do +44% (więcej niż przy kącie 90°). Tu obserwowano także większą tendencję do zawyżania prędkości względem

- wskazania odbiornika (odwrotnie niż przy orientacji kamery pod kątem 90°).
3. Dla prób z niehamowanym pojazdem największa obliczona niepewność (względem prędkości wskazanej przez odbiornik GPS) dla wszystkich prędkości nie przekraczała zakresu od -2% do $+9\%$. Niepewności zwiększyły się zatem w stosunku do tych, jakie określono dla orientacji kamery równej 90° .
 4. Niepewność prędkości wskazanej przez przyrząd XL-Meter w stosunku do prędkości, jaką wskazywał odbiornik GPS, nie przekroczyła $+4\%$, a średnio wynosiła ok. $+3\%$. Przyrząd ten wyświetlał zatem prędkość większą niż wskazywał odbiornik satelitarny, jednak tendencja ta zmalała wobec opisanej w pracy Krzemienia i in. (2017). Jest to o tyle ciekawe spostrzeżenie, że kąt orientacji kamery nie mógł wpływać na wskazania obu urządzeń. W grę nie wchodzi też sprawniejsze uruchamianie przyrządu XL-Meter przez obsługującego, gdyż jazdy badawcze dla kąta 45° były wykonywane później niż dla kąta 90° . Mogło to być spowodowane różnym wypoziomowaniem przyrządu, choć wykonywano je zgodnie z zaleceniami producenta. Wpływ na różnicę wskazań mogło mieć także nieznacznie inne usytuowanie przyrządu na szybie względem środka masy samochodu.
 5. Niepewność opóźnienia obliczonego względem zmierzzonego przez przyrząd XL-Meter dla hamowania z prędkości ok. 100 km/h wynosiła od -5% do $+8\%$ (mniejsza niż przy 90°), dla prędkości ok. 50 km/h – od -14% do $+24\%$ (większa niż przy 90°), a dla ok. 30 km/h – od -9% do $+29\%$ (mniejsza niż przy 90°). Wartości średnie dla wszystkich prędkości i opóźnień były mniejsze i kształtowały się w granicach od -6% do $+9\%$ (mniejsze niż przy kącie ustawienia kamery równym 90°).

6. Wnioski

Przeprowadzone badania, z uwagi na cel i specyfikę tego typu spraw z analizą monitoringu, nie miały charakteru laboratoryjnego, dlatego też nie jest możliwe dokładne wyjaśnienie, dlaczego wraz ze zmniejszeniem kąta orientacji kamery nie wszystkie niepewności zwiększyły się. Zmiana orientacji kamery spowodowała zmianę jej odległości od jezdni z 76 do 35 m , co przybliżyło perspektywę i ułatwiło analizę obrazu, jednak z drugiej strony zwiększyło skrót perspektywiczny oraz wpływ usytuowania poprzecznego pojazdu na dokładność odczytu odległości.

W związku z brakiem możliwości precyzyjnego odтворzenia usytuowania poprzecznego pojazdu nie da się wykazać przewagi w dokładności metody analizy obrazu 3D nad metodą graficzną skalowania promieniowego.

To, że w części obliczeń niepewność wyników wzrosła, a w innych zmalała, mogło być spowodowane zwiększającym się doświadczeniem prowadzących analizę obrazu, gdyż jak wspomniano w pracy Krzemienia i in. (2017), była ona dokonywana subiektywnie na ekranie komputera, choć niepozbawiona pomiarów i odnoszenia do siebie różnych odległości, przy zachowaniu odpowiednich proporcji.