

Wykorzystanie fotografii wykonanych prostopadle¹ oraz ukośnie² względem pojazdów w celu określenia ich wymiarów oraz deformacji powypadkowej

ml. asp. Adam Sikora¹

ORCID 0009-0008-8189-8022

1 Laboratorium Kryminalistyczne Komendy Wojewódzkiej Policji w Olsztynie, adam.sikora@ol.policja.gov.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę wymiarowania przez biegłych śladów na pojazdach bezpośrednio ze zdjęć. Przeprowadzono badania wraz z analizą dokładności wymiarowania z fotografii prostopadłych, ukośnych oraz zbadano możliwość zastosowania transformacji fotogrametrycznej pojedynczego zdjęcia ukośnego w celu przywrócenia jego prostopadłości¹ do fotografowanego obiektu tak, aby zdjęcie ponownie było kartometryczne.

Słowa kluczowe: wymiarowanie, fotografia prosta, fotografia ukośna, deformacja powypadkowa, transformacja fotogrametryczna

Wstęp

Nierzadką sytuacją, z którą mierzą się biegli z zakresu badań wypadków drogowych, jest brak zwymiarowania istotnych śladów na miejscu zdarzenia, które są niezbędne do ustalenia przyczyn powstania wypadku. W sytuacjach, gdy można zidentyfikować takie ślady, a nie zostały one zwymiarowane podczas oględzin, biegli podejmują wysiłki, żeby uzyskać istotne i krytyczne wymiary na podstawie dostępnych fotografii z miejsca zdarzenia. Aby można było podjąć próbę wymiarowania śladów z miejsca wypadku bezpośrednio z fotografii, zdjęcia muszą spełniać jednak pewne kryteria. Fotografie powinny być m.in. jak najbliższe pozycji, w której oś obiektywu jest prostopadła do fotografowanego obiektu. W przypadku oględzin miejsc wypadku drogowego jest to technicznie trudne, ponieważ w celu uzyskania takiego obrazu zachodziłaby konieczność wykonania zdjęć z powietrza, np. z wykorzystaniem „drona”, co nie zawsze, z różnych przyczyn, jest możliwe. W tego typu przypadkach z pomocą przychodzi fotogrametria, dzięki której, przy spełnieniu odpowiednich warunków, można, wykorzystując fotografie naziemne ukośne², przetworzyć je do ortofotografii³, a na ich podstawie zwymiarować ślady w miejscu wypadku.

Możliwości określenia wymiarów na podstawie pary zdjęć

Tego typu badania były już opisywane w literaturze, również na łamach *Problemów Kryminalistyki* w wydaniu nr 253/2006. Zadanie, jakie wówczas zostało postawione w pracach badawczych to określenie całej bryły 3D pojazdu na podstawie pary fotografii. Do określenia wymiarów (takich jak np. deformacje nadwozia) w przestrzeni trójwymiarowej względem osi (x, y, z) wymagane jest posiadanie minimum dwóch zdjęć obejmujących wspólnym zasięgiem opracowywaną bryłę. Na poniższej il. nr 1, zaczerpniętej z przytoczonego artykułu, zaprezentowana została właśnie taka para zdjęć ze wspólnym obszarem pokrycia, niezbędnym do określenia nowo wyznaczanych punktów 3D.

1 Oś optyczna obiektywu prostopadła do fotografowanej płaszczyzny obiektu.

2 Oś optyczna obiektywu skośna względem fotografowanej płaszczyzny obiektu.

3 Przetworzone zdjęcie, wynikiem czego obraz uzyskuje jednolitą skalę i prostopadłość względem fotografowanego obiektu.



Zdj. 1. Zorientowana wzajemnie para zdjęć o wspólnym obszarze pokrycia z wykonaną stereodygitalizacją deformacji nadwozia (ilustracja zaczerpnięta z artykułu Problemy Kryminalistyki nr 253/2006; zdj. A Sikora)

Wykorzystując w takim przypadku oprogramowanie fotogrametryczne możliwe jest (Żelazek & Sikora, 2006) określenie deformacji nadwozia względem przyjętych osi układu współrzędnych (x, y, z). Wyznaczenie długości deformacji możliwe jest w dowolnym kierunku poprzez dowolną rotację uzyskanej w ten sposób bryły pojazdu i uszkodzeń. W przypadku braku pary zdjęć określenie trzeciego wymiaru, czyli współrzędnej Z metodami fotogrametrii nie jest możliwe.

Możliwości określenia wymiarów na podstawie pojedynczego zdjęcia

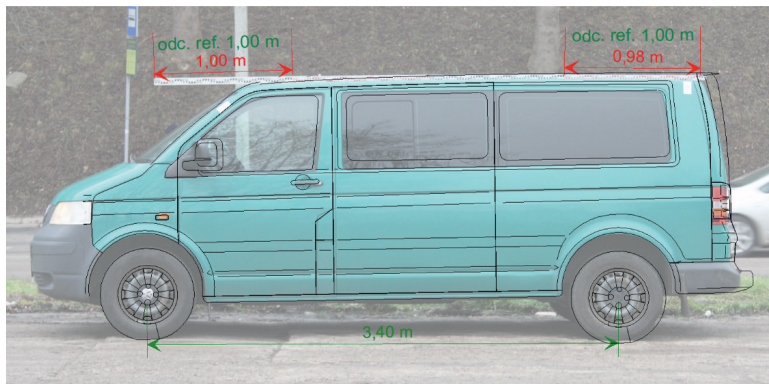
Co w sytuacji, gdy biegły nie dysponuje dwoma zdjęciami o wspólnym obszarze pokrycia, a tylko jedną fotografią, co niewątpliwie jest najczęściej występującym przypadkiem w praktyce rekonstrukcji zdarzeń drogowych?

W celu uzyskania odpowiedzi na to pytanie w pierwszym etapie zostaną przeanalizowane zdjęcia pojazdu zarejestrowane zgodnie z prawidłową techniką sporządzania takiej dokumentacji, czyli prostopadłe. Zostanie również zbadany wpływ nieprawidłowo wykonanych fotografii na możliwość i dokładność wymiarowania. Wzrost nierównoległości płaszczyzny, na której powstaje zapis obrazu (kiedyś kliszy aparatu, dzisiaj matrycy cyfrowych) w stosunku do umownej płaszczyzny fotografowanego obiektu powoduje proporcjonalny wzrost współczynnika zmiany skali, który zależy od kąta odchylenia osi obiektywu od prostej prostopadłej do płaszczyzny fotografowanej. Musimy również mieć świadomość, że obiektyw aparatu obciążony jest niedoskonałością, m.in. dystorsją, a obraz który powstaje w wyniku fotografowania jest efektem symetrii względem punktu (punktu głównego obiektywu), a nie symetrią względem płaszczyzny, co jest niezbędne do uzyskania jednolitej skali. W efekcie skala obiektu na fotografii zmienia się w kierunkach od rzutu punktu głównego obiektywu do krawędzi fotografii. Mając powyższe na uwadze, zdjęcia powinny być wykonane tak, aby w jak największym stopniu minimalizować niekorzystne z tego punktu widzenia właściwości geometryczne i optyczne. Ogniskowa w miarę możliwości powinna odpowiadać standardowej ogniskowej dla danego formatu (w przypadku formatu pełnoklatkowego długość ogniskowej wynosi 50 mm). Oś obiektywu powinna być usytuowana w przybliżeniu prostopadłe do fotografowanego obiektu. Przykład tak wykonanego zdjęcia zaprezentowano poniżej.



Zdj. 2. Fotografia o ogniskowej 50 mm pojazdu Volkswagen T5 wykonana zgodnie z zasadami, tj. prostopadłe do boku pojazdu

Powyższą fotografię wyskalowano na podstawie rozstawu osi pojazdu (Zdj. 3), który wynosi 3,40 m⁴ (zaznaczono odcinkiem koloru zielonego), następnie umieszczono ten obraz w tle sylwetki wzorcowej⁵ pojazdu Volkswagen T5 (linie koloru czarnego). Na tej podstawie możliwe było wstępne przeanalizowanie dokładności tak wykonanej fotografii w stosunku do modelu wzorcowego, co zaprezentowano w formie graficznej na poniższej ilustracji.



Zdj. 3. Fotografia pojazdu Volkswagen wykonana zgodnie z zasadami, tj. prostopadle o ogniskowej 50 mm, wyskalowana na podstawie rozstawu osi = 3,40 m sylwetki wzorcowej (linie w kolorze czarnym) oraz z zaznaczonymi odcinkami kontrolnymi (kolor czerwony), które powinny odpowiadać długości 1 m na łacie geodezyjnej

Szczegółowa analiza dokładności tak wykonanej fotografii względem sylwetki wzorcowej zostanie przedstawiona tabelarycznie w dalszej części artykułu, natomiast na tym etapie sprawdzono długości odcinków referencyjnych na łacie geodezyjnej umieszczonej na poszyciu dachu pojazdu. W wyniku badania stwierdzono, że dla lewej strony zdjęcia odcinkowi referencyjnemu o długości 1,0 m odpowiada dokładnie taka sama wartość w skali zdjęcia, a odcinkowi przy prawej krawędzi odpowiada odcinek 0,98 m. Wynika z tego wstępnie, że przy spełnieniu odpowiednich warunków zdjęcie, które w żaden sposób nie było przetwarzane fotogrametrycznie pokrywa się z dużą dokładnością z sylwetką wzorcową i może być przydatne dla celów określania pozycji i wymiarów śladów na pojeździe podczas procesu rekonstrukcji wypadku drogowego.

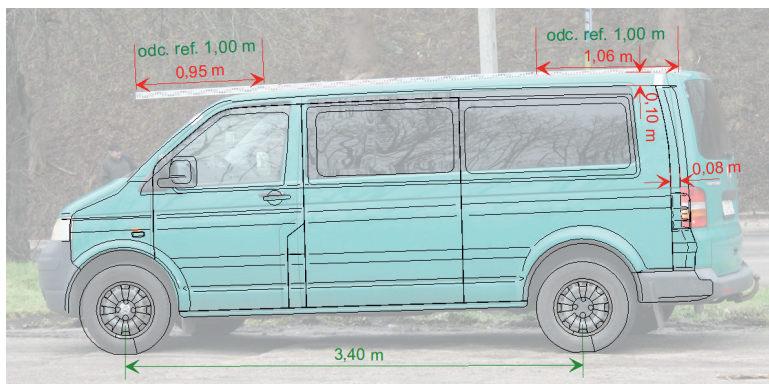
W praktyce niestety często zdarza się, że w materiale dowodowym brakuje tak wykonanych zdjęć, co również może wynikać z przyczyn obiektywnych (np. przeszkoda terenowa w miejscu wypadku, uniemożliwiająca wykonanie fotografii prostopadle). Poniżej zaprezentowano fotografię ukośną o nieznacznym, 10-stopniowym, odchyleniu kątowym od prostej prostopadłej do boku pojazdu.



Zdj. 4. Fotografia wykonana ukośnie pod kątem 10° względem boku samochodu Volkswagen T5

- 4 Parametr ustalony na podstawie informacji zawartych na ogólnodostępnych stronach internetowych dotyczących danych technicznych pojazdów.
- 5 Sylwetki wzorcowe pojazdów oferowane są przez różne podmioty. Można również opracować je we własnym zakresie, np. fotogrametrycznie lub przy użyciu skanera laserowego.

W analogiczny sposób jak w przypadku fotografii wykonanej prostopadle do pojazdu przeprowadzono wstępną analizę jej przydatności do określania wymiarów. Zdjęcie zostało wyskalowane również w oparciu o rozstaw osi pojazdu, następnie umieszczono ten obraz na tle sylwetki wzorcowej pojazdu Volkswagen (linie koloru czarnego), a w dalszej kolejności wykonano pomiar jednowymiarowych odcinków łąty geodezyjnej umieszczonej na poszyciu dachu pojazdu – ilustracja poniżej.



Zdj. 5. Fotografia zaprezentowana na Zdj. 3 wyskalowana na podstawie rozstawu osi = 3,40 m w tle sylwetki wzorcowej (linie koloru czarnego) oraz z zaznaczonymi odcinkami referencyjnymi na poszyciu dachu pojazdu (wymiary koloru czerwonego), które powinny odpowiadać długości 1,0 m

Jak można zauważyć nawet przy tak małym odchyleniu kątowym znacząco pogorszyła się dokładność wymiarowania bezpośrednio ze zdjęcia. Sylwetka pojazdu zarejestrowana na fotografii odbiega od jego prawdziwego kształtu. Można zauważyć, że pomiar jednowymiarowych odcinków referencyjnych łąty geodezyjnej przy lewej krawędzi wynosi 0,95 m, a pomiar takiego odcinka przy prawej krawędzi wynosi 1,06 m. Wynika z tego, że nawet tak nieznaczne odchylenie kątowe osi obiektywu od prostej prostopadłej do jego boku, jak w przypadku przedmiotowej fotografii, skutkuje istotną zmiennością skali w różnych obszarach zdjęcia. W lewej części obrazu obiekty są krótsze, a w prawej – dłuższe. Sylwetka pojazdu jest również wyższa o 0,1 m od sylwetki wzorcowej. Takie rozbieżności podczas określenia deformacji mogą przyczynić się do podważania wykonanych na tej podstawie obliczeń, np. dotyczących utraty energii podczas wypadku, a w konsekwencji wniosków całości rekonstrukcji zdarzenia drogowego.

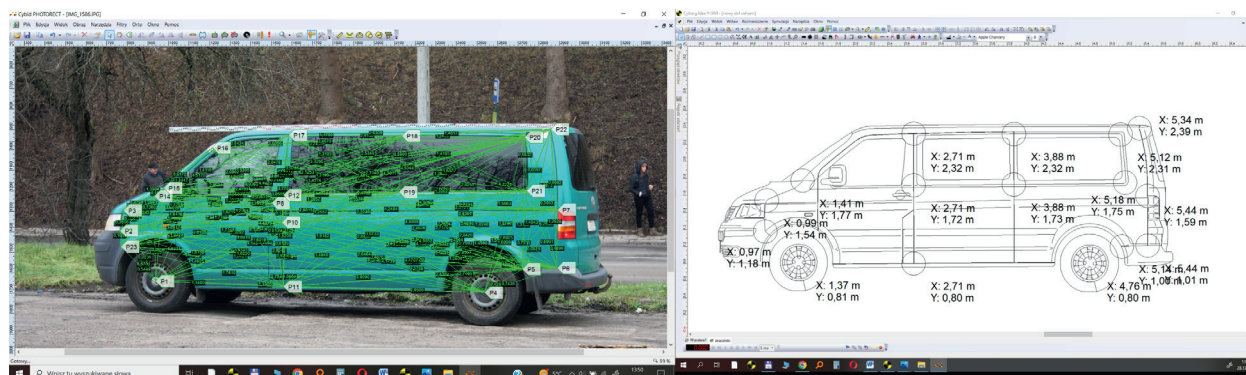
Ortorektyfikacja zdjęcia ukośnego

Poniżej zostanie przebadany przypadek, gdy pojedyncza fotografia wykonana ukośnie poddana zostanie ortorektyfikacji.

Przy założeniu, że dany obszar wymiarowania reprezentuje płaszczyznę, możliwe jest zastosowanie transformacji 2D „płaszczyzny do płaszczyzny”. W celu odpowiedzi na pytanie, czy stosowanie takiej transformacji jest możliwe w przypadku boku pojazdu, przebadane zostaną możliwości fotogrametrycznego przetworzenia pojedynczych zdjęć do takiej postaci, aby nawet fotografiom wykonanym pod kątem (ukośnie względem fotografowanej płaszczyzny) przywrócić prostopadłość i kartometryczność⁶. Wyjaśnienia wymaga fakt, że wyzwaniem, jakie stoi u podstawy tego eksperymentu, jest zastosowanie transformacji 2D („płaskiej”) przy przetwarzaniu obrazu boku pojazdu, który nie jest w istocie płaszczyzną. Naturalne dla takiego procesu przetwarzania obrazu (boku pojazdu) byłoby zastosowanie transformacji 3D, które pozwoliłyby na określenie współrzędnych (x, y, z) na krzywiźnie nadwozia, a nie tylko (x, y), a co za tym idzie możliwości odpowiedniej redukcji miar ukośnych. Ze względu jednak na założenie badawcze, że dysponujemy tylko jedną fotografią obiektu (pojazdu), a nie dwiema (które są konieczne do zastosowania transformacji przestrzennej), badania zostaną przeprowadzone w oparciu o transformację płaską, która w tej sytuacji jest jedyną potencjalną szansą na przywrócenie kartometryczności zdjęcia ukośnego. Wyniki tego eksperymentu mają udzielić odpowiedzi, czy możliwe jest zastosowanie transformacji 2D i uzyskanie wystarczającej dokładności do wymiarowania śladów na boku pojazdu. Skoro bok pojazdu nie jest płaszczyzną, należy spodziewać się rozbieżności pomiędzy nowo wyznaczonym obrazem będącym efektem transformacji 2D a odpowiadającymi punktami sylwetki wzorcowej, która to rozbieżność zostanie poddana

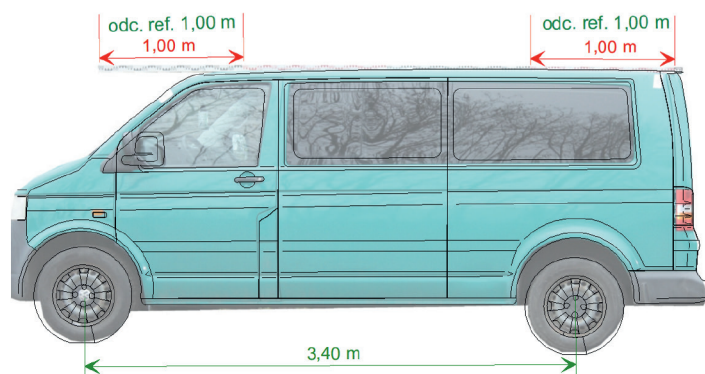
⁶ Obraz może być wykorzystywany do przeprowadzania pomiarów.

szczegółowej analizie dokładności w formie tabelarycznej oraz wstępnie poniżej na fotografiach. Przetworzeniu fotogrametrycznemu poddana zostanie fotografia zaprezentowana na Zdj. 4, tj. Volkswagen Transporter T5. W tym celu wykorzystane zostanie oprogramowanie Photorect 4.0 firmy CYBID, które dysponuje narzędziem do transformacji obrazu 2D. Przetworzenie obrazu możliwe jest w oparciu o dowolną liczbę punktów referencyjnych, co wskazano na Zdj. 6. Na podstawie sylwetki wzorcowej wyznaczono punkty referencyjne, które posłużyły jako punkty odniesienia fotografii względem rzeczywistości.



Zdj. 6. Punkty w oparciu, o które wykonano ortorektyfikację obrazu

W wyniku transformacji obrazu ze Zdj. 4, uzyskano zrektyfikowany obraz zaprezentowany na Zdj. 7.



Zdj. 7. Zrektyfikowana fotografia ze Zdj. 6

Wstępnie przeprowadzono analizę dokładności w analogiczny sposób jak w poprzednich przypadkach sprawdzając odległości 1,0 m odcinków referencyjnych na łacie geodezyjnej umieszczonej na poszyciu dachu pojazdu. W wyniku badania stwierdzono, że zarówno dla lewej, jak i prawej strony zdjęcia odcinkowi 1,0 m na łacie geodezyjnej odpowiada dokładnie taka sama wartość 1,0 m. Skala zdjęcia zachowuje stałość, a szczegóły pojazdu pokrywają się wzrokowo z odpowiadającymi szczegółami modelu wzorcowego. Wynika z tego wstępnie, że przy geometrii nadwozia pojazdu typu „bus” możliwe jest przetworzenie ukośnego obrazu do prostokątnego (ortorektyfikacji) przy zastosowaniu transformacji 2D, a krzywizna boku nadwozia nie powoduje znaczących niedokładności nowo wyznaczanych punktów obrazu. Transformacja obrazu powinna zostać zakończona analizą dokładności punktów kontrolnych.

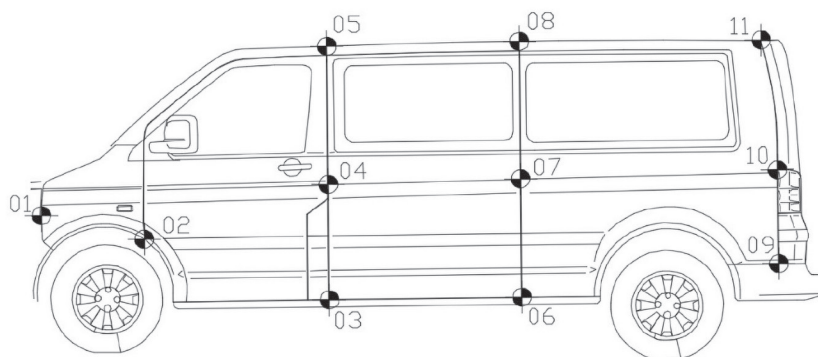
Należy jednak pamiętać, że wymiarowanie pojazdu może odbywać się tylko względem transformowanej płaszczyzny, dlatego do badań usunięto elementy przodu pojazdu modelu wzorcowego, które leżą w dalszej perspektywie w stosunku do boku pojazdu. Szczegółowa analiza zostanie przedstawiona poniżej w formie tabelarycznej.

Analiza dokładności

Analizę dokładności przeprowadzono w oparciu o jedenaście jednoznacznie identyfikowalnych punktów kontrolnych nadwozia modelu wzorcowego, rozmieszczonych na całej szerokości boku pojazdu zgodnie z zaprezentowanym poniżej szkicem oznaczonym nr 1. Następnie określono te punkty na fotografii w tym samym układzie współrzędnych, co z kolei pozwoliło na obliczenie odchyłki wyznaczenia położenia punktów.

Analizie dokładności określenia pozycji punktów ze zdjęcia poddano wszystkie omawiane wcześniej warianty, tj.:

- **Wariant 1:** Zdjęcie wykonane zgodnie z prawidłowymi zasadami sporządzania takiej dokumentacji, tj. prostopadle do fotografowanego boku pojazdu o ogniskowej obiektywu odpowiadającej 50 mm dla wymiaru pełnoklatkowego;
- **Wariant 2:** Zdjęcie wykonane ukośnie względem boku pojazdu o niewielkim kącie odchylenia osi obiektywu o wartości 10°;
- **Wariant 3:** Zrezyfikowane zdjęcie ukośne z Wariantu 2.



Szkic 1. Punkty kontrolne oznaczone na sylwetce wzorcowej

Współrzędne punktów kontrolnych zostały określone w oparciu o model sylwetki wzorcowej, które w przyjętym układzie odniesienia wynoszą odpowiednio:

Nr punktu	X [m]	Y [m]
1	149,999	99,996
2	150,632	99,855
3	151,769	99,460
4	151,729	100,184
5	151,738	101,036
6	152,920	99,493
7	152,915	100,231
8	152,910	101,072
9	154,498	99,699
10	154,471	100,276
11	154,398	101,059

Tab. 1. Punkty kontrolne oznaczone na sylwetce wzorcowej

ODCHYLENIA OD POZYCJI PUNKTÓW KONTROLNYCH POJAZDU [mm]			
Nr punktu kontrolnego	ZDJĘCIE PROSTOPADŁE (oś obiektywu prostopadła do boku pojazdu) [mm]	ZDJĘCIE UKOŚNE (oś obiektywu ukośna do boku pojazdu o niewielkim kącie = 10°) [mm]	ZDJĘCIE ZREKTYFIKOWANE (przetworzone fotogrametrycznie zdjęcie skośne) [mm]
1	4	6	4
2	10	58	5
3	18	62	18
4	18	81	18
5	61	50	2
6	5	7	3
7	20	37	8
8	46	54	4
9	9	41	21
10	29	52	4
11	65	94	23

Szczegółowa analiza dokładności potwierdza wcześniejsze wstępne ustalenia dla każdego z badanych wariantów. Analiza dokładności dla zdjęcia ukośnego została wykonana dla nieznacznego 10°-wego odchylenia osi optycznej obiektywu od prostopadłej do obiektu. Przy większych odchyleniach osi należy spodziewać się wzrostu niedokładności wymiarowania bezpośrednio ze zdjęcia.

WNIOSKI:

1. Prawidłowo wykonane zdjęcia, prostopadłe 1 do fotografowanego boku pojazdu o standardowej ogniskowej dla danego formatu matrycy aparatu, umożliwiają (po uprzednim wyskalowaniu) bezpośrednie pomiary dla celów rekonstrukcji wypadków drogowych.
2. W przypadku dysponowania zdjęciami pojazdu wykonanymi ukośnie 2 do fotografowanego boku pojazdu, zasadne jest wykorzystanie transformacji fotogrametrycznych 3D. W przypadku dysponowanie jedynie pojedynczymi ukośnymi zdjęciami (jak w badanym przypadku) zastosowanie transformacji fotogrametrycznej 2D jest również celowe i umożliwia dalsze wykorzystanie przetworzonej fotografii dla celów rekonstrukcji wypadków.
