

PROBLEMS OF DATA INTERPRETATION OF THE SELECTED DEVICES RECORDING VEHICLES MOVEMENT PARAMETERS

Summary

In the paper there were compared some of the types of devices used for measuring vehicles movement parameters, which in direct way measure various physical parameters. There was discussed, how data are registered by acceleration sensors with electronic gyroscopes, used among others in the automotive "black boxes". There was carried out the signal analysis from above mentioned sensors, followed by making simulation and experimental research. For both types of studies, there were made the attempts to reconstruct the motion of the mass center of a car, on the basis on pre-assigned (in a simulation computer program) or measured (in a real experiment) acceleration and angular velocity values. The results indicated the existing restrictions in usage of sensors to make reconstruction of vehicle movement parameters, justifying the need for further research to clarify the causes and minimize the observed errors.

Key words: vehicles; motion path; motion parameters; measurements; acceleration sensors; gyroscopes; experimentation

PROBLEMATYKA INTERPRETACJI DANYCH Z WYBRANYCH URZĄDZEŃ REJESTRUJĄCYCH PARAMETRY RUCHU POJAZDÓW

Streszczenie

W artykule zestawiono niektóre rodzaje urządzeń, służących do pomiarów parametrów ruchu pojazdów, mierzących w sposób bezpośredni różne wielkości fizyczne. Omówiono sposób rejestracji danych przez czujniki przyspieszeń z elektronicznymi żyroskopami, stosowanymi między innymi w samochodowych „czarnych skrzynkach”. Przeprowadzona została analiza sygnałów z ww. czujników, poprzedzona badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi. W przypadku obu rodzajów badań, podejmowano próby odtwarzania toru ruchu środka masy samochodu, na podstawie uprzednio wyznaczonych (w symulacyjnym programie komputerowym) lub zmierzonych (w rzeczywistym eksperymencie) przyspieszeń i prędkości kątowych. Wyniki badań wskazały na istniejące obecnie ograniczenia w zakresie stosowania czujników do odtwarzania parametrów ruchu pojazdów, co uzasadnia konieczność prowadzenia dalszych poszukiwań w celu wyjaśnienia przyczyn oraz minimalizację zaobserwowanych błędów.

Słowa kluczowe: pojazdy; tor ruchu; parametry ruchu; pomiary; czujniki przyspieszeń; żyroskopy; badania

1. Wprowadzenie

Idea zapisu parametrów ruchu pojazdów liczy już kilkadziesiąt lat. W tym czasie powstawały różne koncepcje przeprowadzania pomiarów parametrów ruchu pojazdów, które dotyczą praktycznie wszystkich mierzalnych wielkości fizycznych. Urządzenia te obecnie znajdują powszechne zastosowanie zarówno do naukowych badań eksperymentalnych pojazdów, jak również w prewencji wypadkowej oraz ochronie prawnej użytkowników pojazdów i ich właścicieli [1, 7]. Temat ten jakkolwiek bardzo szeroko rozpoznany w świecie nauki wciąż daje możliwości rozwoju i kontynuacji.

Nie wszystkie z istniejących rozwiązań technicznych nadają się do wykorzystania w każdym z wymienionych celów. Nie ulega wątpliwości, że profesjonalna badawcza aparatura pomiarowa, której koszt kilkukrotnie przekracza cenę zakupu nowego samochodu, w którym jest zamontowana, zajmująca ponadto znaczną objętość przestrzeni zarówno we wnętrzu, jak również na zewnątrz pojazdu, nie będzie właściwym rozwiązaniem dla użytkowników „prywatnych”. Z drugiej strony fakt, iż inne urządzenie pomiarowe jest niewielkiej wielkości, a koszt jego zakupu nie przekracza kwoty kilku tysięcy złotych, nie musi automatycznie ograniczać jego zastosowania do użycia wyłącznie amatorskiego. W niniejszym artykule dokonano syntezy

wybranych urządzeń rejestrujących parametry ruchu pojazdów, koncentrując się w sposób szczegółowy na niedrogim i kompaktowym urządzeniu, rejestrującym dane w sposób podobny do systemu UDS.

2. Przegląd wybranych urządzeń rejestrujących parametry ruchu pojazdów

Całościowa analiza urządzeń rejestrujących parametry ruchu pojazdów wymaga wprowadzenia pewnej ich systematyki. Uporządkowania tego można by dokonać ze względu na wiele ich cech, np. rodzaj mierzonej/ych wielkości fizycznych, sposób działania, sposób montażu, cenę zakupu, dokładność wskazań i innych. Zdaniem autorów najbardziej uniwersalny wydaje się ich podział z punktu widzenia przeznaczenia, który z reguły wiąże przy okazji również inne parametry. Można wyróżnić dwie podstawowe grupy urządzeń rejestrujących, których listę zestawiono w tab. 1:

- a) przeznaczone do zastosowań badawczych (naukowych),
- b) przeznaczone do „innych” zastosowań drogowych.

Z uwagi na bardzo dużą liczbę parametrów technicznych urządzeń zestawionych w tab. 1, nie jest możliwe dokonanie ich dokładnego porównania w ramach niniejszej publikacji. Każdy z producentów aparatury pomiarowej, obszerną informację na temat swoich produktów (m. in. ich

dane techniczne), umieszcza na stronach internetowych. W niniejszym artykule przedstawiono jedynie ogólną strategię sposobu wykonywania pomiarów za pomocą poszczególnych urządzeń.

Tab. 1. Zestawienie urządzeń mających zastosowanie do pomiarów i rejestracji parametrów ruchu pojazdów

Tab. 1. List of devices applicable for measurements and recording of vehicle movement parameters

Urządzenia rejestrujące przeznaczone do zastosowań badawczych	Urządzenia rejestrujące przeznaczone do zastosowań powszechnych
„Piąte koło” (np. PEGASEM, PREISELER)	V-box Racelogic (prostsze wersje)
Corrsys-Datron	UDS
V-box Racelogic	Daq
IST	Tachografy analogowe i cyfrowe
UDS	Opóźniomierze
Daq	Zestawy kamera+opóźniomierz lub/i GPS
Crossbow	Systemy nawigacji samochodowych
	Adaptive Cruise Control

Tradycyjną metodą wykonywania pomiaru prędkości samochodu jest zastosowanie tzw. „piątego koła”. Koło to, przeważnie typu rowerowego, jest resorowane i może być zamontowane do nadwozia samochodu różnymi sposobami: za pośrednictwem haka holowniczego samochodu, z wykorzystaniem zestawu przyssawek, bądź specjalnych adapterów uprzednio przykręconych do pojazdu. „Piąte koło” doskonale sprawdza się do zastosowania w pomiarach prostoliniowego ruchu pojazdu (przyspieszanie, hamowanie), nie nadaje się natomiast do badań ruchu płaskiego i przestrzennego. Ograniczenia te, a także fakt rozwoju innych, konkurencyjnych systemów pomiarowych, mających większe możliwości rejestracji parametrów ruchu sprawił, że jest ono obecnie rzadko spotykane i używane. Jednym z producentów jest firma PREISELER oraz PEGASEM (rys. 1).



Rys. 1. Aparatura pomiarowa typu „piąte koło” firmy PEGASEM;

źródło: http://www.pegasem.com/english/mainframe_uk.htm

Fig. 1. Measuring apparatus type „fifth wheel”, produced by PEGASEM company;

source: http://www.pegasem.com/english/mainframe_uk.htm

W grupie urządzeń, przeznaczonych do zastosowań badawczo-naukowych, najbardziej rozpoznawalną marką jest

Corrsys-Datron. Od kilkadziesiąt lat sztandarowym produktem firmy jest zestaw, służący do pomiaru drogi przebytej przez pojazd (podłużnej i poprzecznej) z wykorzystaniem głowic optycznych. Obecnie zestaw ten może być znacząco rozbudowany (rys. 2) o dodatkowe urządzenia typu: fotokomórka, czujnik do pomiaru prędkości kątowej koła, nadajnik GPS, zestaw czujników przyspieszeń z żyroskopami, zintegrowane koło kierownicy z pomiarem momentu obrotowego, kąta skrętu i prędkości kątowej kierownicy, czujnik do wyznaczania chwilowego pochylenia koła kierowanego względem nawierzchni drogi, moduł do pomiaru temperatury, naprężeń i wiele innych.



Rys. 2. Aparatura pomiarowa firmy CORRSYS-DATRON; źródło: http://www.corrsys-datron.com/Support/PDF_Downloads/200-632e-06.10.pdf

Fig. 2. Measuring apparatus produced by CORRSYS-DATRON company; Source: http://www.corrsys-datron.com/Support/PDF_Downloads/200-632e-06.10.pdf

Wadą systemu CORRSYS-DATRON jest jego cena. Sam czujnik optyczny w roku 2011 kosztował około 15000 €, stacja do akwizycji danych wraz z osprzętem od 30000 do 60000 €, zintegrowane koło pomiarowe kierownicyokoło 20000 €, itd.

System pomiarowy V-BOX RACELOGIC składa się z nadajnika współpracującego z systemem GPS oraz GLONASS (rosyjski, satelitarny system pozycjonowania), lub/oraz naziemnych stacji bazowych RTK, co pozwala na wykonywanie pomiarów prędkości oraz drogi z częstotliwością rzędu 100 Hz oraz nagrywanie filmów video. Oprogramowanie tego układu pomiarowego pozwala na przedstawienie filmów video oraz rejestrowanych wyników pomiarów w sposób zintegrowany, jak przedstawiono na rys. 3.

Największą obecnie grupą urządzeń pomiarowych, stosowanych w pojazdach, są niewielkie urządzenia, mierzące przyspieszenia i prędkości kątowe. W oparciu o pomiar tych wielkości fizycznych działają, między innymi, systemy pomiarowe produkowane przez firmy IST (rys. 4), Daq, UDS oraz Crossbow. Na stronie internetowej firmy IST znajduje się informacja, że współpracuje ona m. in. z amerykańską serią wyścigów samochodowych INDY-CAR i, że z wykorzystaniem zestawu czujników możliwe jest odtworzenie trajektorii ruchu samochodu wyścigowego po zderzeniu, co przedstawiono na rys. 5.

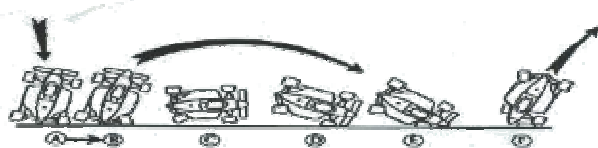
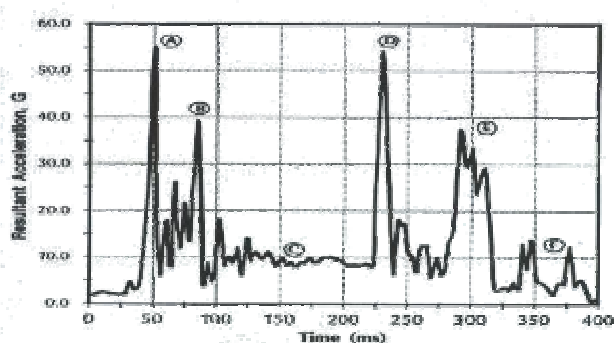
W niniejszym artykule w sposób szczegółowy przedstawiono problematykę interpretacji danych z urządzeń, rejestrujących parametry ruchu pojazdów w sposób podobny, jak przedstawiono na rys. 4. Ideę pomiaru przyspieszeń i prędkości kątowych reprezentują m. in. wypadkowe rejestratory danych, stosowane (na życzenie) w pojazdach, zwane potocznie „czarnymi skrzynkami”.



Rys. 3. Aparatura pomiarowa V-BOX RACELOGIC oraz zintegrowany sposób prezentacji wyników pomiarów; źródło: <http://www.racelogic.co.uk/index.php/en/our-products>
 Fig. 3. V-BOX RACELOGIC measuring apparatus and integrated form of measured results presentation;
 source: <http://www.racelogic.co.uk/index.php/en/our-products>



Rys. 4. Widok urządzenia firmy IST, służącego do pomiaru przyspieszeń oraz prędkości kątowych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach; źródło: <http://www.isthq.com/>
 Fig. 4. View of apparatus produced by IST company, used for measurements of accelerations and angular velocities in three mutual perpendicular directions; source: <http://www.isthq.com/>



Rys. 5. Odtworzenie trajektorii ruchu po zderzeniowego samochodu wyścigowego INDY-CAR; źródło: <http://www.isthq.com/>
 Fig. 5. Reconstruction of after impact movement trajectory of INDY-CAR racing vehicle; source: <http://www.isthq.com/>

3. Sposób rejestracji danych przez „czarną skrzynkę” pojazdu

Wypadkowe rejestratory danych określa się najczęściej za pomocą jednego z trzech poniższych oznaczeń:

- ADR (Accident Data Recorder),
- EDR (Event Data Recorder),
- UDS (Unfall Daten Speicher).

Oznaczenia te mogą dotyczyć dwóch rodzajów urządzeń, różniących się liczbą rejestrowanych składowych przyspieszeń i prędkości kątowych. Rejestratory typu „samolotowego” mierzą 3 składowe przyspieszenia oraz 3 prędkości kątowe (zgodnie ze schematem przestrzennego układu współrzędnych, pokazanym na rys. 4), natomiast rejestratory typu „samochodowego” dokonują pomiaru jedynie jednej prędkości kątowej (obrót wokół osi pionowej pojazdu) oraz dwóch składowych przyspieszenia – w kierunku wzdłużnym i poprzecznym pojazdu [4, 6]. Zastosowanie rejestratora pierwszego typu teoretycznie jest wystarczające do odtworzenia przestrzennej trajektorii ruchu pojazdu. W przypadku rejestratora typu „samochodowego” odtworzenie toru jego ruchu byłoby teoretycznie możliwe tylko w razie płaskiego ruchu samochodu – po idealnie gładkiej powierzchni, bez wystąpienia ugięcia ogumienia oraz elementów układu zawieszenia kół. Oba typy rejestratorów, w postaci binarnej rejestrują również informacje dodatkowe, np. stan użycia świateł, hamulców, włączenie zapłonu, itd. [1]. Rejestratory nie są w żaden sposób stabilizowane mechanicznie (np. przez zastosowanie wirującego żyroskopu), nie mają również korekcy zapisu danych, związanego z faktem, iż pionowa oś czujnika nie jest równoległa do kierunku wektora przyspieszenia ziemskiego.

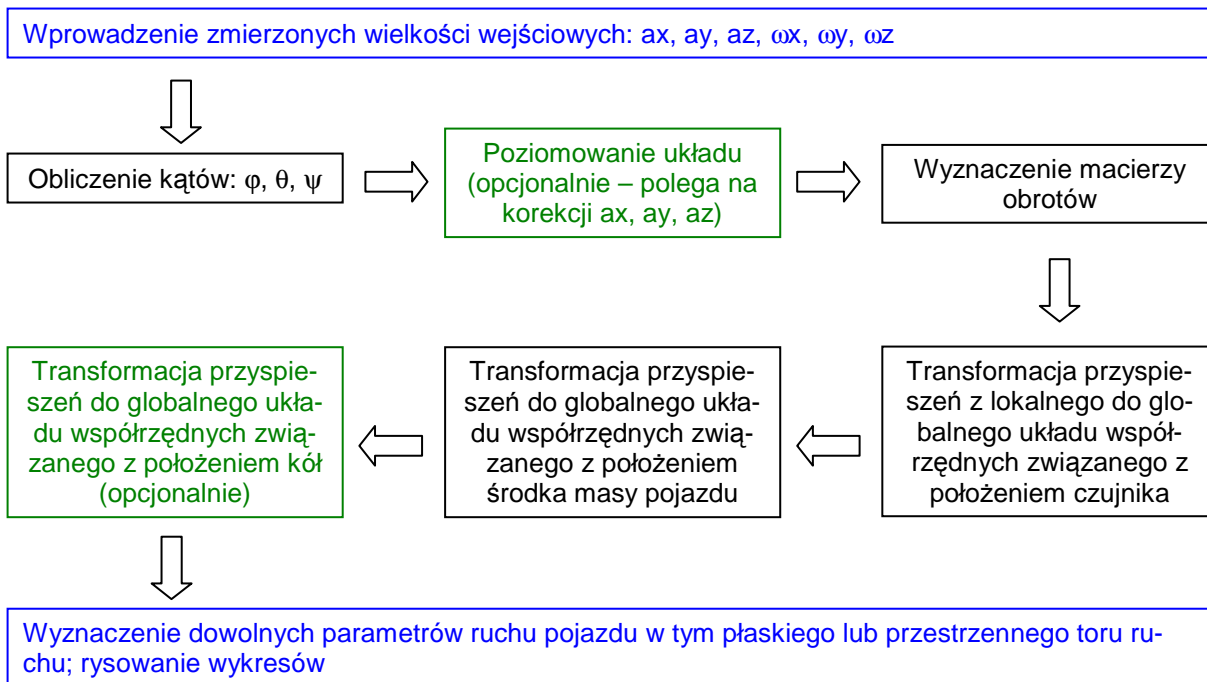
„Czarna skrzynka” pojazdu wykonuje ciągły pomiar omówionych wyżej parametrów, w cyklach trwających 30 s, z częstotliwością 500 Hz. Przekroczenie pewnej granicznej wartości przyspieszenia interpretowane jest przez urządzenie pomiarowe jako wystąpienie zderzenia. W tym momencie zawartość dotychczasowej pamięci urządzenia jest „zamrażana” i następuje rejestracja danych w następujący sposób [2, 5]:

- rejestracja danych w czasie 100 ms przed i 100 ms po uderzeniu, realizowana z częstotliwością 500 Hz,
- rejestracja danych w czasie 30 s przed i 15 s po uderzeniu, realizowana z częstotliwością 25 Hz,
- rejestracja danych w czasie do 30 min po uderzeniu, realizowana z częstotliwością 2 Hz.

Do badań przedstawionych w dalszej części niniejszego artykułu, autorzy nie wykorzystali typowego urządzenia UDS, lecz zestaw czujników pomiarowych, które realizowały pomiar zgodnie z konwencją rejestratora wypadkowego typu „samolotowego”. Po podłączeniu do komputera zestaw czujników rejestruje przyspieszenia i prędkości kątowe z maksymalną częstotliwością kilkuset Hz, uzależnioną od mocy obliczeniowej tego komputera.

4. Schemat blokowy algorytmu orientacji przestrzennej wypadkowego rejestratora danych

Do odtworzenia toru ruchu samochodu na podstawie danych zmierzonych rejestratorem nie wystarczy proste całkowanie przyspieszeń (w celu wyznaczenia prędkości, a następnie drogi przebytej przez pojazd), czy prędkości kątowych (w celu wyznaczenia kątów obrotu nadwozia). Analiza przyspieszeń wymaga utworzenia tzw. macierzy obrotów i przeprowadzenia ich transformacji do kolejnych układów współrzędnych. Schemat blokowy algorytmu opracowanego przez autorów i zastosowanego do obliczeń numerycznych związanych z odtwarzaniem parametrów ruchu samochodu w programach MATLAB i OCTAVE przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy algorytmu orientacji przestrzennej wypadkowego rejestratora danych
 Fig. 6. Block diagram of the algorithm of the spatial orientation of accident data recorder

Jeżeli w czasie przeprowadzania pomiarów lub symulacji, parametry ruchu pojazdu były mierzone poza jego środkiem masy, to po wykonaniu transformacji z lokalnego do globalnego układu współrzędnych, związanego z położeniem czujnika, należy dokonać kolejnej transformacji – do środka masy pojazdu. Jeżeli pomiar wykonywany był z wykorzystaniem rzeczywistych czujników, analizę przyspieszeń należy zacząć od numerycznego wypoziomowania układu, co przedstawiono w dalszej części artykułu. Jeżeli finalnym rezultatem obliczeń nie ma być jedynie odtworzenie trajektorii ruchu środka masy pojazdu (traktowanego jako punkt), lecz także całego samochodu (traktowanego jako bryłę o określonych rozmiarach), niezbędne jest również przeprowadzenie transformacji przyspieszeń z globalnego układu związanego ze środkiem masy do układu globalnego związanego np. z położeniem kół, bądź narożników pojazdu.

5. Badania symulacyjne

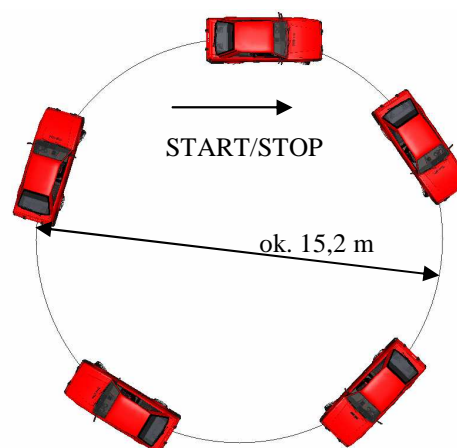
W celu weryfikacji algorytmu orientacji przestrzennej przeprowadzono cykl badań symulacyjnych z wykorzystaniem oprogramowania PC-CRASH. Program ten stanowi znane na całym świecie narzędzie, wspierające proces rekonstrukcji wypadków drogowych. Umożliwia on między innymi symulowanie ruchu samochodu po torze o dowolnym kształcie (również po torze przestrzennym) oraz przeprowadzanie symulacji zderzeń pojazdów na podstawie parametrów zadanych przez użytkownika. Wśród wielu danych wyjściowych programu, znajdują się również dane z wirtualnych czujników przyspieszeń, które mogą zostać przez użytkownika „zamontowane” w dowolnym miejscu – zarówno w obszarze nadwozia pojazdu, jak również poza nim. Badania symulacyjne napisanego algorytmu polegały kolejno na zadawaniu w programie PC-CRASH parametrów ruchu samochodu (w postaci wartości przyspieszeń, czasów i kątów skrętu kół), następnie wykonaniu symulacji ruchu i wygenerowaniu danych z wirtualnych czujników przyspieszeń. Dane te były wprowadzane jak wejściowe do opracowanego algorytmu orientacji przestrzennej. Po ich przetworzeniu, program napisany przez autorów powinien wygenerować dane wyjściowe w postaci 3-osowych współrzędnych drogi, przebytej przez śro-

dek pojazdu oraz jego koła.

Jednym z licznych wykonanych badań symulacyjnych był przejazd samochodu od „startu zatrzymanego”, po torze zbliżonym do kołowego, aż do zatrzymania w miejscu, w którym uprzednio nastąpiło rozpoczęcie ruchu. Do symulacji wprowadzono dane wejściowe w postaci dwóch sekwencji, następujących kolejno po sobie:

- przyspieszenie $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ w czasie 8 s z narastaniem przyspieszenia 0,6 s; średnica zewnętrzna skrętu -16,31 m (obrot kół kierownicy -360 st.), czas narastania skrętu 2 s,
- hamowanie $1,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ w czasie 4 s z narastaniem opóźnienia 1 s; średnica zewnętrzna skrętu -17,8 m (obrot kół kierownicy -329 st.), czas narastania skrętu 0,5 s.

Rezultat przeprowadzonej symulacji w postaci realizacji przez program PC-CRASH zadanego toru ruchu samochodu przedstawiono na rys. 7.

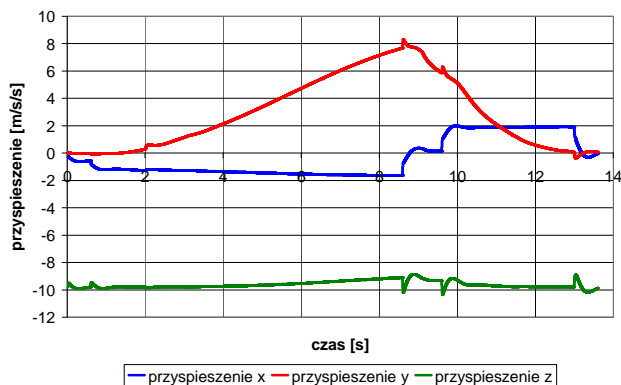


Rys. 7. Badania symulacyjne: przejazd samochodu po torze zbliżonym do kołowego; środki mas sylwetek pojazdów w kolejnych przedstawionych pozycjach są względem siebie oddalone o odległość 10 m

Fig. 7. Simulation studies: driving of a car on a track similar to the circular one; mass centers of the vehicles in the subsequent presented positions are relative to each other by a distance of 10 m

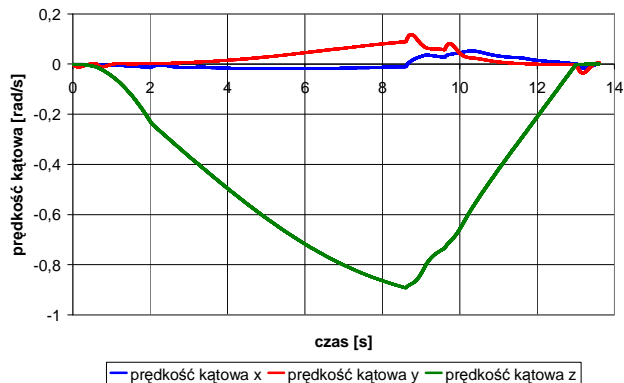
Charakterystyki przyspieszenia i prędkości kątowej w funkcji czasu uzyskane podczas symulacji przejazdu samochodu dla wirtualnego czujnika znajdującego się poza środkiem masy pojazdu, przedstawiono na rys. 8 i 9. Czujnik ten „przemieszczono” względem środka masy o następujące odległości:

- 2 m w kierunku tyłu pojazdu,
- 1 m w kierunku lewej strony pojazdu,
- 1,5 m w kierunku górnej części pojazdu.



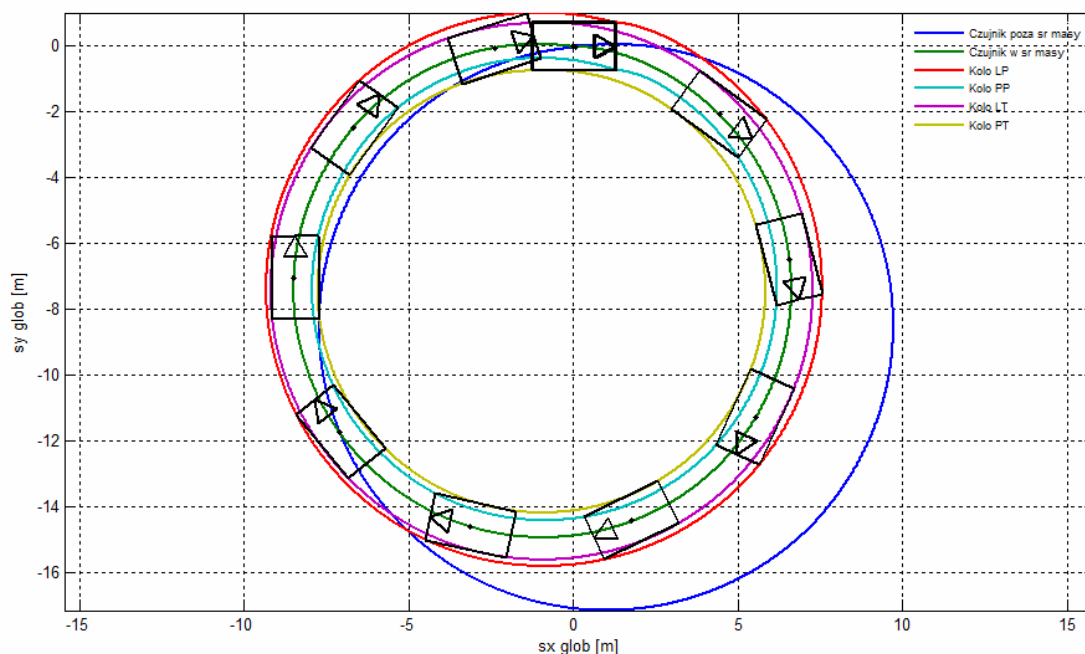
Rys. 8. Charakterystyka przyspieszenia w funkcji czasu dla symulacji ruchu samochodu po torze zbliżonym do kołowego; pomiar wykonany poza środkiem masy samochodu
Fig. 8. Characteristics of acceleration in the function of time for simulation of vehicle movement along a track similar to the circular one; the measurement was made outside of the mass center of a car

Położenie czujnika względem środka masy ma istotne znaczenie dla wartości mierzonych przyspieszeń. Dla używanych wartości prędkości kątowych umiejscowienie to nie ma żadnego znaczenia.



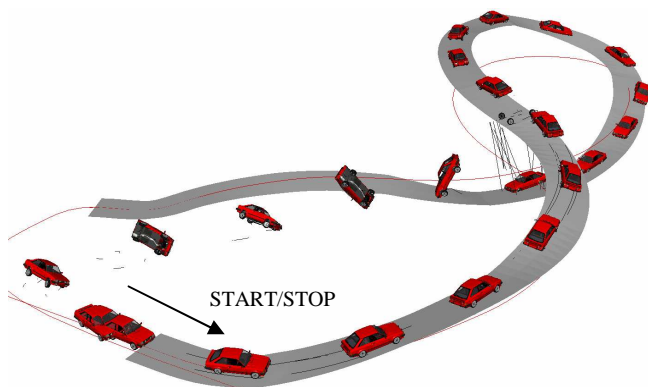
Rys. 9. Charakterystyka prędkości kątowej w funkcji czasu dla symulacji ruchu samochodu po torze zbliżonym do kołowego
Fig. 9. Characteristics of angular velocity in the function of time for simulation of vehicle movement along a track similar to the circular one

W wyniku przeprowadzenia w programie OCTAVE transformacji, których schemat blokowy przedstawiono na rys. 6, odtworzono tor ruchu środka masy pojazdu, uzyskując jego przebieg praktycznie identyczny, jak pokazano na rys. 7 (por. rys. 10). Powstałe różnice, wynoszące dla każdego z kierunków ruchu pojazdu (x, y, z) jedynie kilka cm, wynikały prawdopodobnie przyjętego kroku całkowania (0,001 s) oraz z faktu, iż wewnętrzny algorytm używany przez oprogramowanie PC-CRASH i program napisany przez autorów ma z całą pewnością znacząco odmienną strukturę. Stwierdzono też, że brak uwzględniania w obliczeniach tego, iż wirtualny czujnik znajdował się poza środkiem masy pojazdu powodowało otrzymanie błędnego toru ruchu tego punktu, co niebieską linią pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Tor ruchu samochodu, odtworzony w programie OCTAVE na podstawie wskazań wirtualnych czujników przyspieszeń; wierzchołki czarnych prostokątów wyznaczają nie położenie narożników sylwetki pojazdu, lecz miejsca zabudowy kół w tym samochodzie; środki mas sylwetek pojazdów w kolejnych przedstawionych pozycjach są względem siebie oddalone o odległość 5 m
Fig. 10. The vehicle track movement, reconstructed in the OCTAVE software on the basis of readings of virtual acceleration sensors, the tops of the black rectangles designate not the positions of the vehicle corners, but areas of installation of car wheels; mass centers of the vehicles in the subsequent presented positions are relative to each other by a distance of 5 m

Badania symulacyjne prowadzone były również w taki sposób, by wymusić złożony ruch pojazdu w przestrzeni trójwymiarowej. Do tego celu w programie PC-CRASH zbudowany został złożony model jezdni, która w rzucie z góry przypominała zdeformowaną ósemkę (rys. 11). Przebieg tej jezdni w przestrzeni w postaci niwelety (ukształtowania podłużnego) i przechyłki (ukształtowania poprzecznego), przedstawiony został na rys. 12a i 12 b za pomocą wykresów programu PC-CRASH w funkcji rzutu z góry długości osi jezdni. Wynika z nich, że maksymalna różnica wysokości jezdni wynosiła około 10 m, a lewo- i prawostronne przechylenie jezdni osiągało skrajne wartości +/- około 25%. W przypadku opisywanego testu, wirtualny czujnik przyspieszeń i prędkości kątowych umieszczony został w środku masy pojazdu.



Rys. 11. Badania symulacyjne: przejazd samochodu po przestrzennym torze przypominającym w rzucie z góry zdeformowaną ósemkę; środki mas sylwetek pojazdów w kolejnych przedstawionych pozycjach są względem siebie oddalone o odległość 10 m

Fig. 11. Simulation studies: driving of a car on a spatial track, which in the top view is similar to the deformed figure of eight, mass centers of the vehicles in the subsequent presented positions are relative to each other by a distance of 10 m

W czasie przeprowadzania badań na torze przestrzennym okazało się, że program PC-CRASH nie pozwala na symulację jazdy samochodu po torze przecinającym się na płaszczyznach, leżących na różnych wysokościach. Takie przecięcie toru program interpretuje jako zderzenie (o nieznanym parametrach), czego rezultat w postaci wyrzucenia w górę i „koziółkowania” samochodu można zaobserwować na rys. 11. Opisane ograniczenie nie przeszkodziło temu, żeby symulację przeprowadzić do końca w sposób zgodny z początkowymi założeniami, a więc

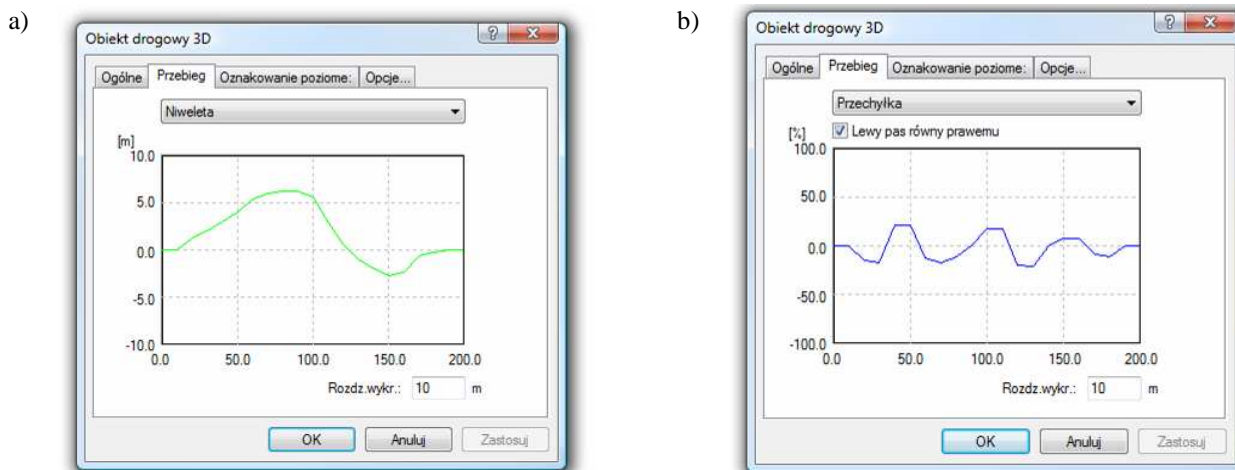
tak, by podobnie jak we wcześniejszym przykładzie, samochód zatrzymał się w położeniu, od którego uprzednio rozpoczął ruch.

W analizowanym przykładzie odtworzenie toru ruchu, przebytego przez środek masy pojazdu zakończyło się jedynie częściowym sukcesem. Stwierdzono, że do momentu wystąpienia kolizji (a więc mniej więcej do chwili utraty przez koła kontaktu z jezdnią), tor ten odtworzony został z podobną dokładnością, jak we wcześniejszym teście, mimo, iż w porównaniu z nim, zamodelowany kształt jezdni był o wiele bardziej złożony. Od chwili rozpoczęcia fazy lotu przez pojazd, odtworzony tor jazdy samochodu nie odpowiadał jego kształtowi zadanemu w symulacji komputerowej. Ponadto – jak wynika z rys. 13, samochód nie uzyskał również właściwego położenia końcowego, które podobnie jak we wcześniejszym teście, powinno pokrywać się z położeniem początkowym symulacji.

Mimo częściowego niepowodzenia uznano, że opracowany algorytm nadaje się do odtwarzania toru jazdy pojazdu, ale tylko pod warunkiem, że jego ruch odbywał się od początku do końca na kołach.

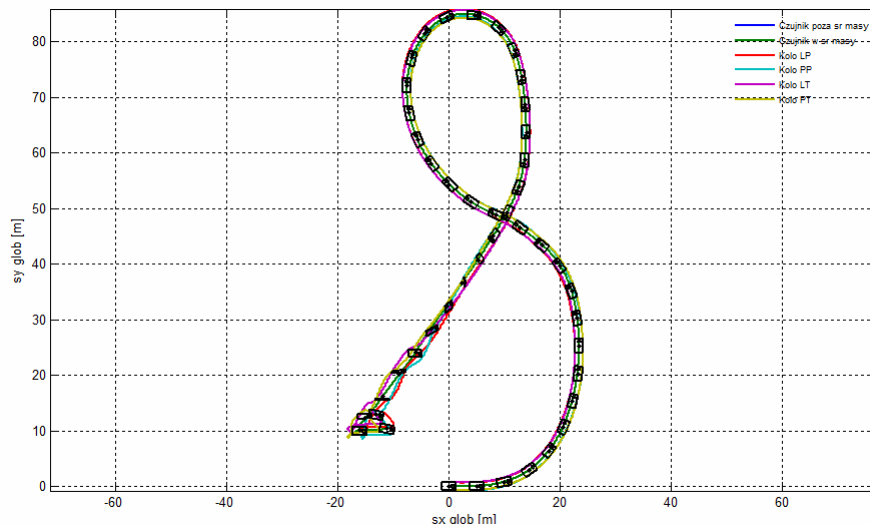
6. Badania eksperymentalne

Kolejny etap weryfikacji opracowanego algorytmu przeprowadzono, bazując na wynikach pomiarów przyspieszeń i prędkości kątowych, uzyskanych podczas rzeczywistego eksperymentu. Polegał on na dynamicznym przejechaniu samochodem osobowym odcinka asfaltowej drogi o znanym kształcie, ustalonym na podstawie analizy map internetowych. Podobnie, jak w przypadku badań symulacyjnych, ruch samochodu realizowany był po torze zamkniętym (to samo położenie początkowe i końcowe środka masy samochodu) od tzw. startu zatrzymanego do zatrzymania pojazdu. Parametry ruchu samochodu były rejestrowane za pomocą zestawu czujników przyspieszeń z piezozęroskopami, ADIS 16385BMLZ firmy ANALOG DEVICES, którego sposób rejestracji danych odpowiadał wypadkowemu rejestratorowi danych typu „samolotowego”. Częstotliwość wykonanych pomiarów wynosiła około 272 Hz. Podczas przeprowadzonej próby samochód był intensywnie rozpędzany, następnie dwukrotnie realizowany był manewr skrętu w lewo (z jednoczesnym hamowaniem do momentu przejechania mniej więcej połowy łuku i następującym po nim przyspieszaniem) i intensywne hamowanie. Kształt toru pomiarowego zaznaczono na rys. 14 niebieską linią. Położenie początkowe i końcowe samochodu podczas przeprowadzonej próby wyznacza położenie na rys. 14 grota niebieskiej strzałki, natomiast kształt tego grota wskazuje na kierunek jazdy samochodu.



Rys. 12. Charakterystyki ukształtowania przestrzennego jezdni, pokazanej na rys. 11

Fig. 12. Characteristics of spatial shape of the road, showed in the Fig. 11



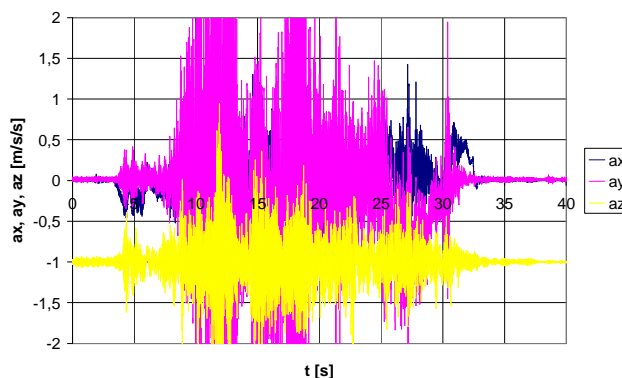
Rys. 13. Tor ruchu samochodu, odtworzony w programie OCTAVE na podstawie wskazań wirtualnych czujników przyspieszeń
 Fig. 13. The vehicle track movement, reconstructed in the OCTAVE software on the basis of readings of virtual acceleration sensors

Samochodem użytym do badań był FORD ESCORT kombi, na którego dachu, wewnątrz wodoodpornej obudowy, za pomocą przysawek zamontowano zestaw czujników pomiarowych.

Uzyskane wartości przyspieszenia i prędkości kątowej przedstawiono w postaci charakterystyk w funkcji czasu na rys. 16 i 17.

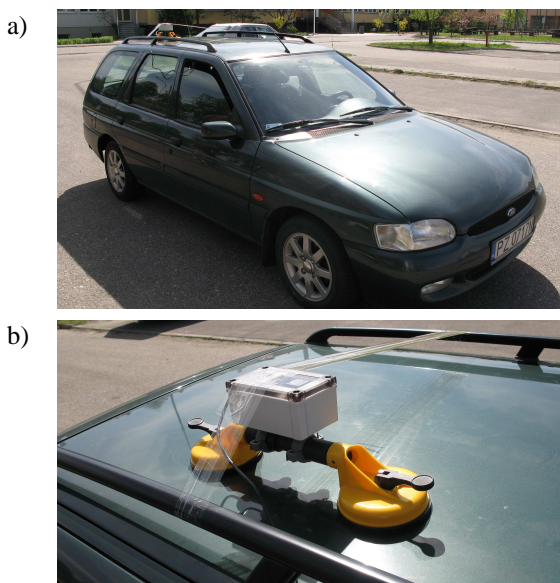


Rys. 14. Przybliżony kształt toru pomiarowego o długości pętli około 255 m (źródło fotografii: www.maps.google.pl)
 Fig. 14. The approximate shape of the track loop with a measured length of about 255 m (source of photograph: www.maps.google.pl)

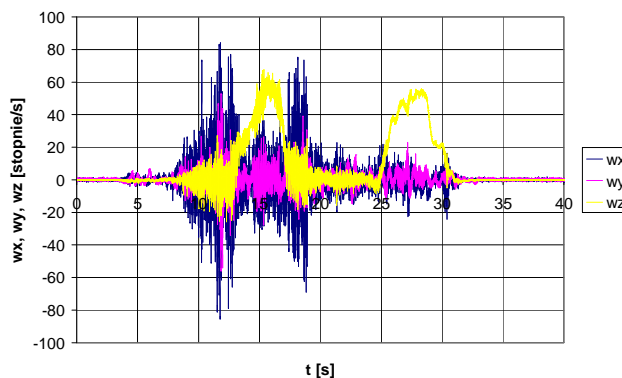


Rys. 16. Charakterystyka przyspieszenia w funkcji czasu dla przeprowadzonych badań eksperymentalnych; pomiar wykonany poza środkiem masy

Fig. 16. Characteristics of acceleration in the function of time for the carried out experimental researches, the measurement was made outside of the mass center of a car



Rys. 15. Samochód FORD ESCORT, wykorzystany do badań eksperymentalnych oraz zestaw czujników pomiarowych ADIS 16385BMLZ firmy ANALOG DEVICES, zamknięty w obudowie
 Fig. 15. FORD ESCORT car, used for experimental research and the set of sensors ADIS 16385BMLZ, produced by Analog Devices, closed in a case



Rys. 17. Charakterystyka prędkości kątowej w funkcji czasu dla przeprowadzonych badań eksperymentalnych
 Fig. 17. Characteristics of angular velocities in the function of time for the carried out experimental researches

Otrzymane dane pomiarowe były silnie „zaszumione”, co jest cechą charakterystyczną dla wszystkich układów służących do elektrycznych pomiarów przyspieszenia i prędkości kątowej, rejestrowanych z dużą częstotliwością. Analiza uzyskanych danych wymagała przeprowadzenia ich wstępnej obróbki, od której silnie zależał finalny efekt przeprowadzanych transformacji w postaci odtworzenia drogi, przejechanej przez pojazd.

W pierwszej kolejności wyznaczono średnie wartości prędkości kątowych ω_x (przechylenia), ω_y (pochylenia) oraz ω_z (odchylenia) w przedziale czasu, w którym pojazd stał nieruchomo (ale z włączonym silnikiem), a więc w czasie nieco powyżej 3 s od momentu rozpoczęcia rejestracji przez zestaw czujników (patrz: rys. 16 i 17). Otrzymano w ten sposób wartości offsetu prędkości kątowych, które wynosiły odpowiednio: $\omega_{xOFF} = -0,05$ [stopnie·s⁻¹], $\omega_{yOFF} = +0,12$ [stopnie·s⁻¹], $\omega_{zOFF} = -0,17$ [stopnie·s⁻¹]. Obliczone wartości offsetu odjęto od wszystkich zmierzonych prędkości kątowych, dzięki czemu po wykonaniu operacji całkowania uzyskanych danych pomiarowych, kąty orientacji czujnika w stanie spoczynku pojazdu dla wszystkich trzech osi czujnika wyniosły 0 stopni.

Następnym elementem analizy zarejestrowanych danych pomiarowych było wyznaczenie wartości offsetów przyspieszeń, a następnie odjęcie ich od wszystkich zmierzonych przyspieszeń – podobnie, jak uczyniono to w przypadku prędkości kątowych. Należy przy tym podkreślić, że w przeciwieństwie do odjęcia offsetu od zarejestrowanych prędkości kątowych, działanie to w przypadku przyspieszeń z założenia było obarczone błędem o charakterze systematycznym. Brak stabilizacji położenia czujnika na pojeździe, np. z wykorzystaniem mechanicznego żyroskopu sprawiał, że pionowa oś czujnika w zasadzie nigdy nie pokrywała się w kierunku wektora przyspieszenia ziemskiego, mimo że do zamocowania czujnika do nadwozia pojazdu użyto poziomicy. Oznaczało to, że zmierzona w stanie spoczynku pojazdu średnia wartość bezwzględna przyspieszeń pionowych (a_z) zmierzonych w stanie spoczynku pojazdu badawczego była nieco mniejsza od wartości przyspieszenia ziemskiego. Niewielkie pochylenie i przechylenie czujnika, które nie było możliwe do wyeliminowania na etapie montażu czujników spowodowało, że część wartości składowej wektora przyspieszenia ziemskiego została zarejestrowana jako składowe wektora przyspieszenia w kierunku podłużnym i poprzecznym pojazdu, które z założenia w przypadku nieruchomego pojazdu powinny wynosić zero. Proste usunięcie offsetu ze zmierzonych trzech składowych wektora przyspieszenia i kontynuowanie dalszych obliczeń oznaczało zatem akceptację opisanego wyżej błędu systematycznego, mającego konsekwencję w postaci istotnego błędu wyznaczenia prędkości liniowych i przebytej drogi dla każdej z trzech osi w przestrzeni – zwłaszcza, że uzyskiwane one były przez operację całkowania (rys. 18).

Powyższy błąd systematyczny wyeliminowano, wykonując numeryczne poziomowanie układu z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych. Poszukiwanymi (optymalizowanymi) wielkościami były trzy kąty początkowej orientacji przestrzennej układu współrzędnych czujnika (ϕ_{poz} , θ_{poz} , ψ_{poz}) oraz jednocześnie wartości offsetu dla dwóch osi: a_{xOFF} oraz a_{yOFF} . Wartość offsetu dla osi pionowej a_{zOFF} nie była optymalizowana, lecz obliczana po uzyskaniu kompletu pięciu pozostałych wymienionych wielkości w taki sposób, żeby suma geometryczna przyspieszeń w stanie spoczynku samochodu wynosiła dokładnie $1\text{ g} = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Wszystkie wymienione wielkości, będące przedmiotem optymalizacji uzyskiwano metodą Monte Carlo, natomiast jako funkcje celu przyjęto dwa niezależne kryteria:

- prędkości końcowej pojazdu, która nie mogła przekraczać $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,
- odległości usytuowania środka masy pojazdu po zakończeniu próby od jego położenia początkowego, która nie mogła przekraczać 10 m .

Kolejny (inny) sposób obróbki danych był analogiczny do opisanego powyżej, z tym, że procedurę optymalizacyjną realizowano dopiero po uprzednim przeprowadzeniu kalibracji wskazań przyspieszoniomierzy. W czasie badań czujników wykonanych w statycznych warunkach laboratoryjnych zauważono, że suma geometryczna mierzonych składowych XYZ wartości przyspieszeń nie zawsze daje rzeczywistą wartość przyspieszenia (tj. wartość $1\text{ g} = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). W zależności od sposobu ustawienia czujnika, po wyznaczeniu średniej wartości przyspieszenia według wzoru (1), w ustalonych stanach spoczynku obserwowano pewne odchylenia od wartości przyspieszenia ziemskiego, co przedstawiono w tab. 2.

$$a = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2} \quad (1)$$

Tab. 2. Zmierzone i wyznaczone wartości przyspieszeń w warunkach statycznych

Table 2. Measured and calculated values of acceleration in static conditions

Orientacja wektora przyspieszenia	Średnie wartości zmierzonych składowych przestrzennych przyspieszeń w poszczególnych położeniach statycznych czujnika			Suma geometryczna przyspieszeń
	ax_{sr}	ay_{sr}	az_{sr}	
X skier. w dół	1,003	0,018	0,009	1,003
X skier. do góry	-1,000	-0,017	0,005	1,000
Y skier. w dół	-0,005	0,999	0,009	0,999
Y skier. do góry	0,007	-1,004	-0,003	1,004
Z skier. w dół	-0,004	-0,005	1,003	1,003
Z skier. do góry	0,003	0,008	-1,000	1,000

Rozwiązując omówiony wyżej problem postawiono tezę, że minimalizacja błędów wyników pomiarów przyspieszeń możliwa jest przez korekcję wskazań dla każdej z osi przez jednoczesne przesunięcie charakterystyk (offset) oraz o wprowadzenie wartości wzmocnienia sygnału. Stosownie do tego założenia skonstruowano równanie (2), wynikające ze wzoru (1), w którym na wartość sumy geometrycznej składowych wektora przyspieszeń wpływa dodatkowo wartość sześciu stałych współczynników. Odpowiedni dobór tych współczynników pozwala na uzyskiwanie oczekiwanego wyniku równania. W przypadku pomiarów składowych wektora przyspieszenia w układzie nieruchomym, wyliczona wartość pierwiastka (2), niezależnie od sposobu ustawienia głowicy pomiarowej powinna dać wartość 1 g . Wartości współczynników od A do F powinny być zatem dobrane w taki sposób, aby wprowadzenie do równania zmierzonych, średnich wartości składowych XYZ wektora przyspieszenia dało taką właśnie wartość.

$$q_{n=1:6} = \sqrt{(B \cdot (A + ax_{n=1:6}))^2 + (D \cdot (C + ay_{n=1:6}))^2 + (F \cdot (E + az_{n=1:6}))^2} \quad (2)$$

gdzie:

ax , ay , az – średnie wartości mierzonych składowych XYZ

wektora przyspieszenia, wyznaczone w stanie spoczynku czujnika,

A, C, E – wartości offsetu, czyli przesunięcia charakterystyk względem osi rzędnych,

B, D, F – wzmacnienie przyspieszeń powiększonych uprzednio o wartość offsetu,

n – liczba stanów statycznych, w jakich wyznaczano wartości składowe wektora przyspieszenia ziemskiego w przestrzeni, odpowiadająca liczbie poszukiwanych parametrów A, B, C, D, E, F.

Biorąc pod uwagę, że liczba niewiadomych w równaniu (2) wynosi sześć, to w tylu właśnie stanach należało najpierw wyznaczyć średnie wartości składowych wektora przyspieszenia, a następnie zbudować odpowiednio układ sześciu równań. Ponieważ czujnik zabudowany jest wewnątrz obudowy o kształcie sześcianu, do analizy przyjmowano wartości składowych XYZ wektora przyspieszenia, wyznaczone eksperymentalnie podczas położenia czujnika na stole, kolejno na każdej ze ścianek tej obudowy. Układu sześciu równań nie rozwiązywano analitycznie, lecz numerycznie, stosując metodę Monte Carlo, z wykorzystaniem oprogramowania OCTAVE. Kryterium zakończenia poszukiwania stałych A-F było uzyskanie dla wszystkich sześciu równań rozwiązania, w postaci sumy geometrycznej przyspieszenia o wartości 1,000 g. Dla danych zawartych w tab. 1, obliczono komplet współczynników A-F o wartościach przedstawionych w tab. 3.

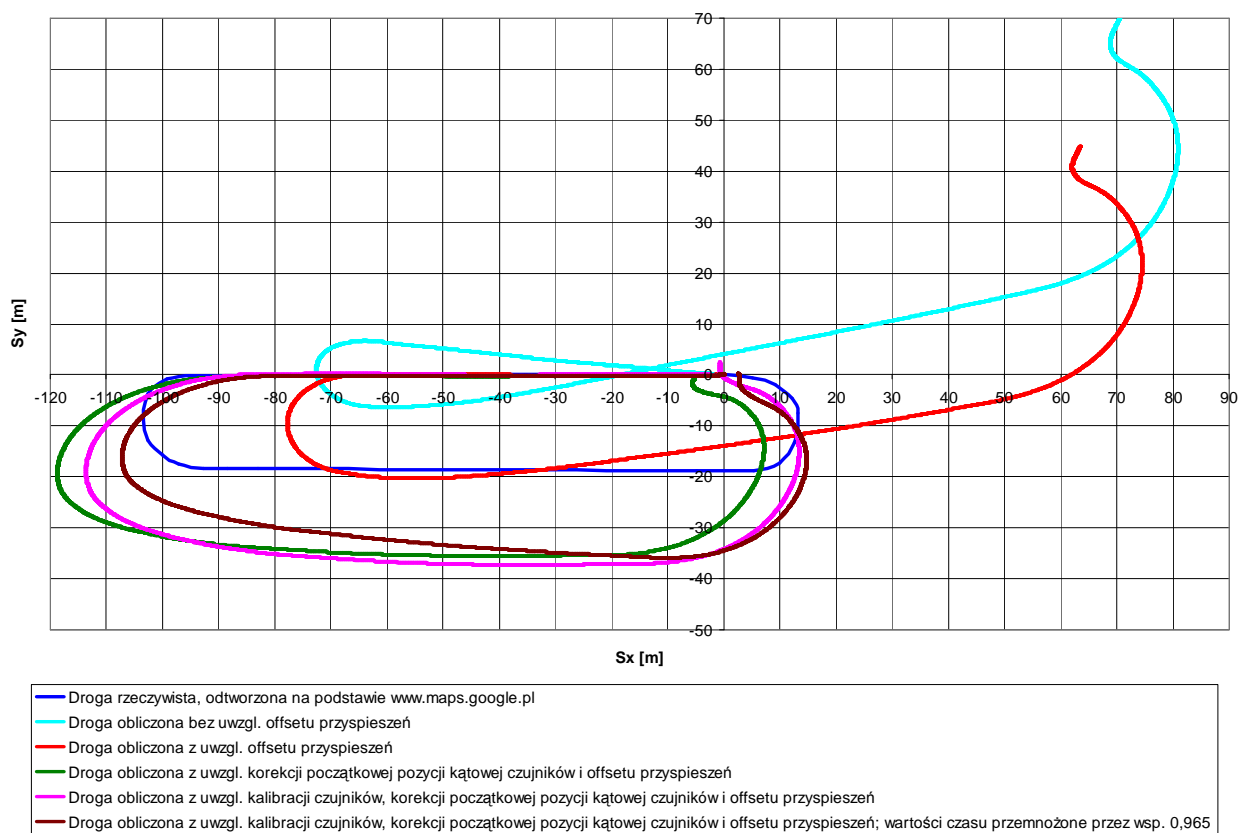
Tab. 3. Obliczone współczynniki offsetu i wzmacnienia dla zmierzonych wartości przyspieszeń

Fig. 3. The calculated offset and gain coefficients for the measured values of acceleration

A	-0,00177
B	0,998452
C	0,002408
D	0,998552
E	-0,00162
F	0,998521

Szczegółowa analiza opisanego wyżej zagadnienia przeprowadzona została w pracy [3].

Zastosowanie kolejnych, opisanych wyżej metod analizy przyspieszeń, zmierzonych z wykorzystaniem czujników, wpłynęło korzystnie na stopień podobieństwa toru ruchu środka masy pojazdu, do rzeczywistego toru, pokazanego na rysunku 14, jednak każdy z nich miał postać pętli o zdecydowanie zbyt dużych rozmiarach w stosunku do wzorca (rys. 18). Dlatego podjęto kolejną próbę korekcy uzyskanych danych pomiarowych, przyjmując hipotetyczne założenie, że przyczyną otrzymywania zbyt długich pętli odpowiadających torowi ruchu środka masy samochodu może być błędnie zarejestrowany czas. Korekcja czasu polegała na przemożeniu jego wszystkich wartości zarejestrowanych przez czujniki przez stały współczynnik 0,965, co po wykonaniu dwukrotnego całkowania przyspieszeń (po uprzednim przeprowadzeniu procedury kalibracyjnej i optymalizacji położenia początkowego układu współrzędnych czujników wraz z wprowadzeniem offsetów), powinno skutkować zmniejszeniem rozmiarów pętli.



Rys. 18. Tory ruchu środka masy pojazdu zrzutowane na poziomą płaszczyznę jezdni, uzyskane z wykorzystaniem wszystkich wykorzystanych metod oraz tor ruchu pojazdu odtworzony na podstawie analizy mapy internetowej

Fig. 18. Trajectories of the vehicle mass center movement, projected on the horizontal plane of the roadway, presented results were obtained with usage of all the methods; the real path of the vehicle movement based on analysis of internet site map

Jak wynika z rys. 18, po zastosowaniu korekcji czasów toru ruchu środka masy pojazdu faktycznie uległ skróceniu, lecz jednocześnie został także zdeformowany. Wynika to z faktu, że kąty obrotu nadwozia pojazdu obliczane są przez wykonanie operacji całkowania zarejestrowanych prędkości kątowych, do czego stosuje się te same czasy, co w przypadku całkowania przyspieszeń. „Sztuczne” skrócenie czasu spowodowało zatem nie tylko zmniejszenie obliczanych wartości prędkości liniowej i drogi przebytej przez pojazd, lecz także automatyczne zmniejszenie wartości obliczanych kątów, które dla czasów bez korekcji wyliczane były w sposób prawidłowy.

Charakterystyki drogi poprzecznej w funkcji drogi podłużnej (tory ruchu środka masy pojazdu rzutowane na poziomą płaszczyznę jezdni), uzyskane z wykorzystaniem wszystkich opisanych wyżej metod oraz charakterystykę rzeczywistą (toru ruchu pojazdu odtworzony na podstawie analizy mapy internetowej), zestawiono na rys. 18. Wynika z niego, iż żadna z użytych metod wstępnej obróbki danych pomiarowych nie pozwoliła na odtworzenie rzeczywistej drogi przebytej przez samochód podczas przeprowadzonych badań eksperymentalnych, na podstawie wskazań czujników zamontowanych na nadwoziu pojazdu. Otrzymane rezultaty obarczone są błędem, którego źródło będzie przedmiotem poszukiwań w czasie dalszych badań.

7. Wnioski

- Opracowany algorytm obliczeniowy pozwala na precyzyjne wyznaczenie wszystkich parametrów ruchu, związanych z dynamiką symulowanego komputerowo ruchu pojazdu na kołach.
- Algorytm orientacji przestrzennej, zastosowany do analizy wyników symulacji komputerowych, może być przydatny do odtwarzania toru ruchu rzeczywistego pojazdu, pod warunkiem przeprowadzenia poziomowania składowych przyspieszenia z czujników metodą optymalizacji wielokryterialnej. Otrzymywane obecnie wyniki obarczone

są błędem, którego źródło będzie przedmiotem poszukiwań w czasie dalszych badań.

- Różnice uzyskane w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych ruchu pojazdu wskazują na potrzebę zachowania dużej ostrożności w ich interpretacji.
- Przedstawiona analiza przyspieszeń i prędkości kątowych powinna być jednym z aspektów projektowania maszyn, zwłaszcza mających zdolność do przemieszczania się na kołach. Wykorzystane w algorytmie obliczeniowym transformacje są elementem modelu obliczeniowego ruchu pojazdu, którego zastosowanie umożliwia konstruktorowi poznanie sił i momentów obciążających konstrukcję w czasie przemieszczania się.

8. Bibliografia

- [1] Hogg G.: UDS – Wypadkowy rejestrator danych. V Sympozjum „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych”, Zakopane, 1996, s. 123-130.
- [2] Kasanický G.: Pamat nehodových dát – UDS 2165. IV Sympozjum „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych”, Kraków, 1994, s. 169-182.
- [3] Kędzióra K., Lewandowski A.: The application of acceleration sensors to the analysis of the plane motion dynamics of a motorcar, rozdział w monografii pod red. Milan Sága, Jan Vávro, Milan Žmidák: "Machine Modeling and Simulations MMS 2011", Terchová, Słowacja, 2011, s. 219-224.
- [4] Guzek M., Lozia Z.: Rekonstrukcja sytuacji przedwypadkowej z wykorzystaniem dwóch typów czarnych skrzynek samochodowych. VIII Konferencja „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych”, Kraków, 2002, s. 257-280.
- [5] Guzek M., Lozia Z.: Possible Errors Occurring During Accident Reconstruction Based on Car "Black Box" Records, SAE Technical Paper Series, 2002-01-0549.
- [6] Guzek M., Lozia Z., Pieniążek W.: Accident Reconstruction Based on EDR Records – Simulation and Experimental Study, SAE Technical Paper Series, 2007-01-0729.
- [7] Reza A., Wach W., Duś A.: Przyczyna wypadku - porównanie symulacji z zapisem urządzenia UDS. VI Konferencja „Problemy rekonstrukcji wypadków drogowych”, Zakopane, 1998, s. 329-338.