

Article citation info:

Surblys V, Ślaski G, Pikosz H. The usage of a laser height sensors for estimating road unevenness profile. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2018; 79(1): 0-0. <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL.79.ART7>

Wykorzystanie czujników laserowych wysokości do estymacji profilu nierówności drogi

VYTENIS SURBLYS¹, GRZEGORZ ŚLASKI², HUBERT PIKOSZ³

Wileński Uniwersytet Techniczny im. Giedymina, Politechnika Poznańska

Streszczenie

W artykule przedstawiono problem określania rzeczywistej wartości wysokości profilu nierówności drogi w czasie rzeczywistym i zaproponowano oraz przetestowano metodę rozwiązania tego problemu. Problem wynika z faktu, że zaproponowany pomiar odległości pomiędzy laserowym czujnikiem wysokości a drogą jest wykonywany czujnikiem zamontowanym do nadwozia samochodu, które ma swoją własną dynamikę. Zaproponowaną metodę kompensacji sygnału lasera dla ruchów nadwozia – przechyłu wzdłużnego i drgań pionowych – przetestowano z wykorzystaniem badań symulacyjnych i eksperymentalnych. W badaniach symulacyjnych wykorzystano model płaski połowy samochodu zaimplementowany w Simulinku i Matlabie, w badaniach eksperymentalnych wykorzystano samochód osobowy Opel Astra wraz z algorytmem kompensacji zaimplementowanym w systemie prototypowania elektronicznych jednostek sterujących firmy dSpace. Testy symulacyjne dowiodły, że idea kompensacji jest poprawna i pozwala na pełną kompensację ruchów nadwozia w sygnale z czujnika lasera. Badania eksperymentalne wykazały, że metoda prosta do implementacji i w pełni efektywna w środowisku symulacyjnym jest znacznie bardziej skomplikowana w rzeczywistym pojeździe. Wynika to z tego, że informacja o ruchach nadwozia nie jest dokładna tak jak w symulacji i konieczne jest zastosowanie w procedurze pracującej z sygnałami symulowanymi dodatkowej specjalnej obróbki sygnałów z czujników. Sygnały

¹ Wileński Uniwersytet Techniczny im. Giedymina, Wydział Inżynierii Transportu, Zakład Transportu Samochodowego, e-mail vytenis.surblys@vgtu.lt, tel. +370 692 25720

² Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, e-mail Grzegorz.Slaski@put.poznan.pl, tel. +48 61 6652 222

³ Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, e-mail Hubert.Pikosz@put.poznan.pl, tel. +48 61 6652 709

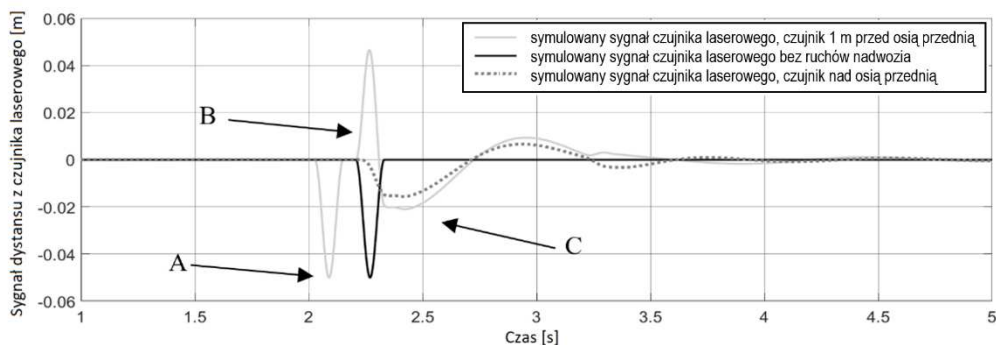
przyspieszenia muszą być całkowane ale musi być też wykonana specjalna filtracja pasmowo-przepustowa. Po wykonaniu tych dodatkowych kroków można uzyskać dobre rezultaty także z rzeczywistym samochodem i sygnałami z rzeczywistych czujników.

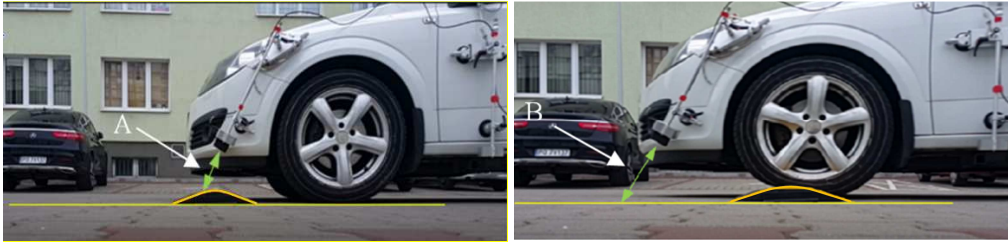
Słowa kluczowe: zawieszenia sterowane, pomiar nierówności drogi, laserowe czujniki wysokości

1. Wstęp

Wiedza o rodzaju nawierzchni drogi, w sensie rodzaju nierówności, jest bardzo użyteczna dla kierowcy. Pozwala ona kierowcy przewidywać poziom odpowiedzi dynamiki pionowej samochodu biorąc pod uwagę rodzaj nierówności drogi oraz wzdłużną prędkość samochodu. Jednak kierowca używa tej wiedzy w inny sposób niż może być ona użyta w systemach sterowania. Kierowca tylko oszacowuje poziom wysokości nierówności i reaguje na podstawie szerokiego doświadczenia o związkach pomiędzy typem nawierzchni i wartością prędkości a wynikającymi z nich poziomami odpowiedzi dynamiki pionowej samochodu. Systemy sterowania ze względu na swoje ograniczenia muszą obliczać spodziewaną odpowiedź dynamiki pionowej używając modelu struktury dynamicznej pojazdu i ilościowych informacji o profilu nierówności drogi.

Jedną z metod pomiaru wysokości nierówności drogi może być wykorzystanie laserowych czujników wysokości, pozwalających na pomiar względnej odległości pomiędzy powierzchnią drogi a czujnikiem zamontowanym do nadwozia samochodu. Problemem tego pomiaru jest jednak dynamika pionowa oraz dynamika przechyłów nadwozia, która wpływa na wynik pomiaru. Dlatego też największym problemem jest kompensacja przemieszczeń nadwozia w sygnale czujnika. Na rys. 1 przedstawiono symulowane sygnały czujnika zamontowanego na nadwoziu samochodu podczas przejazdu z niewielką stałą prędkością (10 km/h) przez nierówność o wysokości 5 cm, ograniczającą prędkość pojazdów (próg zwalniający).





Rys.1. Symulowany sygnał laserowego czujnika wysokości - przejazd progu zwalniającego z prędkością 10 km/h

Zaprezentowano wyniki dla trzech przypadków:

- dla przypadku czujnika laserowego poruszającego się wzdłuż poziomej linii (bez jakichkolwiek ruchów nadwozia) - przypadek idealnego skanowania profilu nierówności drogi,
- dla przypadku czujnika laserowego zamontowanego do nadwozia z przodu samochodu, 1 m przed osią przednią,
- dla przypadku czujnika laserowego zamontowanego do nadwozia samochodu dokładnie ponad osią przednią.

Ponieważ sygnał z laserowego czujnika wysokości odzwierciedla odległość pomiędzy nawierzchnią drogi a samym czujnikiem (h_0) w pierwszym przypadku otrzymujemy sygnał który po skompensowaniu o wysokość h_0 ma ujemne wartości gdy czujnik przemieszcza się nad progiem zwalniającym. Otrzymany sygnał jest lustrzanym odbiciem profilu wysokości drogi. Dolna część rys. 1.1. służy wyjaśnieniu otrzymywanych wartości sygnału.

Część A sygnału powstająca w czasie pomiaru czujnikiem zamontowanym 1 m przed osią przednią - przypadek b) symulacji - odpowiada sygnałowi przypadku a), jest tylko przesunięta w czasie co wynika z założenia, że czujnik ten pojawi się wcześniej nad nierównością. Tak się dzieje do czasu najechania koła na nierówność (próg zwalniający). Część B sygnału czujnika wynika z ruchu nadwozia względem nawierzchni drogi po najechaniu koła na nierówność. Gdy prędkość jest bardzo mała wtedy przemieszczenie nadwozia bezpośrednio nad kołem jest niemal równe wysokości nierówności. Odległość pomiędzy czujnikiem a nawierzchnią drogi 1 m przed osią przednią zwiększy się ponieważ wraz z kołem unosi się nadwozie – sygnał tej odległości skompensowany o wysokość h_0 osiągnie dodatnie wartości. Gdy prędkość jest większa – wtedy ugięcie opony oraz zawieszenia wpływają na wartość (tym samym także kształt) uzyskiwanego sygnału. Część C sygnału czujnika laserowego wynika z dodatkowych ruchów nadwozia po przejechaniu nierówności – zmiany wartości sygnału powstają pomimo faktu, że czujnik przejeżdża ponad płaską powierzchnią drogi. W przypadku dodatkowo występującej dynamiki wzdłużnej (przyspieszenia lub hamowania pojazdu) kąt przechyłu wzdłużnego będzie rósł i sygnał czujnika laserowego będzie się różnił bardziej znacząco od rzeczywistego profilu wysokości nierówności drogi.

2. Przegląd literatury

W literaturze wykorzystanie szacowania wysokości profilu drogi przed pojazdem do sterowania zawieszeniem występuje w obszarze wiedzy związanej ze sterowaniem przewidującym (ang. Preview Control [4,6]). Niektórzy z badaczy używali już czujników laserowych do estymacji wysokości nierówności drogi. Göhrle i inni [5] wykorzystywali czujnik umieszczony na przedniej szybie samochodu do pomiaru odległości pomiędzy nadwoziem samochodu a drogą i wykorzystywali do zmiany nastaw amortyzatorów o zmiennym tłumieniu. W tym artykule badacze mieli do czynienia z tym samym problemem kompensacji dynamiki nadwozia w sygnale czujnika laserowego oraz dodatkowo filtracji sygnału z tego czujnika.

W innej publikacji [2] autorzy opisali wykorzystanie czujnika laserowego zamocowanego na osłonie chłodnicy do generowania trójwymiarowego (3D) opisu nierówności drogi. Autorzy wspomnieli, że uzyskany sygnał mógłby być wykorzystany do sterowania nastawami aktywnego zawieszenia ale także do innych systemów sterowania w pojazdach.

Autorzy artykułu [1] opisali skanowanie profilu wysokości nierówności drogi przed samochodem z wykorzystaniem LIDAR-u (Light Detection And Ranging). Wykorzystując związki trygonometryczne pomiędzy sygnałem czujnika a przemieszczeniami nadwozia obliczali wartości wysokości profilu nierówności drogi. Autorzy wykorzystywali model o 7 stopniach swobody dynamiki pionowej i przechyłów nadwozia samochodu do symulacji oraz stanowisko badawcze zawieszenia ćwiartki samochodu dla testów eksperymentalnych. Uzyskiwali dla sterowania wyniki lepsze niż w przypadku innych znanych metod sterowania zawieszonymi półaktywnymi.

Sugai i inni w pracy [8] opisali próby wykorzystania sterowania „Preview Control” dla zwiększenia komfortu jazdy w samochodzie z elektrycznym aktywnym zawieszeniem. Zaadaptowali oni sterowanie przewidujące w zakresie komfortu do sterowania elektrycznie nastawialnym systemem stabilizatorów i uzyskali poprawę komfortu jazdy oraz przyczepności do drogi w szerokim zakresie częstotliwości wymuszeń. Uzyskali także redukcję zużycia energii przez system.

Autorzy następnego analizowanego artykułu [9] wykorzystali inną nowatorską metodę estymacji wysokości profilu nierówności drogi. Wykorzystali oni analizę Fouriera do obliczania w czasie rzeczywistym (on-line) widma opisującego jakość nawierzchni drogi i przeprowadzania klasyfikacji nierówności wg normy ISO 8608.

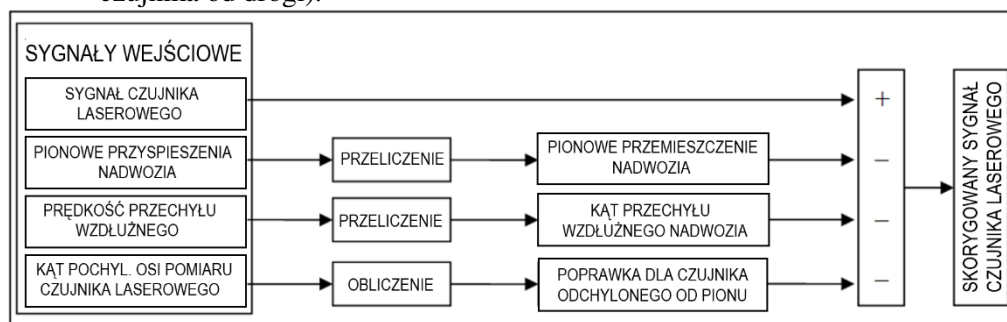
Inna metoda szacowania nierówności drogi zaproponowana została w pracy [3] i była ona oparta na statystycznej analizie odpowiedzi dynamiki nadwozia na wymuszenia kinematyczne. Autorzy wykorzystali przyspieszenia pionowe nadwozia i kół, których statystyczny rozkład po odpowiednich obliczeniach i przypisaniu do pewnych zakresów umożliwił oszacowanie typu nierówności nawierzchni drogi.

3. Idea kompensacji

Podczas ruchu pojazdu następuje kinematyczne wymuszanie pionowych i kątowych drgań nadwozia. Nadwozie przemieszcza się pionowo w górę i dół oraz obraca się wokół trzech osi współrzędnych układu umieszczonego w środku ciężkości nadwozia. Z punktu widzenia potrzeby kompensacji najistotniejszy jest obrót wokół osi poprzecznej nazywany przechylem

wzdłużnym. Dlatego też zaproponowany algorytm kompensacji ma trzy podstawowe części (rys. 2) zaprojektowane w celu usunięcia z sygnału lasera (odzwierciedlającego odległość pomiędzy czujnikiem a drogą) składowych wynikających z:

- przemieszczeń pionowych nadwozia mierzonych w środku ciężkości nadwozia,
- pionowych przemieszczeń nadwozia mierzonych w punkcie montażu czujnika wynikających z przechyłu wzdłużnego i odległości miejsca montażu czujnika od środka ciężkości
- innego niż pionowy montaż czujnika (uwzględnienie zależności trygonometrycznych pomiędzy mierzoną odległością pionową odległością czujnika od drogi).



Rys.1. Algorytm kompensacji składowych dynamiki nadwozia w sygnale laserowego czujnika wysokości

Moduł kompensacji przemieszczeń pionowych środka ciężkości

Ta część algorytmu kompensacyjnego wykorzystuje dane o przyspieszeniach z czujnika przyspieszeń zamontowanego w środku ciężkości nadwozia w celu oszacowania (obliczenia) pionowych przemieszczeń nadwozia. Realizowane jest to z wykorzystaniem całkowania numerycznego z dodatkową filtracją dolno- i górnoprzepustową przed całkowaniem w celu usuwania nadmiernych zakłóceń sygnału oraz dryftu sygnału wynikającego z nie zawsze idealnie pionowego ustawienia osi pomiarowej czujnika.

Moduł kompensacji przechyłów wzdłużnych nadwozia

Ta część algorytmu kompensacyjnego została zaprojektowana do estymacji tej części sygnału czujnika laserowego, która powstaje ze względu na przechył wzdłużny (obrót względem osi poprzecznej) i fakt umieszczenia czujnika w pewnej odległości od osi tego przechyłu (zakłada się, że to jest środek ciężkości). Czujnik mikromechaniczny generuje sygnał proporcjonalny do prędkości, w związku z czym, tylko jednokrotne całkowanie sygnału czujnika jest niezbędne do oszacowania kąta przechyłu wzdłużnego. Przemieszczenie w punkcie montażu czujnika może być obliczone z zależności:

$$\Delta z_{\varphi} = l_{laser} \tan \varphi \quad (1)$$

gdzie:

Δz_φ – pionowe (z) przemieszczenie nadwozia w punkcie montażu czujnika,

l_{laser} – odległość od środka ciężkości do punktu montażu czujnika,

φ – kąt przechyłu wzdłużnego nadwozia.

Ostatni moduł algorytmu kompensacyjnego jest wykorzystywany w sytuacji, w której oś pomiaru wysokości czujnika tworzy z powierzchnią drogi kąt inny niż 90^0 . Dla celów kompensacji w takiej sytuacji użyteczna będzie tylko składowa sygnału czujnika. Obliczyć ją można z zależności:

$$z_{lc} = z_l \cos \alpha \quad (2)$$

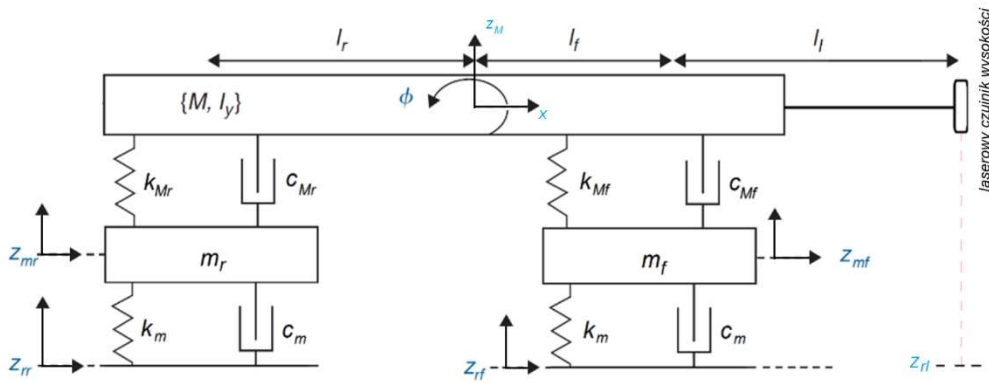
gdzie: z_{lc} – skorygowany sygnał laserowego czujnika wysokości; z_l – “surowy” sygnał laserowego czujnika wysokości, α – kąt pomiędzy osią pomiaru laserowego czujnika wysokości a osią pionową.

4. Badania symulacyjne algorytmu kompensacji

Celem badań symulacyjnych zaproponowanego algorytmu kompensacji było przetestowanie idei kompensacji z użyciem sztucznych ale idealnych sygnałów oraz idealnie płaskiej nawierzchni drogi z jednym wymuszeniem w postaci progu zwalniającego.

Do symulowanego sygnału czujnika wysokości nie dodawano żadnych zakłóceń - jedynymi „zakłóceniami” dla oczekiwanej informacji o wysokości profilu drogi są przemieszczenia nadwozia.

Badania symulacyjne wykonano z wykorzystaniem modelu połowy samochodu zorientowanym na modelowanie przechyłów wzdłużnych oraz przemieszczeń pionowych [7] – rys. 3. Jego parametry zdefiniowano w tabeli 1. Symulowany czujnik wysokości był zamodelowany jako zamocowany do nadwoziu samochodu (masy resorowanej) 1 metr przed osią przednią samochodu (rys. 3). Oś pomiaru czujnika wysokości była prostopadła do nawierzchni drogi.



Rys. 1. Płaski model dynamiki samochodu do symulacji przechyłów wzdłużnych i przemieszczeń pionowych

Wykorzystywany model płaski połowy samochodu (Rys. 3) modeluje dynamikę trzech mas : M – masy nadwozia (masy resorowanej), m_f i m_r – mas kół i elementów z nimi powiązanych (mas nieresorowanych). Model ten posiada 4 stopnie swobody: ruch pionowy masy nadwozia z_M , przechył poprzeczny masy nadwozia względem osi poprzecznej ϕ , przemieszczeń pionowych mas nieresorowanych z_{mr} i z_{mf} .

Wymuszenia od nierówności drogi oznaczono z_{rr} i z_{rf} . Równania ruchu tego modelu opisane są przez następujące równania:

$$\begin{cases} M\ddot{z}_M = -k_{Mf}(z_{Mf} - z_{mf}) - k_{Mr}(z_{Mr} - z_{mr}) - c_{Mf}(\dot{z}_{Mf} - \dot{z}_{mf}) - c_{Mr}(\dot{z}_{Mr} - \dot{z}_{mr}) \\ I_y\ddot{\phi} = -l_f(k_{Mf}(z_{Mf} - z_{mf}) - c_{Mf}(\dot{z}_{Mf} - \dot{z}_{mf})) + l_r(k_{Mr}(z_{Mr} - z_{mr}) + c_{Mr}(\dot{z}_{Mr} - \dot{z}_{mr})) \\ m_f\ddot{z}_{mf} = k_{Mf}(z_{Mf} - z_{mf}) - k_m(z_{mf} - z_{rf}) + c_{Mf}(\dot{z}_{Mf} - \dot{z}_{mf}) - c_m(\dot{z}_{mf} - \dot{z}_{rf}) \\ m_r\ddot{z}_{mr} = k_{Mr}(z_{Mr} - z_{mr}) - k_m(z_{mr} - z_{rr}) + c_{Mr}(\dot{z}_{Mr} - \dot{z}_{mr}) - c_m(\dot{z}_{mr} - \dot{z}_{rr}) \end{cases} \quad (3)$$

Tab. 4.1. Parametry modelu pojazdu wykorzystywanego w badaniach symulacyjnych

Parametr	Wartość
Masa połowy nadwozia	$M = 765$ kg;
Przednia masa nieresorowana	$m_f = 45$ kg;
Tylna masa nieresorowana	$m_r = 35$ kg;
Sztywność przedniego zawieszenia	$k_{Mf} = 22000$ N/m;
Sztywność tylnego zawieszenia	$k_{Mr} = 18000$ N/m;

Tłumienie przedniego zawieszenia	$c_{Mf} = 2000 \text{ N}\cdot\text{s/m};$
Tłumienie tylnego zawieszenia	$c_{Mr} = 1600 \text{ N}\cdot\text{s/m};$
Sztywność opony	$k_m = 182000 \text{ N/m};$
Tłumienie	$c_m = 200 \text{ N}\cdot\text{s/m};$
Rozstaw osi	$w_b = 2.703 \text{ m};$
Odległość od przedniej osi do środka ciężkości	$l_f = 1.021 \text{ m};$
Odległość od przedniej osi do czujnika	$l_l = 1 \text{ m};$
Moment bezwładności względem osi y	$I_y = 900 \text{ kg}\cdot\text{m}^2;$

gdzie:

$$\begin{cases} z_{Mf} = z_M + l_f \sin \phi - z_{mf} \\ z_{Mr} = z_M - l_r \sin \phi - z_{mr} \\ \dot{z}_{Mf} = \dot{z}_M + l_f \sin \dot{\phi} - \dot{z}_{mf} \\ \dot{z}_{Mr} = \dot{z}_M - l_r \sin \dot{\phi} - \dot{z}_{mr} \end{cases} \quad (4)$$

Symulacje przeprowadzono po implementacji tych równań do systemu Matlab/Simulink. Model wymuszano przez symulację przejazdu przez próg zwalniający (rys. 4). Kształt progu zwalniającego dla potrzeb symulacji opisano równaniem 5:

$$z_r(x_L) = \frac{H}{2} \cdot \left(1 - \cos \left(2\pi \cdot \frac{x_L}{L} \right) \right) \quad (5)$$

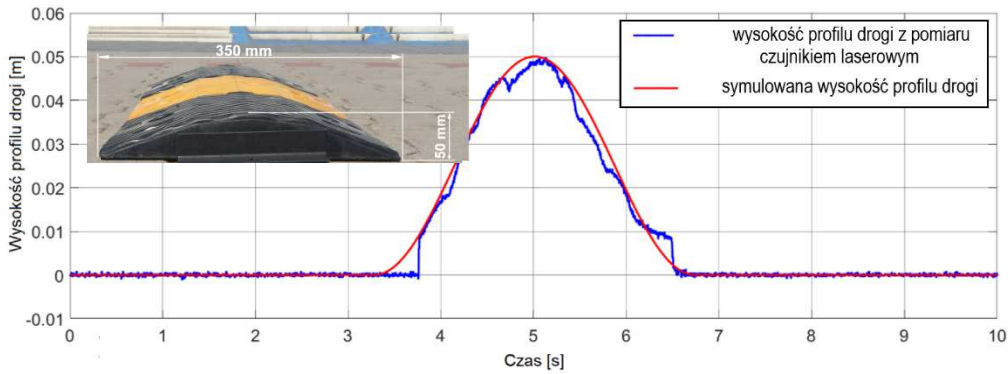
gdzie:

H – wysokość progu zwalniającego (50 mm),

L – długość progu zwalniającego (350 mm),

x_L – wymiar wzdłużny drogi wykorzystany do opisu kształtu nierówności, mieści się w przedziale od 0 do L

Parametry geometryczne progu zwalniającego wykorzystanego w modelu odpowiadają przeszkodzie wykorzystywanej w badaniach eksperymentalnych. Zmiany wysokości profilu w czasie – wymuszenie kinematyczne - $z_r(t)$ interpolowano obliczając najpierw przebyty dystans x a następnie dla chwilowego dystansu interpolując aktualną wysokość profilu $z_r(x_L)$. Czas trwania wymuszenia kinematycznego związanego z przejazdem progu zwalniającego zależy od prędkości przejazdu. Jeśli prędkość jest większa to czas trwania wymuszania jest krótszy, następstwem czego jest również szybsza zmiana wysokości \dot{z}_r , a tym samym także większe pionowe przyspieszenia działające na koło.

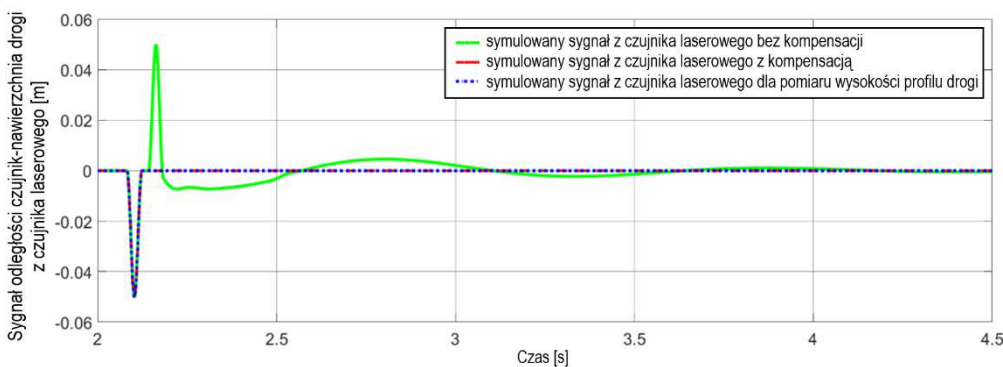


Rys.4. Kształt sygnału wymuszenia kinematycznego wykorzystanego w badaniach symulacyjnych w zestawieniu z wynikiem pomiaru profilu przeszkody czujnikiem laserowym dla prędkości przesuwu czujnika ok. 0,12 m/s

Wartość sygnału wysokości czujnika była obliczona z wykorzystaniem zależności 6:

$$z_l = z_M + (l_f + l_l) \sin \varphi - z_{rl} \quad (6)$$

gdzie z_M jest przemieszczeniem środka ciężkości, odległości l_f i l_l odległościami opisanymi w tab. 1 i na rys. 3, z_{rl} jest wysokością nierówności drogi w punkcie pomiaru czujnikiem laserowym. Wyniki badań symulacyjnych są przedstawione na rys. 5. Symulację przeprowadzono dla przejazdu ze stałą prędkością 30 km/h.



Rys.5. Sygnały laserowego czujnika wysokości uzyskane dla przejazdu przez próg zwalniający z prędkością 30 km/h z zastosowaniem algorytmu kompensacji i bez jego użycia

W pierwszej części przebiegu czujnik laserowy odzwierciedla przejazd nad progiem – wtedy koła znajdują się jeszcze przed progiem. Następnie koła przejeżdżają po progu i w wyniku tego

wymuszenia pojawiają się drgania mas resorowanej i nieresorowanej. Po zastosowaniu do uzyskanego w wyniku symulacji sygnału wysokości opracowanego algorytmu kompensacji otrzymano skorygowany sygnał identyczny z pomiarem profilu wysokości nierówności wykonanym czujnikiem laserowym. Jest to dowodem na to, że algorytm kompensacji działa prawidłowo i składowe sygnału laserowego czujnika wysokości pochodzące od przemieszczeń pionowych środka ciężkości oraz przechyłów wzdłużnych są prawidłowo kompensowane.

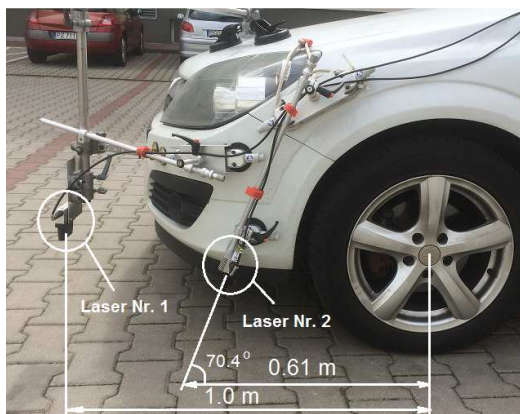
5. Badania eksperymentalne algorytmu kompensacji

Badania eksperymentalne zostały wykonane w celu weryfikacji algorytmu kompensacji w zastosowaniu praktycznym w pojeździe podczas działania w czasie rzeczywistym. Do testów eksperymentalnych wykorzystano samochód Opel Astra. Masa samochodu podczas testów wynosiła 1350 kg, jego długość całkowita to 4430 mm, szerokość 1814 mm, wysokość 1510 mm, rozstaw kół 2685 mm a koła miały rozmiar 205/55 R16. W celu pomiaru zmiennych opisujących dynamikę samochodu wykorzystano następujące czujniki:

- 2 laserowe czujniki wysokości Corrsys-Datron HF-500C (rys. 6) firmy Kistler Group,
- 8 czujników przyspieszeń Analog Devices ADXL327 (4 dla mas nieresorowanych i 4 dla masy resorowanej nad kołami - wszystkie dla pomiaru przyspieszeń pionowych),
- czujniki Bosch YRS3 do pomiaru przyspieszeń w trzech kierunkach X, Y i Z oraz prędkości kątowych obrotu wokół tych trzech osi - prędkości przechyłów wzdłużnego, poprzecznego i prędkości odchylenia.
- 5 Hz odbiornik GPS firmy Garmin dla pomiaru prędkości samochodu.

Wszystkie z mierzonych zmiennych były zapisywane przy częstotliwości pomiaru 200 Hz przy pomocy systemu dSpace a następnie przetworzone na komputerze w systemie Matlab.

W celu walidacji kompensacji kąta montażu zamontowano dwa czujniki laserowe na testowym samochodzie - rys.6. Jeden zamontowano prostopadle do powierzchni drogi w odległości 1 m od osi przedniej, drugi zamocowano 0,61 m od osi przedniej pochylając go pod kątem $70,4^\circ$ względem nawierzchni drogi.



Rys. 6. Sposób zamontowania czujników laserowych na testowym samochodzie

W rzeczywistej implementacji algorytmu pojawiło się wiele dodatkowych zagadnień - wśród nich problem z estymacją przemieszczeń nadwozia i koła. Mogą one być oszacowane tylko w pośredni sposób - poprzez całkowanie przyspieszeń (dla pionowych przemieszczeń) oraz prędkości kątowych (dla kątowych przemieszczeń). Dodatkowe problemy to zakłócenia sygnałów - przyspieszeń pionowych i prędkości kątowych. Dla rozwiązania tych problemów konieczne było zastosowanie dodatkowych procedur obliczeniowych:

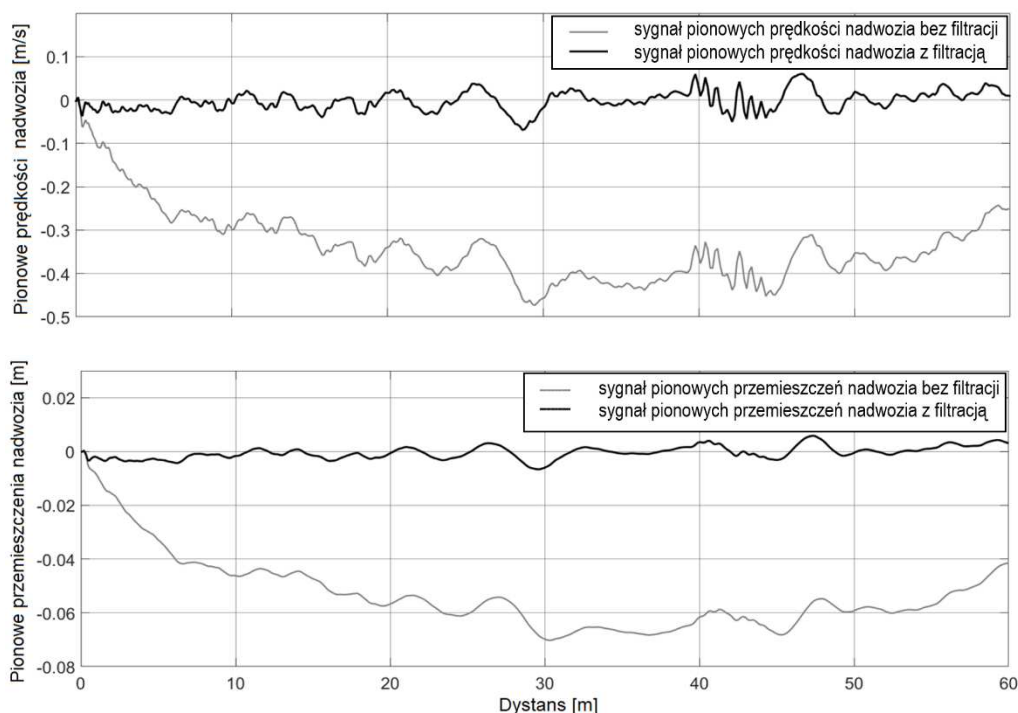
- numerycznej filtracji sygnałów,
- numerycznego całkowania sygnałów.

Do filtracji i całkowania sygnałów w czasie rzeczywistym wykorzystano funkcję transmitancji o charakterystyce filtra dolnoprzepustowego [7]:

$$Int(s) = \frac{1}{s + \beta_i} \quad (7)$$

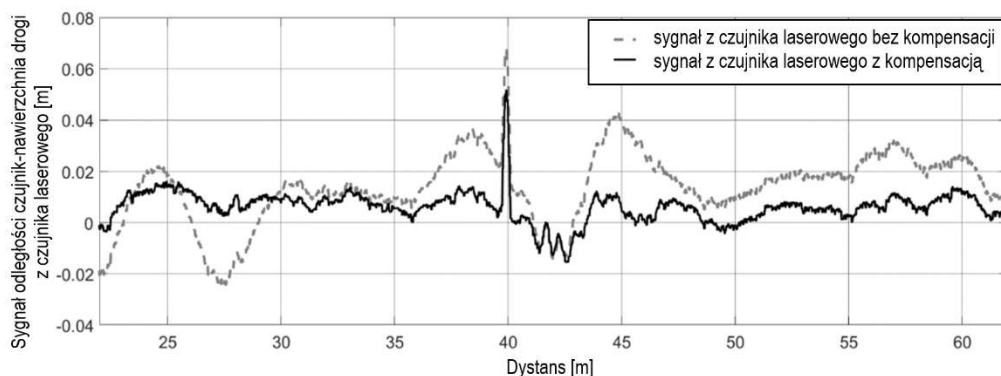
gdzie β_i - częstotliwość odcięcia filtra (w badaniach dla przyspieszeń stosowano) $\beta_i = 1 \text{ Hz}$.

Efekt wykorzystania zależności opisanej wzorem 7 przedstawiono na rysunku 7. Widocznym jest, że zastosowany filtr pozwala uniknąć stałego spadku średniej wartości sygnału po scałkowaniu wejściowej wartości.

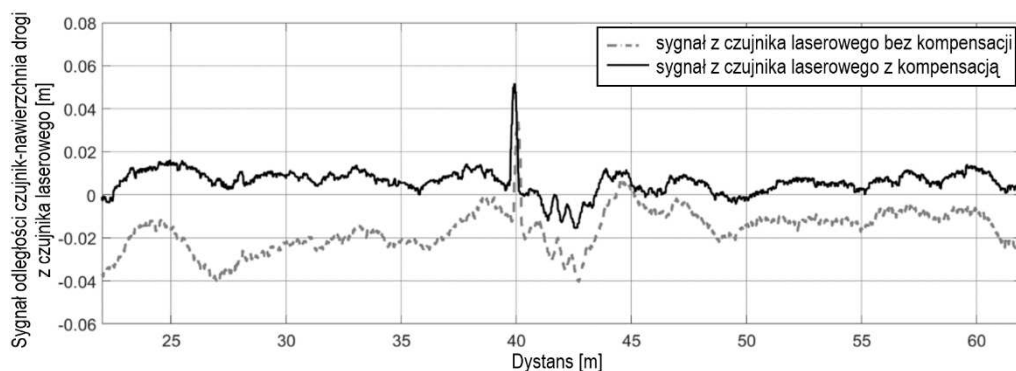


Rys. 7. Estymacja prędkości i przemieszczeń nadwozia

Algorytm kompensacji z dodanymi modułami filtracji oraz całkowania został zaimplementowany w systemie czasu rzeczywistego dSpace służącym do prototypowania elektronicznych układów sterowania. Uzyskane wyniki, po przetworzeniu danych pomiarowych zostały zaprezentowane na rysunkach 8 (niski poziom tłumienia amortyzatorów) i 9 (wysoki poziom tłumienia amortyzatorów).



Rys. 8. Estymacja profilu wysokości nawierzchni drogi z wykorzystaniem laserowego czujnika wysokości nr 1 – porównanie surowego sygnału czujnika i sygnału po kompensacji badanym algorytmem – przypadek małego tłumienia



Rys. 9. Estymacja profilu wysokości nawierzchni drogi z wykorzystaniem laserowego czujnika wysokości nr 1 – porównanie surowego sygnału czujnika i sygnału po kompensacji badanym algorytmem – przypadek dużego tłumienia

Otrzymane sygnały wskazują, że algorytm kompensacji redukuje wpływ pionowych przemieszczeń nadwozia i pozwala na oszacowanie rzeczywistego profilu drogi. Dla obu ustawień poziomu tłumienia testy drogowe wykazały że wysokość przeszkody (progu zwalniającego) oszacowana przez sygnał laserowego czujnika wysokości po kompensacji odpowiada rzeczywistej wysokości progu zwalniającego. Dodatkowe zmiany wysokości profilu drogi widoczne na uzyskanych wykresach są trudne do jednoznacznej interpretacji ze względu na fakt, że nawierzchnia odcinka testowego nie była idealnie gładka na całej swojej 70 m

długości a prędkość pojazdu nie była cały czas stała. Widać jednak wyraźnie powtarzalność uzyskanych zmian wysokości dla obu przejazdów – z tłumieniem małym i dużym.

6. Podsumowanie

Czujnik laserowy wysokości zamocowany do nadwozia samochodu może być wykorzystany do pomiaru nierówności drogi ale wymaga to uwzględnienia dynamiki nadwozia – jego przemieszczeń pionowych i kątowych. Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki badań symulacyjnych dowiodły, że kompensacja wpływu dynamiki nadwozia może być całkowicie skuteczna jeśli znane są liniowe i kątowe przemieszczenia nadwozia. Niestety sytuacja gdy są one znane dokładnie jest sytuacją idealną i w rzeczywistości liczyć można tylko na oszacowanie tych wartości w sposób pośredni poprzez filtrację i całkowanie sygnałów przyspieszenia i prędkości kątowej.

Badania eksperymentalne algorytmu kompensacji opracowanego przez Autorów i wykorzystanego w badaniach symulacyjnych oraz uzupełnionego o moduły filtracji i całkowania dla oszacowania dynamiki nadwozia potwierdziły jego skuteczność. Opracowana metoda estymacji profilu wysokości nierówności drogi może zostać wykorzystana do poprawy charakterystyk zawieszenia poprzez wykorzystanie w algorytmach sterowania tłumieniem zawieszenia. Ten obszar zagadnień będzie rozwijany w kolejnych pracach badawczych zespołu.

7. Literatura

1. Ahmed M M, Svaricek F. Preview Optimal Control of Vehicle Semi-active Suspension Based on Partitioning of Chassis Acceleration and Tire Load Spectra, European Control Conference (ECC). 2014:1669-1674.
2. Bouzouraa M E, Kellner M, Hofmann U, Lutz R. Laser scanner based road surface estimation for automotive applications, IEEE SENSORS 2014 Proceedings, Valencia: 2034-2037
3. Dąbrowski K, Ślaski G. Method and algorithm of automatic estimation of road surface type for variable damping control, Scientific Conference on Automotive Vehicles and Combustion Engines (KONMOT 2016).
4. Donahue M D, Hedrick J K. Implementation of an Active Suspension, Preview Controller for Improved Ride Comfort, Nonlinear and Hybrid Systems in Automotive Control. 2003; 1–23.
5. Göhrle C, Schindler A, Wagner A, Sawodny O. Road Profile Estimation and Preview Control For Low-Bandwidth Active Suspension Systems, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2015; 20(5): 2299–2310.
6. Kitshing K J, Cebon D, Cole D J. An Experimental Investigation of Preview Control, Vehicle System Dynamics. 1999; 32(6): 459–478.
7. Savaresi S M, Poussot-Vassal C, Spelta C, Sename O, Dugard L. Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles. Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier. 2010; 206.

8. Sugai H, Buma S, Kanda R, Yoshioka K, Hasegawa M. Preview Ride Comfort Control for Electric Active Suspension, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012; 198: 147-161.
9. Tudón-Martínez J C, Fergani S, Sename O, Martínez J J, Morales-Menendez R, Dugard L. Adaptive Road Profile Estimation in Semi-Active Car Suspension, IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2015; 23(6): 2293-2305.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2015.2413937>