

WYZNACZANIE LOKALNEGO POCHYLENIA NIWELETY DROGI Z WYKORZYSTANIEM AKCELEROMETRU ZABUDOWANEGO W URZĄDZENIU MOBILNYM

Streszczenie

W artykule przeanalizowano wyniki rejestracji przyspieszenia pojazdu związanego z lokalnym pochyleniem niwelety drogi pozyskane z wykorzystaniem prostego systemu pomiarowego. Jednostkę centralną systemu stanowi urządzenie mobilne z zabudowanym akcelerometrem trzyosiowym. W ramach badań zrealizowano szereg jazd testowych po wybranym odcinku drogi publicznej, a następnie do dalszej analizy wybrano dwa przejazdy z porównywalnymi przebiegami prędkości. W odniesieniu do zarejestrowanych przyspieszeń przedstawiono ocenę jakościową i ilościową. Wyznaczone na podstawie przyspieszenia pochylenie niwelety porównano z pochyleniem rzeczywistym.

WSTĘP

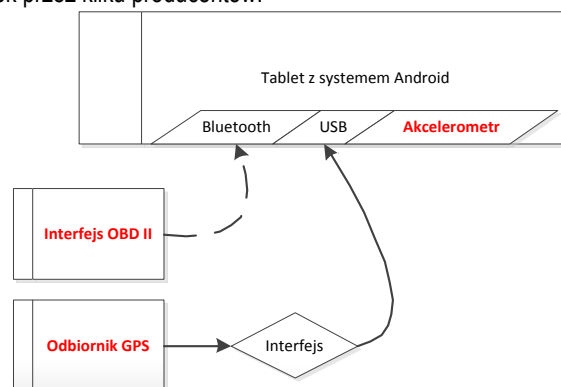
Rozwój pokładowych systemów wspomagających kierowcę pojazdu samochodowego jak dotychczas nie doprowadził do powstania systemu, który ostrzegałby kierowcę o możliwości wystąpienia zmniejszonej przyczepności nawierzchni na podstawie oceny jej przewidywanego stanu. System taki wymaga funkcjonalnego połączenia szeregu podsystemów, w tym przede wszystkim informacji meteorologicznej z drogowych stacji meteo, podsystemu oceniającego stan nawierzchni, systemu OBD pojazdu oraz modułu wnioskującego, którego zadaniem będzie wykonywanie prognozy zmian stanu nawierzchni. Ponadto do właściwego działania systemu wymagane będzie dostarczenie szeregu parametrów pomocniczych, w tym informacji o ukształtowaniu geometrycznym niwelety drogi. Tym samym również układ pomiarowy służący do wyznaczania lokalnego pochylenia niwelety drogi stanowi jeden z dodatkowych elementów projektowanego systemu pokładowego.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wstępnej analizy przydatności akcesoryjnego urządzenia pokładowego w postaci akcelerometru zabudowanego w urządzeniu mobilnym w zadaniu wyznaczania lokalnego pochylenia niwelety drogi. Urządzenia mobilne od pewnego już czasu wykorzystywane są w szeregu projektach zakładających ich nietypowe zastosowania. Przykładowo autorzy prac [1, 2, 3] stosowali akcelerometry wbudowane w telefony komórkowe do jakościowej oceny stanu nawierzchni drogowej.

1. SYSTEM POMIAROWY

Przed przystąpieniem do realizacji badań w pierwszej kolejności określono architekturę systemu do gromadzenia oraz akwizycji danych pomiarowych. Założono, że niezbędne dane pomiarowe będą zbierane w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem akcelerometru, odbiornika GPS oraz interfejsu komunikującego się z systemem OBD pojazdu. Podstawowym zadaniem systemu pomiarowego była synchronizacja czasowa zapisu danych pozyskiwanych ze wszystkich źródeł. Zastosowany w badaniach system pomiarowy przedstawiono schematycznie na rysunku 1. Jako jednostkę centralną do integracji i archiwizacji pozyskiwanych danych zastosowano tablet z systemem operacyjnym Android. Na potrzeby integracji danych przygotowano odpowiednie rozwiązanie softwarowe w postaci aplikacji pozwalającej na zapis danych pomiarowych w formie jednego pliku .csv. Dzięki takiemu podejściu możliwa jest pełna synchronizacja danych pochodzących z różnych urządzeń

oraz zapewnienie odpowiedniości poszczególnych znaczników czasowych. Urządzenia stanowiące elementy systemu dobrano pod kątem zapewnienia wymaganej rozdzielczości czasowej pozyskiwanych wyników, klasy ich dokładności oraz akceptowanego poziomu niezawodności pracy. W tym celu testowano szereg urządzeń, zarówno akcelerometrów, jak i odbiorników GPS dostarczanych na rynek przez kilku producentów.



Rys. 1. Schemat struktury funkcjonalnej systemu zastosowanego do gromadzenia danych pomiarowych

W konsekwencji podjętych działań skonfigurowano ostatecznie urządzenia wchodzące w skład systemu pomiarowego:

- akcelerometr Bosch BMA280,
- odbiornik GPS systemu Allwinner,
- interfejs OBD II oparty o moduł ELM327.

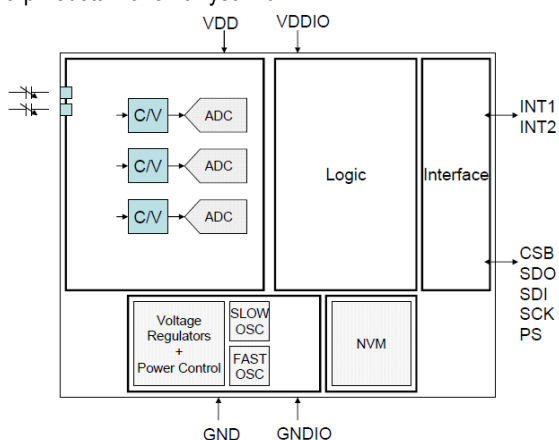
Podstawowym zastosowaniem wykorzystanego w pracy systemu pomiarowego jest gromadzenie informacji o przyspieszeniach dostarczanych przez akcelerometr oraz o prędkości liniowej pojazdu wprost z systemu OBD, natomiast sygnał z odbiornika GPS stanowi dane uzupełniające, umożliwiające weryfikację położenia pojazdu w trakcie badań.

Charakterystyka techniczna urządzeń wybranych jako podzespoły systemu pomiarowego:

Akcelerometr

Do przeprowadzenia pomiarów wybrano urządzenie mobilne skonstruowane w oparciu o SoC firmy Broadcom – BCM23550. Platforma sprzętowa posiada cztery rdzenie Cortex-A7 o taktowaniu 1,2 GHz oraz kompletny zestaw modułów łączności. Jako urządzenie peryferyjne układu zastosowany został akcelerometr trójosiowy

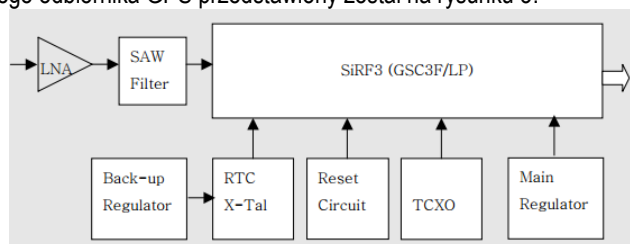
firmy Bosch Sensortec – BMA280. Urządzenie to pozwala na rejestrację danych w rozdzielczości 14 bitów, przy zakresie pomiarowym ± 2 g (programowalnym). To pozwala na osiągnięcie dokładności pomiaru na poziomie 0,244 mg dla każdej z osi. Akcelerometr z systemem macierzystym komunikuje się poprzez interfejs I²C z zaprogramowaną częstotliwością 50 Hz. Schemat blokowy urządzenia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy akcelerometru BMA280 [4]

Odbiornik GPS

Do gromadzenia informacji o położeniu pojazdu wykorzystano moduł GPS wbudowany w system mobilny. Za bazę wykorzystywanego urządzenia posłużył SoC typu Allwinner A31s, do którego bezpośrednio został dołączony moduł JGR-SC3. Schemat blokowy tego odbiornika GPS przedstawiony został na rysunku 3.

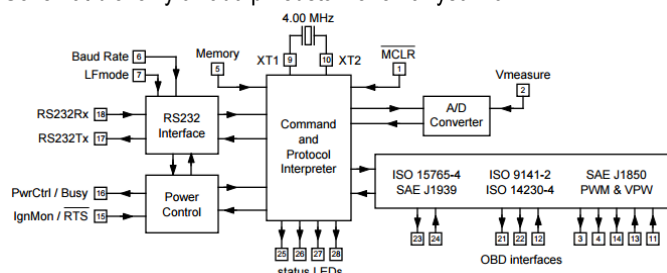


Rys. 3. Schemat blokowy odbiornika GPS JGR-SC3 [5]

Odbiornik działa w oparciu o architekturę SiRFstar III. Oznacza to, że system otrzymuje informacje o położeniu z częstotliwością 1 Hz, w formie czterech binarnych komunikatów NMEA: GGA, GSA, GSV oraz RMC. Prędkość transmisji danych do systemów nadrzędnych wynosi 9600 bodów. Tzw. zimny start układu to ok. 60 sekund.

Interfejs OBD II

W celu skomunikowania się z pojazdem testowym wykorzystano moduł interpretujący komunikaty z diagnostyki pokładowej pojazdu na transmisję szeregową Bluetooth. W opisywanym układzie pomiarowym zastosowano układ oparty o interpreter ELM327. Schemat blokowy układu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy interpretera ELM327 [6]

Poprzez złącze diagnostyczne OBD II urządzenie pozwala na odczyt podstawowych parametrów pracy silnika pojazdu. ELM327 obsługuje podstawowe protokoły komunikacji z magistralami CAN silników, m.in. SAE J1850, SAE J1939, ISO 14230-4. Częstotliwość odczytu danych z pojazdu to 1,25 Hz. Komunikacja odbywa się na poziomie tekstowym, w formie komend AT.

2. POLIGON BADAWCZY

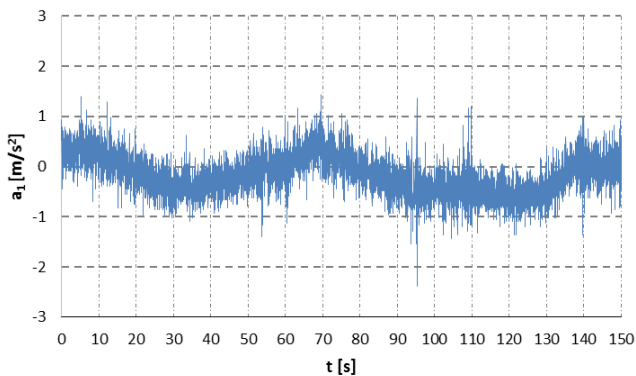
Na prezentowanym w pracy etapie prac zdecydowano o wyborze poligonu badawczego w postaci stosunkowo krótko eksploatowanego odcinka drogi II klasy technicznej charakteryzującego się wysokim poziomem swobody ruchu. Wybór ten wynikał z następujących przesłanek o charakterze ogólnym. Pierwszą przesłankę stanowiła konieczność zapewnienia stosunkowo wolnozmiennego profilu niwelety drogi o ograniczonych wartościach pochyień. Takie warunki spełniają drogi, dla których przyjmuje się wysokie prędkości projektowe, a więc przede wszystkim drogi trzech najwyższych klas technicznych. Kolejną przesłankę stanowiła konieczność zapewnienia ruchu pojazdu w trakcie badań z niewielką i łatwo identyfikowalną liczbą stanów dynamicznych w postaci realizowanych przez pojazd testowy przyspieszeń i opóźnień. Wybór drogi pełniącej w sieci transportowej funkcję tranzytową o całkowicie ograniczonej dostępności, a więc nieobsługującej przyległego otoczenia, ze względu na charakter ruchu strumienia pojazdów i poziom swobody ruchu pozwala spełnić to wymaganie. Ostatnią przesłankę stanowiła konieczność ograniczenia szumu w pomiarze realizowanym przez akcelerometr. Wybór drogi dopuszczającej maksymalne naciski osi 115 kN oraz jednocześnie pozostającej w eksploatacji od kilkunastu miesięcy zapewnia wstępną minimalizację szumu związanego z nierównościami nawierzchni w pomiarze wykonywanym przez akcelerometr. W konsekwencji jako poligon badawczy wybrano fragment drogi ekspresowej S69 stanowiącej wschodnią część obwodnicy miasta Bielsko-Biała. Na rysunku 5 przedstawiono położenie wybranego poligonu badawczego wraz z podziałem na podstawie dokumentacji projektowej na odcinki o różnym pochyleniu niwelety (oznaczonych jako AB, BC itd.). Przejazdy testowe odbywały się na odcinku pomiędzy węzłami Mikuszowice oraz Krakowska.

W ramach badań zrealizowano szereg przejazdów testowych na odcinku pomiarowym po obu jezdniach drogi, każdorazowo starając się utrzymywać stałą prędkość jazdy. Przyjęcie stałej prędkości i wyeliminowanie składowej przyspieszenia liniowego pojazdu upraszcza proces dalszej analizy zmienności wartości przyspieszenia rejestrowanej przez akcelerometr w kierunku osi równoległej do nawierzchni drogi. Wstępna analiza zarejestrowanych przebiegów prędkości pojazdu w trakcie przejazdów przez odcinek badawczy pozwoliła na wytypowanie dwóch przejazdów zrealizowanych po jezdni w kierunku Cieszyna jako porównywalnych ze względu na uzyskany profil prędkości ruchu pojazdu. Tym samym zdecydowano, że dalsza analiza prowadzona będzie jedynie dla dwóch wybranych w ten sposób serii pomiarowych. W obu przypadkach, wykorzystując tempomat pojazdu, zrealizowano przejazdy ze stałą prędkością 82 km/h na odcinku o długości 3500 m.

W dalszej części pracy przeanalizowano odczyty z akcelerometru zarejestrowane w obu seriach pomiarowych, wyznaczono wartości uśrednione dla jednakowych przedziałów czasu i obliczono miary opisujące zgodność danych zarejestrowanych w obu przejazdach. Na zakończenie obliczono chwilowe pochylenia, co pozwoliło na obliczenie średnich pochyień na poszczególnych fragmentach odcinka badawczego.

3. ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

W wyniku realizacji obu serii pomiarowych zarejestrowano zmiany przyspieszenia wzdłuż osi pojazdu równoległej do nawierzchni drogi. Uzyskane wyniki pomiarów chwilowego przyspieszenia w ramach pierwszej i drugiej serii pomiarowej przedstawiono odpowiednio na rysunku 6 oraz 7. Rejestracja przyspieszenia odbywała się każdorazowo z częstotliwością nie mniejszą niż 40 Hz. Można zauważyć, że przedstawione zestawienie wartości chwilowych przyspieszeń (a więc danych surowych) wykazuje duże znamię podobieństwa. Przed przystąpieniem do dalszych analiz zarejestrowane wartości chwilowych przyspieszeń uśredniono w ramach przedziałów czasu równych 1 sekundzie. Takie postępowanie umożliwi bezpośrednie porównanie średnich wartości przyspieszeń zarejestrowanych podczas obu przejazdów w odniesieniu do tych samych przedziałów czasu, a tym samym na tych samych odcinkach drogi.



Rys. 6. Wartości chwilowych przyspieszeń wzdłuż osi pojazdu równoległej do nawierzchni drogi zarejestrowane w ramach pierwszej serii pomiarowej

Graficzne zestawienie rozrzutu średnich wartości przyspieszeń zarejestrowanych w obu seriach przedstawiono na rysunku 8. Analiza porównawcza zgodności średnich wartości przyspieszeń zarejestrowanych podczas obu przejazdów na tych samych odcinkach drogi wymaga zastosowania kilku miar. Podstawowymi miarami zastosowanymi do opisu różnic pomiędzy wartościami zarejestrowanymi w obu seriach pomiarowych będą średnia różnica oraz mediana. Dodatkowo warto przeanalizować wskaźnik zgodności znaku w odniesieniu do średniego przyspieszenia, który można

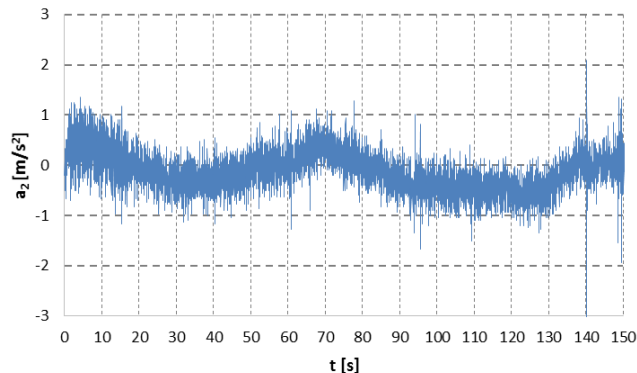
zdefiniować w postaci:

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{dla } \text{sgn}(a_{1,i}) = \text{sgn}(a_{2,i}) \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (1)$$

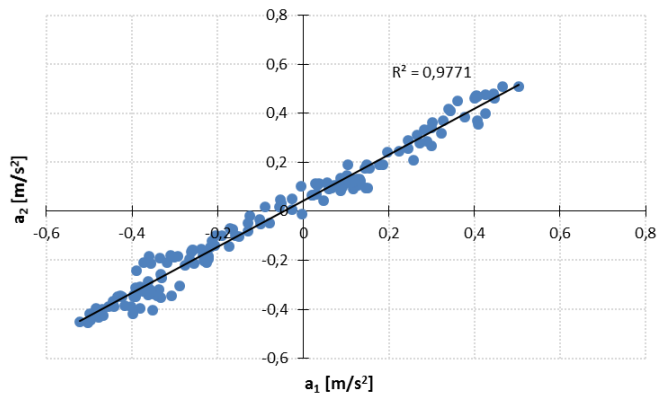
gdzie:

n – liczba porównywanych wartości średniego przyspieszenia dla obu serii pomiarowych,

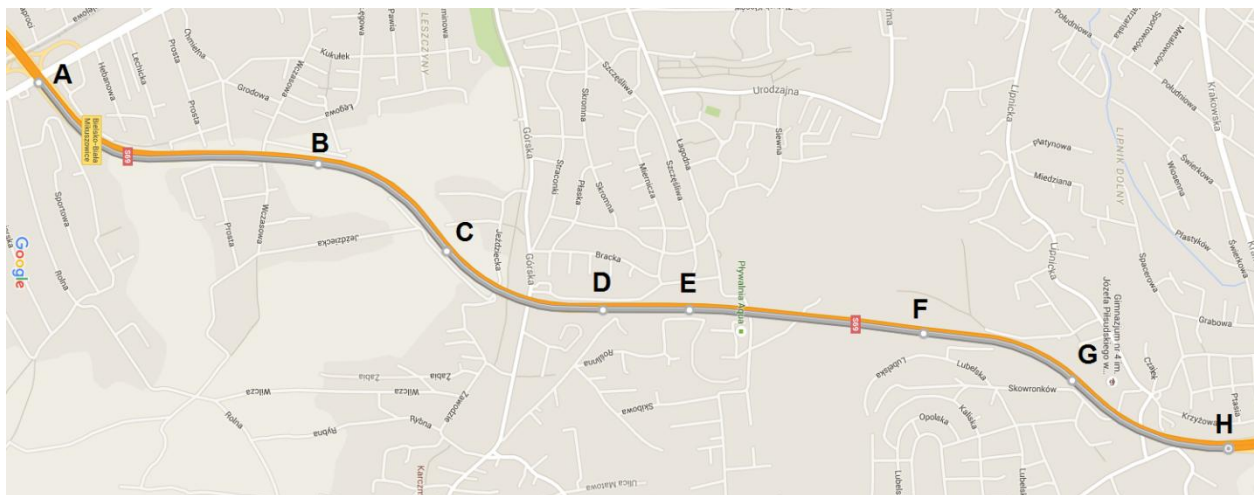
$a_{j,i}$ – i -ta wartość przyspieszenia zarejestrowanego w serii pomiarowej j .



Rys. 7. Wartości chwilowych przyspieszeń wzdłuż osi pojazdu równoległej do nawierzchni drogi zarejestrowane w ramach drugiej serii pomiarowej



Rys. 8. Rozrzut średnich wartości przyspieszeń zarejestrowanych podczas obu przejazdów na tych samych odcinkach drogi



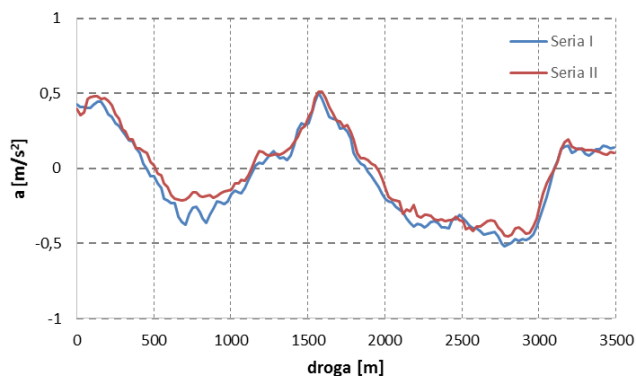
Rys. 5. Poligon badawczy wraz z podziałem na odcinki o różnym pochyleniu niwelety drogi (źródło mapy – Google)

Wartości poszczególnych miar wykorzystanych do charakterystyki różnic pomiędzy wartościami zarejestrowanymi w obu seriach pomiarowych zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Miary charakteryzujące zgodność wartości średniego przyspieszenia w obu seriach

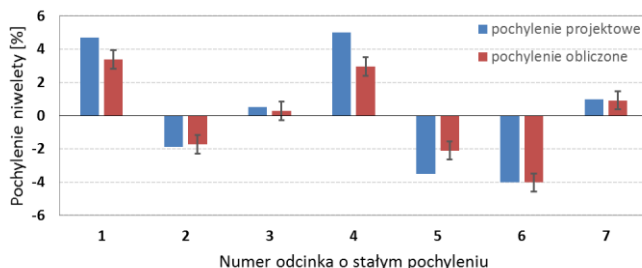
Miara	Średnia różnica [m/s ²]	Mediana [m/s ²]	Wskaźnik zgodności znaku q
Wartość	0,055	0,048	0,91

Analizując wartości miar zestawione w tabeli 1, można skonstatować, że na ponad połowie odcinków różnica zarejestrowanych średnich wartości przyspieszeń nie przekracza 0,05 m/s². Jeżeli przy tym oceniać błąd względny, wyrażony jako różnica wartości przyspieszeń zarejestrowanych na danym odcinku w odniesieniu do większej z zarejestrowanych wartości, to mediana z wartości błędu względnego wyniesie 21,5%. Z kolei uzyskana wartość wskaźnika zgodności wskazuje, że w 9% przypadków zarejestrowane na danym odcinku drogi średnie wartości przyspieszenia w obu seriach mają jednak niezgodne znaki. Sytuacja taka ma miejsce na odcinkach o nieznacznym pochyleniu, na których rejestrowano niewielkie wartości przyspieszeń. Zestawienie średnich wartości przyspieszeń wzdłuż analizowanego odcinka drogi wyznaczonych w obu seriach pomiarowych przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Porównanie średnich wartości przyspieszeń zarejestrowanych w obu seriach pomiarowych wzdłuż analizowanego odcinka drogi

W dalszej kolejności dla danych uśrednionych z obu przebiegów, na podstawie wartości przyspieszeń obliczono pochylenia niwelety drogi na rozpatrywanych odcinkach drogi. Zestawienie wartości pochylenia niwelety na poszczególnych odcinkach drogi według dokumentacji projektowej oraz obliczonych na podstawie średnich wartości przyspieszenia zarejestrowanego na każdym z odcinków analizowanej drogi przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Porównanie projektowych wartości pochylenia niwelety na poszczególnych odcinkach analizowanej drogi z wartościami pochylenia wyznaczonych na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń

Porównując obliczone wartości pochylenia niwelety z wartościami pochylenia określonych w dokumentacji projektowej, można

stwierdzić, że w analizowanym przypadku w stosunku do uśrednionego wyniku obu przejazdów maksymalny błąd wyznaczenia pochylenia niwelety danego odcinka analizowanej drogi sięga poziomu 40% (odcinek 4 i 5). W pozostałych przypadkach jest jednak zdecydowanie mniejszy.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki rejestracji przyspieszenia związanego z ukształtowaniem niwelety drogi uzyskane z wykorzystaniem systemu pomiarowego, którego jednostkę centralną stanowi urządzenie mobilne. Przeanalizowano dane o chwilowych przyspieszeniach w ramach dwóch serii pomiarowych obejmujących odrębne przejazdy po drodze przyjętej jako poligon badawczy. Już analiza danych surowych wskazuje na istnienie jakościowej zbieżności wyników uzyskanych w ramach obu serii pomiarowych. Z kolei analiza wartości uśrednionych dla tych samych przedziałów czasu, a tym samym odcinków analizowanej drogi, wskazuje na istnienie wysokiego stopnia korelacji rejestrowanych przyspieszeń. Współczynnik determinacji na poziomie ponad 0,97 potwierdza jakościową zbieżność wyników. Ocena ilościowa wskazuje przy tym, że rozbieżności co do znaku pojawiają się w przypadku, gdy rejestrowana wartość przyspieszenia jest nie większa niż $\pm 0,05$ m/s². Jednocześnie pomimo rejestracji prędkości liniowej pojazdu z systemu OBD nie należy wykluczyć małych oscylacji prędkości pojazdu a zatem czasowego pojawiania się nieidentyfikowanej składowej przyspieszenia. Inną przyczyną rejestrowanych różnic jest także zmienna w obrębie pasa ruchu trajektoria pojazdu. Na zakończenie można jednak wnioskować, że w przypadku właściwego zidentyfikowania składowej przyspieszenia związanej z dynamiką pojazdu, dokładność wyznaczania lokalnego pochylenia niwelety powinna być wystarczająca z punktu widzenia potrzeb systemu pokładowego ostrzegającego o możliwości wystąpienia niekorzystnych warunków na nawierzchni drogi.

BIBLIOGRAFIA

1. Dounangphachanh V., Oneyama H., *A study on the use of smartphones under realistic settings to estimate road roughness condition*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2014, 2014:114.
2. Skublewska-Paszkowska M., Smółka J., Łukasik E., Badurowicz M., *Pomiar przyspieszenia w globalnym układzie współrzędnych z użyciem urządzeń mobilnych*. Logistyka 2014, nr 6.
3. Smółka J., Skublewska-Paszkowska M., Badurowicz M., Łukasik E., *Urządzenia mobilne jako rejestratory przyspieszenia*. Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ) 2015, nr I.
4. Nota katalogowa akcelerometru BMA280: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bma280/BST-BMA280-DS000-11_published.pdf
5. Nota katalogowa odbiornika GPS JGR-SC3: <https://www.maritex.com.pl/media/uploads/products/wi/JGR-C3-S.pdf>
6. Nota katalogowa interpretera ELM327: <http://elmelectronics.com/DSheets/ELM327DS.pdf>

THE DETERMINATION OF LOCAL ROAD UPHILL GRADIENT USING ACCELEROMETER BUILT-IN A MOBILE DEVICE

Abstract

In the paper, results concerning recorded acceleration of a vehicle due to local uphill gradient were analyzed. The data was obtained by means of using a simple measurement system. The main unit of the system is a mobile device with a three axis accelerometer, which is built-in. In the framework of the research, several test drives were done on a public road. Then two drives with similar velocity profiles were chosen to further analysis. The evaluation of recorded acceleration was performed from qualitative and quantitative point of view. Road uphill gradient, calculated on the base of acceleration, was compared to real data.

Autorzy:

mgr inż. **Marcin Honkisz** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu, Katedra Transportu i Informatyki, Zakład Inteligentnych Systemów Transportowych, mhonkisz@ath.eu

dr hab inż. **Krzysztof Brzozowski**, prof. ATH – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu, Katedra Transportu i Informatyki, Zakład Inteligentnych Systemów Transportowych, kbrzozowski@ath.eu