

Krzysztof SKRZYPCZYK
Politechnika Śląska

ESTYMACJA PRĘDKOŚCI BIEGU ZA POMOCĄ FUZJI KOMPLEMENTARNEJ SYGNAŁÓW Z SYSTEMÓW NAWIGACJI SATELITARNEJ I KROKOMIERZA

Streszczenie. W pracy przedstawiono zastosowanie koncepcji filtracji komplementarnej do estymacji tempa biegu na podstawie sygnałów pochodzących z dwóch źródeł: nawigacji satelitarnej i krokomierza. Sygnały te łączone są w filtrze komplementarnym z odpowiednimi wagami oznaczającymi chwilową wiarygodność danego źródła. Współczynniki dobierane są dynamicznie w trakcie pracy algorytmu na podstawie wartości wariancji sygnału. Działanie algorytmu zweryfikowane zostało za pomocą symulacji przeprowadzonych w środowisku MATLAB.

RUNNING SPEED ESTIMATION USING COMPLEMENTARY FILTER BASED FUSION OF SATELITE NAVIGATION AND PEDOMETER DATA

Summary. This paper presents an application of complementary filtration for estimating running pace using GPS and pedometer data. In the approach presented two information sources are fused with dynamically adjusted importance factors. In the case of poor GPS signal the pedometer data are gained by the filter, and otherwise. The method proposed was verified using multiple simulations. An exemplary one is presented and discussed in the paper.

1. Wprowadzenie

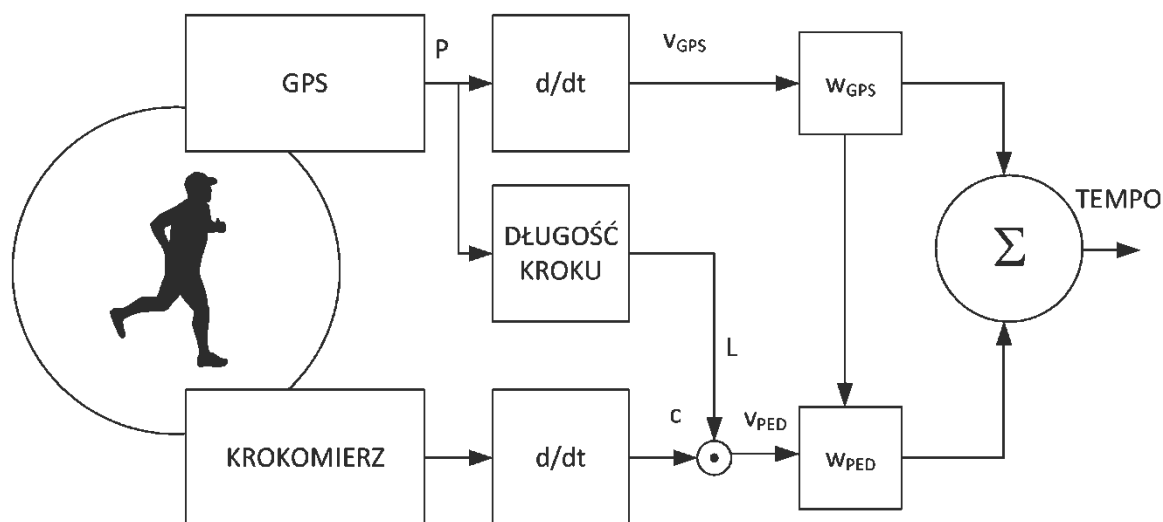
Bieganie stało się obecnie bardzo popularną formą aktywności. Coraz więcej ludzi rozpoczyna regularne treningi z zamiarem osiągnięcia swoich celów sportowych. Proces treningowy składa się z szeregu bodźców, którymi w sposób skoordynowany planem treningowym poddawany jest układ ruchowy i wydolnościowy osoby trenującej. Aby zapewnić prawidłowość przebiegu tego procesu, ważne jest monitorowanie intensywności poszczególnych bodźców. Intensywność ta jest skorelowana z szybkością biegu, zatem monitorowanie tempa biegu może być jedną z metod kontroli przebiegu procesu treningowego. Współczesne technologie umożliwiają wygodny pomiar różnych parametrów biegu, między innymi prędkości biegu. Jedną z najczęściej stosowanych metod pomiaru prędkości biegu jest różniczkowanie w czasie danych pochodzących z satelitarnych systemów nawigacyjnych takich jak np. GPS czy GLONASS. Takie rozwiązanie zapewnia

całkiem dobre rezultaty obarczone błędem na poziomie 5%, jeśli chodzi o wyznaczanie tempa średniego na długim dystansie. Obliczanie tempa chwilowego obarczone jest już dużym błędem i cechuje się znaczną niepewnością. Powodem tego są zmienne warunki transmisji sygnału, na podstawie którego wyznaczana jest lokalizacja śledzonego obiektu. Na to, z kolei ma wpływ topologia i infrastruktura otoczenia podobnie, jak i warunki atmosferyczne. Dość powiedzieć, iż w trakcie śledzenia obiektu poruszającego się w zurbanizowanym, czy też zalesionym terenie błędy w estymowaniu jego prędkości ruchu nierzadko przekraczają 50 %. Dodatkowym czynnikiem występowania tak dużych błędów w estymacji prędkości jest stosunkowo niewielka prędkość, z jaką porusza się biegacz. Jedną z podstawowych metod redukcji wielkości wspomnianego błędu są operacje uśredniania czy też wygładzania danych [3,4,5]. Inną formą poprawy dokładności, mającej zastosowanie jednak tylko w przypadku pomiaru większych prędkości jest użycie składowej dopplerowskiej dostępnej w depeszy nawigacyjnej systemu nawigacji satelitarnej [9]. O wiele lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie dodatkowego czujnika dostarczającego informacji o mierzonym parametrze i dokonanie jego fuzji z sygnałem pochodzącym z nawigacji satelitarnej. Najczęściej używanymi do tego celu czujnikami są akcelerometry, które dzięki rozwojowi technologii MEMS stały się wszechobecne w urządzeniach mobilnych. Poprzez scałkowanie sygnału przyspieszenia otrzymujemy estymatę prędkości obiektu. Dokonując fuzji komplementarnej lub stosując filtrację Kalmana dwóch omawianych źródeł otrzymujemy poprawę estymaty prędkości [1, 8, 9, 10, 11]. Innym czujnikiem, który możemy wykorzystać, jako dodatkowe źródło danych jest krokomierz. Pomimo faktu, iż to nieskomplikowane urządzenie dostarcza informacji jedynie o szacowanej, przebytej przez pieszego odległości, to po zróżniczkowaniu względem czasu danych pochodzących z tego urządzenia otrzymamy estymatę prędkości nieskorelowaną z tą, otrzymaną na bazie danych satelitarnych. W niniejszej pracy przedstawiono propozycję metody fuzji dwóch wcześniej wspomnianych źródeł danych. Zrealizowano to z użyciem filtru komplementarnego, którego współczynniki dobierane są dynamicznie na podstawie wariancji sygnału pochodzącego z satelitarnego systemu nawigacji. W przypadku dużej wariancji sygnału świadczącej o znacznej niepewności danych pochodzących z tego źródła, zwiększana jest waga danych pochodzących z krokomierza. Metoda ta została zaimplementowana i przetestowana symulacyjnie w środowisku MATLAB. Wyniki przykładowego eksperymentu zostały przedstawione i przedyskutowane w końcowej części pracy.

2. Idea metody wyznaczania tempa biegu

Koncepcja omawianej metody zilustrowana została na rysunku 1. Załóżmy, że biegacz ma ze sobą urządzenie zawierające dwa wcześniej wspomniane źródła informacji: system nawigacji satelitarnej i krokomierz. Większość współczesnych monitorów aktywności jest w stanie zapewnić te dane. Odbiornik systemu nawigacji dostarcza informacji o swoim położeniu P w określonych interwałach czasu Δt (zwykle równych 1 [s]), podczas gdy krokomierz dostarcza informacji o ilości wykonanych kroków. Obliczając odległości pomiędzy następującymi po sobie położeniami odbiornika wyznaczamy dystans przebyty w danym okresie czasu, co po

zróżniczkowaniu względem czasu daje nam estymatę prędkości biegu otrzymaną na podstawie pierwszego źródła danych v_{GPS} . Z kolei po zróżniczkowaniu sygnału z krokomierza otrzymamy kadencję biegu c , która po wymnożeniu przez długość kroku L da nam drugą estymatę tempa biegu. Długość kroku wyznaczana jest na podstawie danych z systemu satelitarnego. Średnia ważona dwóch powyższych wielkości stanowi estymatę tempa biegu. W kolejnym rozdziale przedstawione zostaną szczegóły procesu wyznaczania tych wielkości oraz ich fuzji.



Rys. 1. Schemat ilustrujący metodę wyznaczania tempa biegu na bazie fuzji danych z nawigacji satelitarnej i krokomierza

3. Opis metody fuzji

Zdefiniujmy najpierw zbiór danych zawierające kolejne lokalizacje odbiornika nawigacji wyznaczone w odstępach czasu Δt :

$$P = \{p_k\}, p_k = \{x_k, y_k\}, k \in \langle n - N + 1, n \rangle \quad (1)$$

gdzie x_k i y_k oznaczają współrzędne lokalizacji odbiornika przeliczone do dwuwymiarowego, kartezjańskiego układu współrzędnych, n jest bieżącą chwilą czasu, natomiast N determinuje rozmiar okna czasowego, określającego liczbę przeszłych danych używanych w dalszych obliczeniach.

3.1. Przetwarzanie wstępne

W celu zredukowania wpływu niedokładności pomiarów położenia (1) na estymowanie prędkości dokonywana jest wielomianowa aproksymacja danych (1). W wyniku tej operacji zbiór wartości (1) określający pierwotne pomiary położenia odbiornika zastępowany jest przez zbiór:

$$\bar{P} = \left\{ \bar{p}_n = \begin{bmatrix} \bar{x}_n = f_x(n, a_{i,0}, a_{i,1}, a_{i,2}) \\ \bar{y}_n = f_y(n, b_{i,0}, b_{i,1}, b_{i,2}) \end{bmatrix} \right\} n = n, n-1, \dots, n-N+1, \quad (2)$$

którego elementami są wartości aproksymacji zbioru (1) otrzymane za pomocą wielomianu drugiego rzędu.

3.2. Estymacja tempa biegu

Wyznamy teraz estymaty chwilowego tempa biegu otrzymane na podstawie dwóch zdefiniowanych wcześniej źródeł.

Nawigacja satelitarna

System lokalizacji satelitarnej dostarcza informacji o położeniu biegacza w następujących po sobie chwilach czasu, z częstością $1/\Delta t$. Aby otrzymać estymatę prędkości należy zróżniczkować dystans pokonywany przez biegacza w czasie Δt . Z drugiej strony, różniczkowanie numeryczne w interwale Δt prowadzi do powstania znacznych błędów estymaty prędkości. Biorąc pod uwagę relatywnie niewielką prędkość poruszania się biegacza można dokonywać pewnego uproszczenia i oceniać jego prędkość chwilową, jako wartość średnią za okres będący niewielką krotnością czasu Δt . W ten sposób zmniejszamy także wpływ chwilowych błędów pomiaru położenia na estymatę prędkości. Zdefiniujmy odległości przebyte przez biegacza w ciągu ostatnich N okresów próbkowania, jako zbiór:

$$D = \{d_k\}, \quad d_k = |\bar{p}_k - \bar{p}_{k-1}|_{L=2}, \quad k \in \langle n-N+1 \rangle \quad (3)$$

Dane (3) poddano operacji uśrednienia za pomocą metody wykładniczej średniej ruchomej (ang. exponential moving average). Pozwala to na zachowanie dominującego wpływu ostatnich wartości na estymatę „chwilowej” prędkości. Średnią tę wyznaczamy stosując rekursywnie następujące zależności:

$$\begin{aligned} \bar{d}_k &= d_k \quad \text{dla } k = n-N+1 \\ \bar{d}_k &= \alpha d_k + (1-\alpha)\bar{d}_{k-1} \quad \text{dla } k = n, n-1, \dots, n-N+2 \end{aligned} \quad (4)$$

Po uśrednieniu przebytej odległości ocena prędkości biegu w chwili n -tej, na podstawie danych satelitarnych wyznaczana jest, jako:

$$v_{GPS,n} = \frac{\bar{d}_n}{N\Delta t} \quad (5)$$

Należy zaznaczyć, iż estymator (5) daje akceptowalną wartość jedynie dla dobrych warunków transmisji sygnału.

Krokomierz

W przypadku, gdy powyższe założenie nie jest spełnione, krokomierz może stanowić alternatywne źródło danych, pozwalających zredukować błędy estymacji prędkości. Krokomierz to urządzenie wykrywające i zliczające wykonane kroki. Po zróżniczkowaniu otrzymanej wartości względem czasu otrzymujemy parametr skorelowany z prędkością biegu zwany kadencją. Jego wartość wyznaczamy, jako:

$$c_n = \frac{s_n - s_{n-H}}{H\Delta t}, \quad (6)$$

gdzie s_n oznacza liczbę kroków wykrytą aż do momentu n w oknie czasowym o szerokości H . Estymowanie tempa na podstawie kadencji jest możliwe, jeśli znana jest długość pojedynczego kroku. Wówczas tempo możemy wyznaczyć, jako:

$$v_{PED,n} = c_n L_{s,n}. \quad (7)$$

Długość kroku w n -tej chwili czasu wyznaczana jest, jako średni dystans przebyty w czasie $N\Delta t$:

$$L_{s,n} = \frac{\bar{d}_n}{s_n - s_{n-N}}. \quad (8)$$

3.3. Fuzja danych

Idea fuzji danych pochodzących z dwóch wcześniej opisanych źródeł polega na dynamicznym dopasowywaniu współczynników wagowych filtru komplementarnego, w zależności, od jakości danych dostarczanych przez system nawigacji satelitarnej. W przypadku, gdy dane pochodzące z tego systemu są stabilne i wiarygodne, wówczas są one dominującym składnikiem estymaty prędkości. W przeciwnym wypadku, zmniejszana jest waga tego komponentu, przy jednoczesnym zwiększeniu wagi drugiego źródła danych – krokomierza. Oznaczmy estymatę tempa biegu otrzymaną w wyniku fuzji danych dla n -tej chwili czasu, jako:

$$v_{FUS,n} = w_{GPS,n} v_{GPS,n} + w_{PED,n} v_{PED,n} \quad (9)$$

Wielkością, którą przyjęto do oceny wiarygodności danych sygnału satelitarnego jest jego wariancja. Po przeanalizowaniu kilkunastu zapisów parametrów biegu, zarejestrowanych przez przenośne urządzenia, stwierdzono, że wariancja sygnału liczona na podstawie populacji N próbek, dla dobrego uwarunkowania sygnału nie przekracza pewnej niewielkiej wartości σ_{THR}^2 . Z drugiej strony w miejscach gdzie stwierdzono silne zakłócenia sygnału wariancja osiąga kilkukrotnie większą wartość. Stąd pomysł na użycie wariancji sygnału, jako estymatora jego wiarygodności wydają się obiecujący. Oznaczmy, zatem wariancję populacji pomiarów dystansu przebytego przez biegacza w następujących po sobie interwałach czasu, jako:

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=n-N+1}^n (d_i - d)^2, \quad (10)$$

gdzie N oznacza rozmiar populacji tworzonyj z przeszłych pomiarów, natomiast d jest jej wartością średnią liczoną, jako:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N+1}^n d_i. \quad (11)$$

Wartość wariancji (10) używana jest do wyznaczenia współczynnika wagowego sygnału z nawigacji satelitarnej:

$$w_{GPS,n} = \frac{1}{1 + e^{\alpha(\sigma_d^2 - \sigma_{THR}^2)}}. \quad (12)$$

Z kolei współczynnik wagowy sygnału krokomierza obliczany jest, jako dopełnienie:

$$w_{PED,n} = 1 - w_{GPS,n} \quad (13)$$

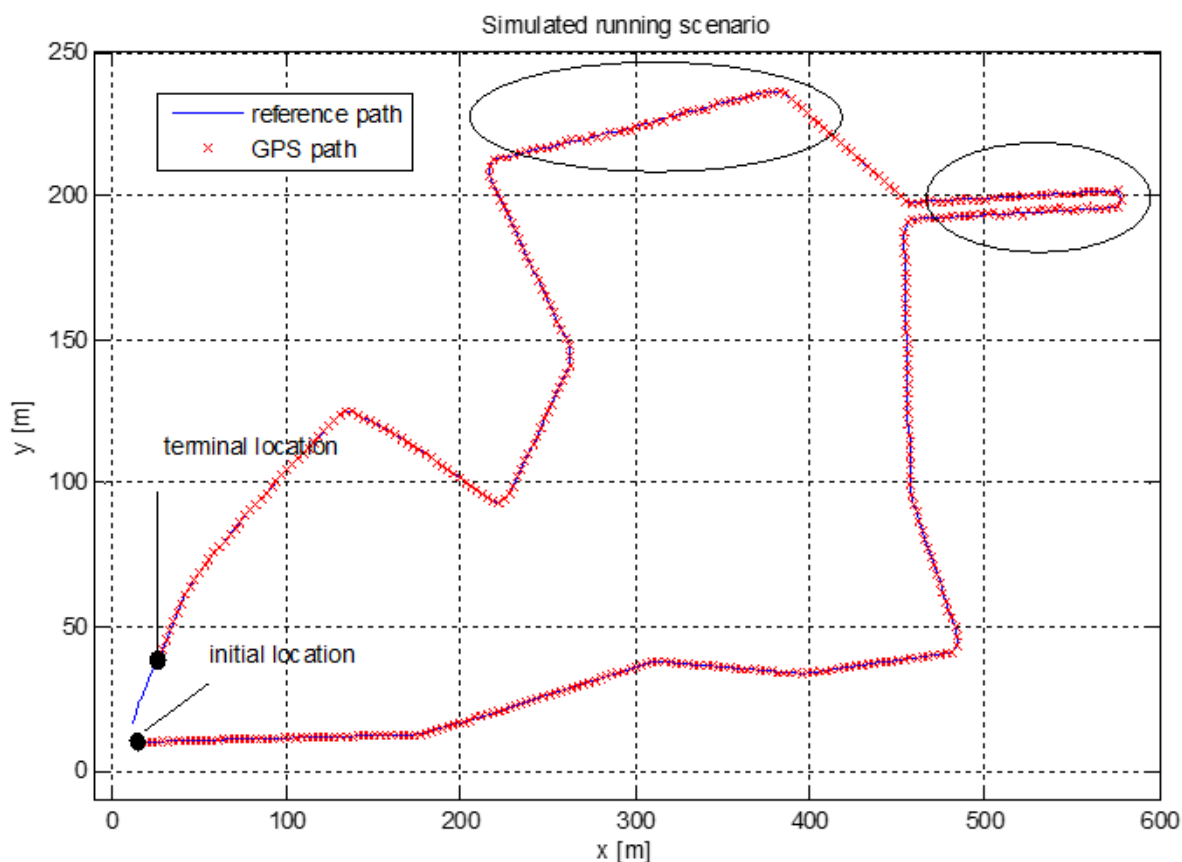
Na podstawie wartości wariancji (10) uaktualniana jest także długość kroku zgodnie z regułą:

$$L_{s,n} = \begin{cases} L_{s,n} & \text{dla } \sigma_d^2 \leq \sigma_{THR}^2 \\ L_{s,n-N+1} & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases} \quad (14)$$

4. Wyniki symulacji

Przedstawiona powyżej metoda została zweryfikowana symulacyjnie. Eksperyment symulacyjny przygotowany został w ten sposób, by w jak największym stopniu odzwierciedlał realną sytuację. W pierwszej kolejności dokonano analizy biegów zarejestrowanych przez przenośne odbiorniki nawigacji satelitarnej i wybrano te, w których występują wyraźne, omawiane wcześniej anomalie pomiarowe. Następnie sprawdzono wartość wariancji sygnału w warunkach poprawnej i zaburzonej pracy systemu, na podstawie czego oszacowano wartość progową wariancji. Wybrany zapis biegu został następnie zrekonstruowany symulacyjnie, w celu uzyskania prędkości referencyjnej. Na rysunku 2 przedstawiono symulowany przebieg wybranego treningu. Ścieżka referencyjna uzyskana na podstawie wybranego profilu tempa została zaznaczona linią ciągłą. Symulowane pomiary położenia dostarczane przez system lokalizacji satelitarnej zaznaczono czerwonymi krzyżykami. Za pomocą elips oznaczono miejsca, w których ze względu na topologię terenu występują znaczne zaburzenia w transmisji sygnału, a co za tym idzie duże błędy w pomiarze położenia. Z kolei rysunek 3 przedstawia przebiegi czasowe prędkości referencyjnej, kadencję biegu uśrednianą w oknie czasowym $H=10$ oraz wariancję 5 elementowej populacji

pomiarów. Pierwszym z testowanych podejść do szacowania chwilowej prędkości biegu było zastosowanie średniej ruchomej (EMA) obliczanej dla okna $N=5$.



Rys. 2. Przebieg symulowanej trasy biegu

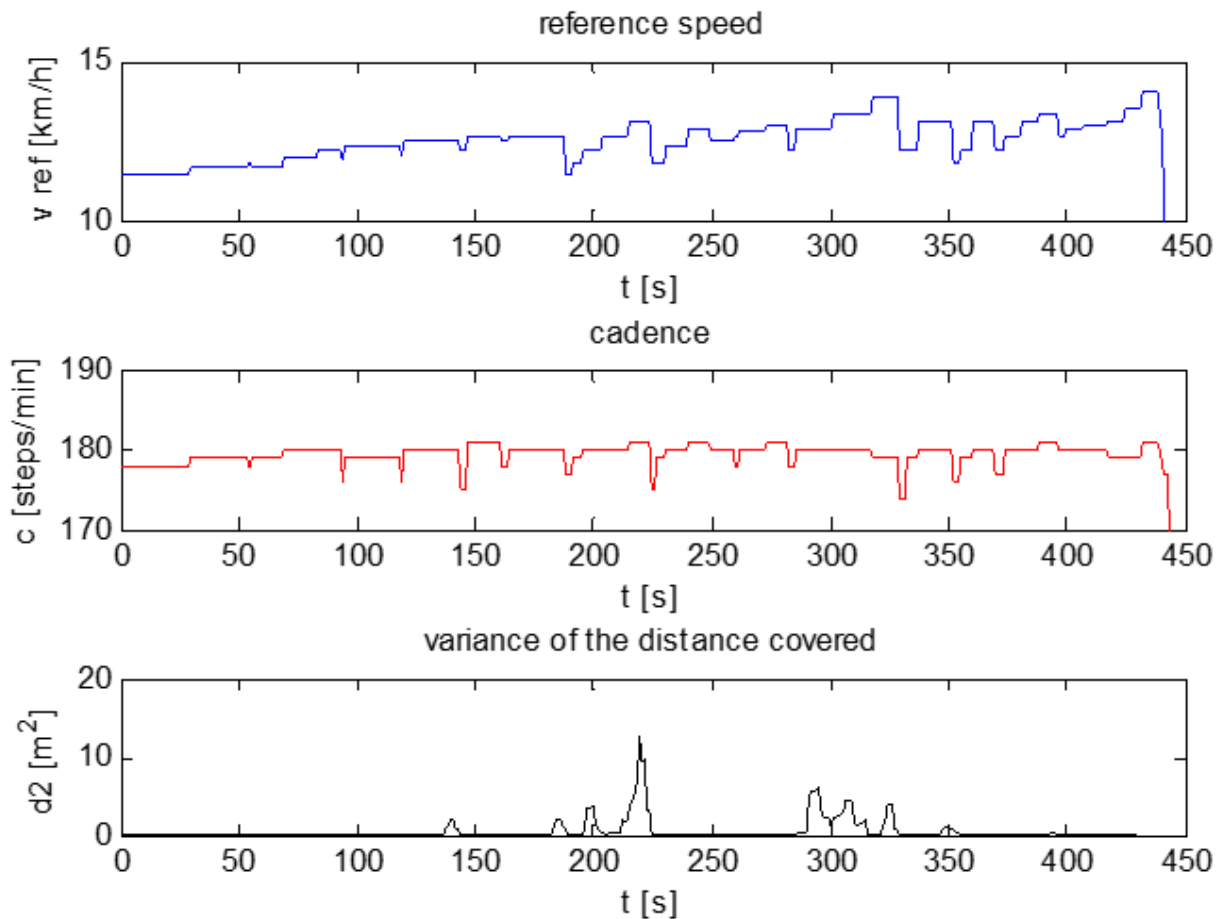
Rezultat tej operacji był zadowalający jedynie dla danych o niskiej wariancji. W przypadku dużych zmian sygnału estymata prędkości była niezadowalająca. Kolejnym krokiem było zastosowanie opisanej metody fuzji sygnałowej. Progową wartość sygnału wariancji przyjęto, jako 0.8 [m²]. Porównanie wyników otrzymanych dla uśredniania (EMA) z wynikami uzyskanymi dla fuzji sygnałowej przedstawiono na rysunku 4. Można zauważyć, że wyjście filtru komplementarnego odzwierciedla prędkość referencyjną znacznie lepiej niż pojedynczy filtr uśredniający. Przełączanie się na sygnał krokomierza w chwilach, gdy sygnał satelitarny jest poważnie zakłócony pozwala na znaczną redukcję błędów szacowania prędkości chwilowej.

5. Podsumowanie

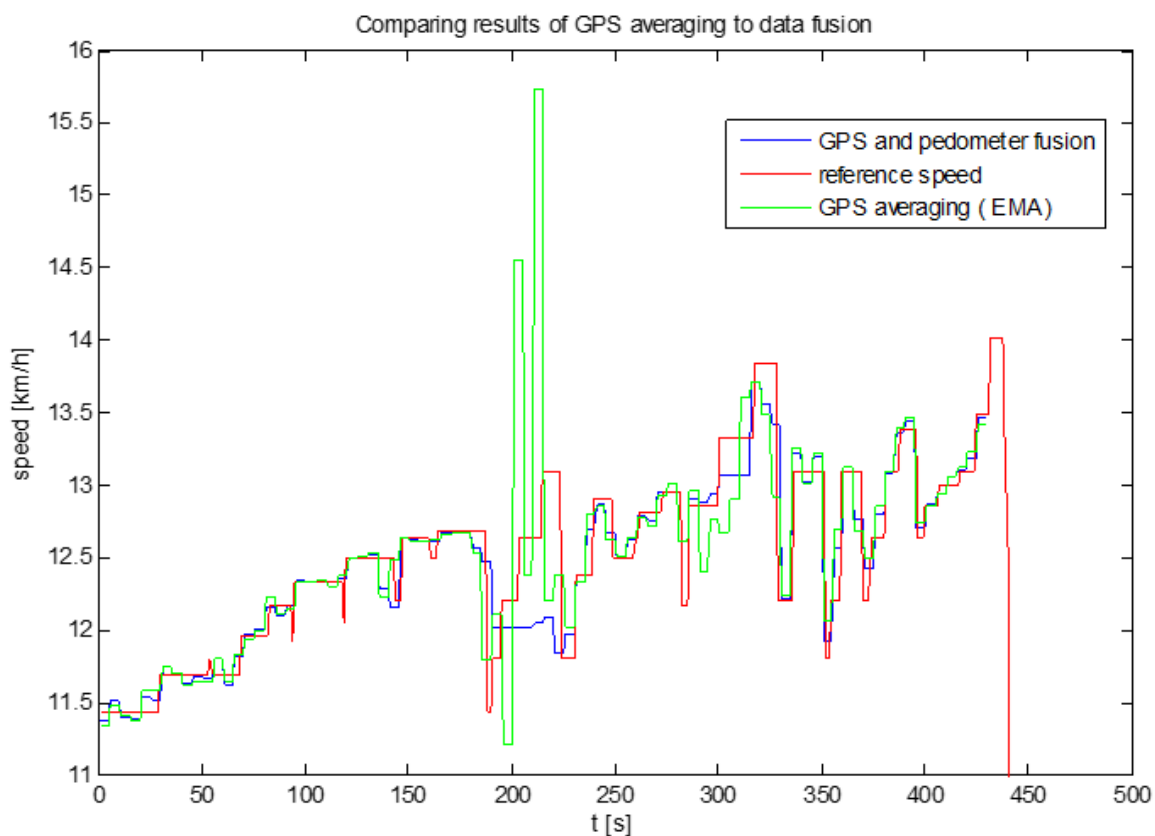
Proces wyznaczanie chwilowej prędkości biegu jedynie na podstawie sygnału lokalizacji satelitarnej jest podatny jest na duże błędy wynikających z kilku faktów. Pierwszy z nich dotyczy relatywnie małej prędkości, z jaką porusza się biegacz, co powoduje, że nawet niewielkie błędy w pomiarze położenia przekładają się na duże błędy w ocenie prędkości. Drugi związany jest z tym, że w trakcie swojej aktywności biegacz porusza się w zróżnicowanym terenie, co z kolei wpływa na częste zaniki lub pogorszenie parametrów transmisji. W pracy pokazano metodę pozwalającą na zredukowanie błędów pomiaru prędkości za pomocą filtracji komplementarnej sygnału

z systemu lokalizacji satelitarnej oraz z krokomierza. Metoda sprawdzona została symulacyjnie, a otrzymane rezultaty pozwalają na pozytywną ocenę jej potencjalnej przydatności w rzeczywistych systemach pomiaru prędkości. Kolejny etap badań związany będzie właśnie z próbą implementacji opisaną metody w przenośnym urządzeniu pomiarowym.

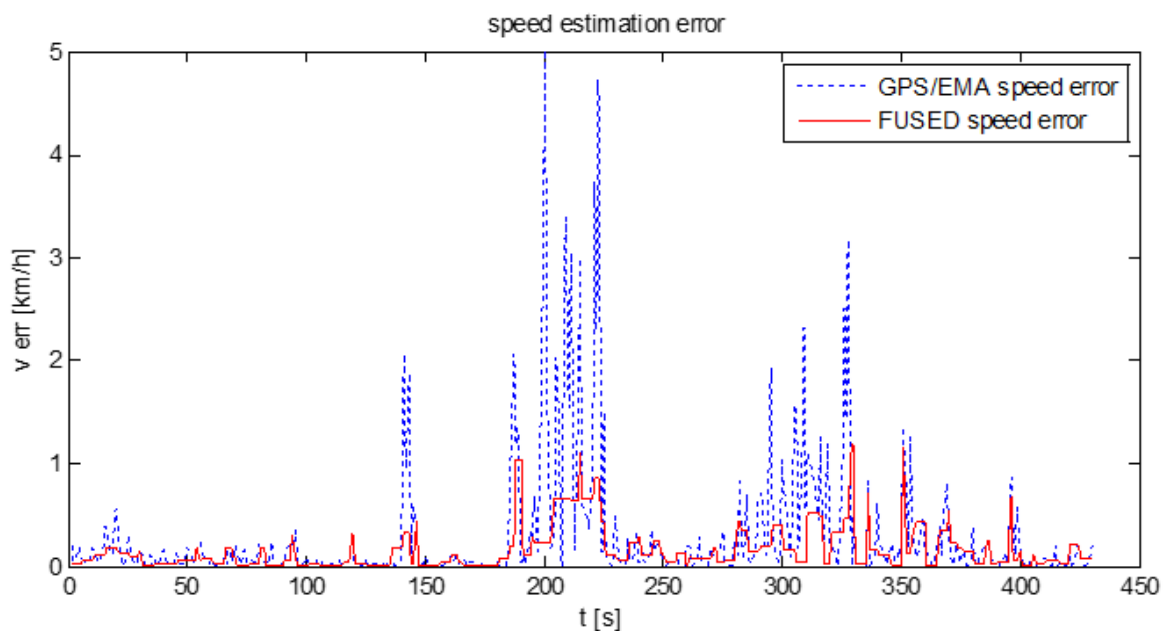
Praca częściowo finansowana ze środków BK 02/010/BK_18/0102.



Rys. 3. Przebiegi symulowanej prędkości referencyjnej, kadencji i wariancji sygnału przebytego dystansu



Rys. 4. Porównanie wartości prędkości estymowanych na podstawie sygnału lokalizacji satelitarnej z wartościami otrzymanymi z użyciem fuzji



Rys. 5. Porównanie błędów bezwzględnych estymat prędkości bez, i z fuzją sygnałową

LITERATURA

1. How J., Pohlman N., Park C.: BGPS estimation algorithms for precise velocity, slip and race-track position measurements, in SAE Int., Dec. 2002.
2. Janibi-Sharifi F., Hayward V., Chen C.J.: Discrete-time adaptive windowing for velocity estimation, IEEE Transactions on control systems technology, 8:1003-1009, 2000.
3. Jun J., Guensler R., Oglen J.: Smoothing Methods to Minimize Impact of Global Positioning System Random Error on Travel Distance, Speed, and Acceleration Profile Estimates, Journal of the Transportation Research Board, Volume 1972, 2014, p. 141-150.
4. Liu Y.: Noise reduction by vector median filtering, Geophysics, Vol. 78, No. 3, 2013, p. 7986.
5. Ohba K., Ishihara T., Inooka H.: Model-Based Velocity Estimation Using The Kalman Filter, Journal of Flow Visualization and Image Processing , Volume 1, 1993 Issue 3, p. 253-260.
6. Sasiadek J.Z.; Wang Q.; Zeremba M.B.: Fuzzy adaptive Kalman filtering for INS/GPS data fusion, Proc. of the 2000 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 19-19 July 2000.
7. Wieser A.: GPS based velocity estimation, Engineering Geodesy TU Graz, 2007
8. Williams D. E.: Complementary Filter to Estimate Inertial Velocity, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 131(5), 054502, Aug 18, 2009.
9. Yang Z.: Particle Velocity Estimation Using Kalman Filtering, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems , Volume: AES-21, Issue: 3, May 1985, p. 407-419.