

Jan PURCZYŃSKI¹

ESTYMACJA PRĘDKOŚCI POJAZDU W WARUNKACH SILNYCH ZAKŁÓCEŃ LOSOWYCH METODĄ WYGŁADZANIA WYKŁADNICZEGO BROWNA

Zaproponowano metodę estymacji prędkości pojazdu poruszającego się po jednym pasie ruchu. Uwzględniono rozmycie obrazu pojazdu oraz występowanie szumów gaussowskich na poszczególnych etapach akwizycji obrazu. Algorytm bazuje na wstępnej obróbce sygnału metodą wygładzania wykładniczego Browna. Działanie algorytmu w warunkach silnych zakłóceń losowych zweryfikowano w wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych oraz porównano z innymi metodami estymacji prędkości pojazdu.

ESTIMATION OF A VEHICLE VELOCITY IN STRONG RANDOM NOISE CONDITIONS BY MEANS OF BROWN'S EXPONENTIAL SMOOTHING

The method of estimating the velocity of a vehicle moving in one lane was proposed. Vehicle image blurring and the appearance of Gaussian noises at individual stages of image acquisition were taken into account. The algorithm is based on initial signal processing by means of Brown's exponential smoothing. The working of the algorithm in strong random noise conditions was verified through computer simulations. Furthermore the algorithm was compared with other methods of vehicle velocity estimation.

1. WSTĘP

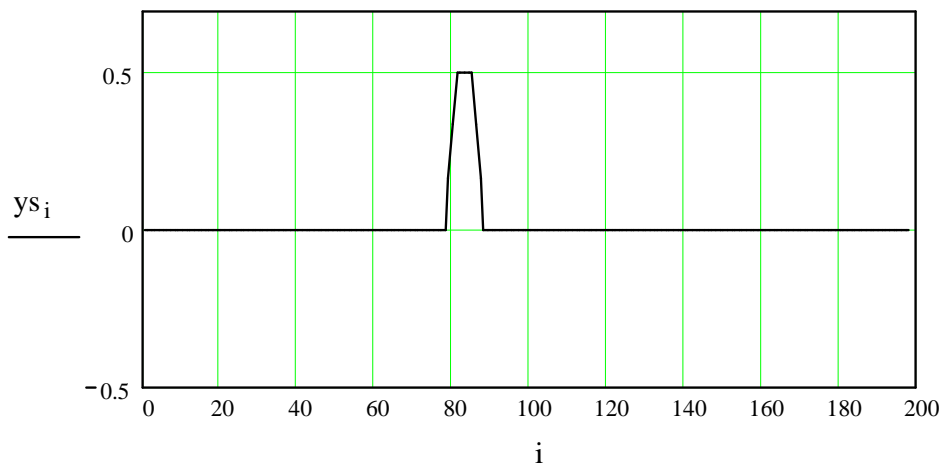
W pracy rozpatrzono zagadnienie estymacji prędkości pojazdu na podstawie obrazu zarejestrowanego przez kamerę wideo. W przypadku niskiego poziomu zakłóceń stosuje się metodę polegającą na odejmowaniu kolejnych klatek obrazu, co pozwala zidentyfikować poruszające się obiekty. W przypadku wysokiego poziomu zakłócenia metoda odejmowania kolejnych sekwencji obrazu staje się nieprzydatna, ponieważ prowadzi do wzrostu poziomu zakłócenia- następuje sumowanie wariancji szumu. W niniejszej pracy, gdzie uwzględnia się silne zakłócenia losowe, przyjęto, że dla poszczególnych klatek estymuje się położenie obiektu, natomiast prędkość wyznacza się na podstawie sekwencji obrazów (10, 20,30 klatek). Praca stanowi kontynuację tematyki rozpatrzonej we wcześniejszych pracach autora [2], [3].

¹ Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Szczecinie, 71-244 Szczecin ul. Klonowica 14, Tel. 507085577
E-mail: janpurczynski@onet.eu

2. METODA ESTYMACJI PRĘDKOŚCI POJAZDU

Przyjęto, że przed uruchomieniem pomiaru prędkości została zarejestrowana dostateczna liczba obrazów tła (np. 1000), na podstawie której dokonano uśrednienia, co pozwoliło określić charakterystyczne cechy tła. Zakłada się, że uśredniony obraz tła jest odejmowany od kolejnych, zarejestrowanych obrazów z poruszającym się obiektem. W efekcie, przyjmuje się, że tło posiada poziom równy zero i jest zakłócanie szumem gaussowskim identycznie jak pojazd. W celu uproszczenia rozważań rozpatruje się pojazdy w uproszczonej skali szarości: pojazdowi jasnemu przyporządkowana jest liczba 0,5, natomiast pojazdowi ciemnemu- liczba $-0,5$. Zakładając, że prędkość pojazdu wynosi 90km/godz. oraz kamera rejestruje 25 klatek na sekundę, stwierdza się, że dwie kolejne klatki odpowiadają drodze 1m przebytego przez pojazd. Zakładając, że kamera ma rozdzielczość 320 pikseli oraz obraz obejmuje drogę o długości 320m, stwierdza się, że odległość dwóch sąsiadujących pikseli w obrazie odpowiada odległości 1m na drodze. Zakłada się, że ruch pojazdu, o długości 6m, odbywa się na jednym pasie ruchu a kamera umieszczona jest z boku drogi.

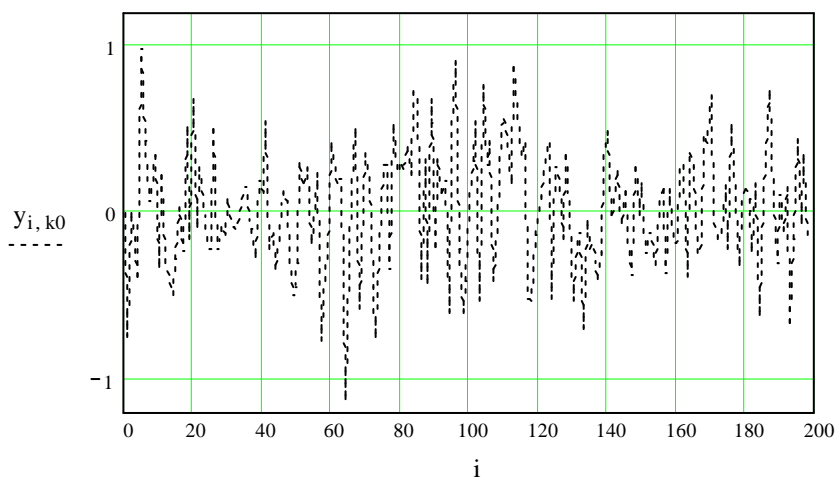
Model pojazdu, tzn. prostokąt o podstawie 6 pikseli został rozmyty za pomocą filtra średniej ruchomej przyjmując postać trapezu y_s przedstawionego na rysunku 1.



Rys. 1. Model pojazdu przyjęty do obliczeń.

Źródło: opracowanie własne

Obraz przedstawiony na rysunku 1 został zakłócony szumem gaussowskim charakteryzującym się odchyleniem standardowym $\sigma = 0,35$, co zostało zaprezentowane na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowy obraz pojazdu w obecności zakłóceń losowych ($\sigma = 0,35$) uzyskany w ramach symulacji komputerowych.
Źródło; opracowanie własne.

W celu estymacji położenia pojazdu wykorzystano metodę wygładzania (wyrównywania) wykładniczego Browna [4]:

$$yw_{i+1} = a \cdot y_{i+1} + (1-a)yw_i \quad (1)$$

gdzie: y_i - zarejestrowany sygnał ; $i = 1, 2, \dots, N$;

yw_i - sygnał wygładzony wykładniczo ; $yw_1 = y_1$.

W niniejszej pracy zaproponowano dwustronną metodę wygładzania opisaną wzorem:

$$yw2_j = a \cdot yw_{j+1} + (1-a)yw2_j ; \quad j = N, N-1, \dots, 1; \quad (2)$$

gdzie: yw_j - sygnał wygładzony zgodnie ze wzorem (1) ;

$yw2_j$ - sygnał wygładzony dwustronnie ; $yw2_N = yw_N$. $j = N, N-1, \dots, 1$;

Proponowana metoda estymacji położenia pojazdu polega na wyznaczeniu wartości $yw2$ i określeniu punktu i_{\max} występowania maksimum tej funkcji – metodę tę oznaczono jako WW.

W przypadku pojazdu ciemnego reprezentowanego przez liczbę $-0,5$, należy poszukiwać minimum wartości wygładzonej $yw2$ - algorytm wyznaczał niezależnie obydwa ekstrema, a porównanie wyników końcowych jednoznacznie ustalało zaistniały wariant.

Algorytm estymacji prędkości pojazdu jest następujący. Dla kolejnych (np. 10-ciu) obrazów wyznacza się wartości pikseli dla których wystąpiło maksimum funkcji $yw2$ oraz

ich medianę. Obserwacje, dla których odległość wartości pikseli od mediany przekraczają M zostają usunięte – nie uwzględnia się ich w dalszych obliczeniach. Dla uzyskanego zestawu wyznacza się trend liniowy, którego współczynnik kierunkowy prostej \hat{v}_1 określa prędkość pojazdu. Postępowanie powtarzamy dla kolejnych trzech sekwencji 10-ciu obrazów, a następnie wyznaczamy wartość średnią współczynników kierunkowych:

$$\hat{v} = \frac{1}{3}(\hat{v}_1 + \hat{v}_2 + \hat{v}_3) \quad (3)$$

Zaproponowaną metodę oznaczono jako WWI.

Rozpatrywany problem był tematem pracy [2], gdzie estymacja położenia pojazdu została wykonana w wyniku aproksymacji parabolicznej wartości obserwacji y_i za pomocą funkcji $f(i, j)$:

$$f(i, j) = a0_i + a1_i \cdot j + a2_i \cdot j^2 \quad (4)$$

gdzie: $j = -P, -P+1, \dots, P$

Parametry paraboli wyznacza się na podstawie następujących zależności [2]:

$$a1_i = \frac{\sum_{j=1}^P j \cdot (y_{i+j} - y_{i-j})}{B} \quad (5a)$$

$$a2_i = \frac{\sum_{j=1}^P (y_{i+j} - y_{i-j})(j^2 - B) - B \cdot y_i}{D} \quad (5b)$$

$$a0_i = \frac{\sum_{j=1}^P (y_{i+j} + y_{i-j}) + y_i - C \cdot a2_i}{2P+1} \quad (5c)$$

gdzie: $B = \frac{P(P+1)}{3}$; $C = B(2P+1)$; $D = \frac{C}{15}(2P-1)(2P+3)$

y_i - zarejestrowany sygnał

Następnie, wyznaczano wartość maksymalną paraboli, która pokrywała się z wartością wyrazu wolnego równania paraboli $a0_i$ (wzór (5c)) - metodę tę oznaczono jako PARI .

Również praca [3] dotyczyła estymacji prędkości pojazdu, przy czym, poszukiwano maksimum funkcji interkorelacji dla następujących modeli pojazdu: trapez, trójkąt i prostokąt. Należy zauważyć, że metoda interkorelacji dla modelu prostokątnego pokrywa się z metodą średniej ruchomej (Moving Average):

$$YS_i = \frac{1}{2L+1} \sum_{k=-L}^L y_{i+k} \quad (6)$$

Metoda została oznaczona jako MAI.

3. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Obliczenia wykonano dla sekwencji 30 obrazów, przy czym, omówioną procedurę estymacji prędkości pojazdu stosowano oddzielnie dla każdej sekwencji 10-ciu obrazów. Jako wynik końcowy przyjmowano średnią arytmetyczną z trzech sekwencji. Zakłócenia losowe realizowano za pomocą generatora liczb losowych o rozkładzie normalnym o wartości przeciętnej równej zero oraz czterech wartościach odchylenia standardowego $\sigma = 0,25 ; 0,3 ; 0,35 ; 0,4$.

Symulacje komputerowe polegały na wykonaniu $K=400$ powtórzeń i wyznaczeniu na tej podstawie błędu estymacji. Jako pierwszy wyznaczany był błąd średnio kwadratowy MSE (Mean- Squared Error):

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{v}_k - v_d)^2 \quad (7)$$

gdzie: \hat{v}_k - oszacowanie prędkości w k-tej symulacji
 v_d - wartość dokładna prędkości.

Błąd średnio kwadratowy jest o tyle istotny, że ujmuje on łącznie błąd obciążenia estymatora jak również jego wariancję [1, s.17]:

$$MSE = V(\hat{v}) + b(\hat{v})^2 \quad (8)$$

gdzie: $V(\hat{v})$ - wariancja estymatora
 $b(\hat{v})$ - obciążenie estymatora.

Kolejno wyznaczano wartość błędu RMSE (Root Mean- Squared Error):

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (9)$$

Jako ostatni, wyznaczano błąd RRMSE (Relative Root Mean- Squared Error):

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{\hat{v}_k - v_d}{v_d} \right)^2} \quad (10)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (7).

Przy poczynionych założeniach (p.2), prędkość pojazdu $v_d = 90 \frac{km}{godz.}$ odpowiadała przemieszczeniu modelu pojazdu o jeden piksel w ciągu jednej sekundy, tzn. położenie pojazdu w dwóch kolejnych obrazach różni się o jeden piksel. Oznacza to, że we wzorze (8) należy przyjąć $v_d = 1$, czyli wzór (8) prowadzi do tych samych wyników, co wzór (7).

W pierwszej kolejności ustalono wartość M , decydującą o rezultatach testu odległości piksela od mediany – w wyniku testu obserwacja była odrzucana, bądź też uwzględniona. Dla wszystkich trzech metod: WWI, PARI, MAI wyznaczono wartość optymalną wynoszącą $MI=7$, która zapewniła minimalną wartość błędu średniokwadratowego.

Omówione metody bazowały na wzorze (3), tzn. wyznaczano wartość średnią dla trzech kolejnych sekwencji 10-ciu obrazów.

W trakcie obliczeń sprawdzono inny wariant polegający na uwzględnieniu sekwencji 30 obrazów bez rozbijania na segmenty 10-cio elementowe. Wyznaczona wartość optymalna – ze względu na najmniejszą wartość błędu $rmse$ - odległości wartości piksela od mediany wyniosła $MII=17$ dla wszystkich trzech metod oznaczonych: WWII, PARI, MAII.

W tabeli 1 zamieszczono błędy wyników estymacji prędkości pojazdu uzyskane na drodze symulacji komputerowych ($K=400$). Kolejne kolumny zawierają: odchylenie standardowe zakłócenia σ , wartość oszacowania prędkości \hat{v} , obciążenie estymatora $b(\hat{v})$ oraz błąd średnio kwadratowy $RMSE$.

Tabela 1 Błędy wyników estymacji prędkości pojazdu

| σ | Metoda WWI | | | Metoda WWII | | |
|----------|-------------|--------------|--------|-------------|--------------|--------|
| | \hat{v} | $b(\hat{v})$ | $RMSE$ | \hat{v} | $b(\hat{v})$ | $RMSE$ |
| 0,25 | 0,9906 | -0,0094 | 0,0739 | 0,9948 | -0,0052 | 0,0304 |
| 0,30 | 0,9723 | -0,0277 | 0,0963 | 0,9837 | -0,0163 | 0,0501 |
| 0,35 | 0,9516 | -0,0484 | 0,1222 | 0,9651 | -0,0349 | 0,0805 |
| 0,40 | 0,9151 | -0,0849 | 0,1944 | 0,9347 | -0,0653 | 0,1223 |
| | Metoda PARI | | | Metoda PARI | | |
| 0,25 | 0,9909 | -0,0091 | 0,0649 | 0,9965 | -0,0035 | 0,0259 |
| 0,30 | 0,9838 | -0,0162 | 0,0793 | 0,9858 | -0,0142 | 0,0459 |
| 0,35 | 0,9629 | -0,0371 | 0,1048 | 0,9625 | -0,0375 | 0,0791 |
| 0,40 | 0,9143 | -0,0857 | 0,2265 | 0,9258 | -0,0742 | 0,1335 |
| | Metoda MAI | | | Metoda MAII | | |
| 0,25 | 0,9934 | -0,0066 | 0,0616 | 0,9978 | -0,0022 | 0,0219 |
| 0,30 | 0,9985 | -0,0015 | 0,0851 | 1,0048 | 0,0048 | 0,0676 |
| 0,35 | 0,9639 | -0,0361 | 0,1072 | 0,9637 | -0,0363 | 0,0820 |
| 0,40 | 0,9346 | -0,0654 | 0,1582 | 0,9344 | -0,0654 | 0,1188 |

Źródło: opracowanie własne

Oprócz wartości MI oraz MII, które wyznaczono wspólnie dla trzech metod, określono wartości dalszych parametrów, oddzielnie dla poszczególnych metod. Jako kryterium optymalności przyjęto minimum wartości błędu średniokwadratowego.

W przypadku metody dwustronnego wygładzania wykładniczego określono wartość stałej wygładzania $a = 0,22$. W metodzie aproksymacji parabolicznej (wzory (5)) ustalono wartość $P = 6$, co oznacza rozmiar okna $2P+1 = 13$. Dla metody średniej ruchomej (wzór(6)) optymalna wartość wyniosła $L = 3$, co odpowiada oknu $2L+1 = 7$.

Podane powyżej wartości optymalne parametrów stanowią pewien kompromis. Mianowicie, w trakcie symulacji komputerowych zmieniano poziom zakłócenia poprzez zmianę odchylenia standardowego σ , które przyjmowało wartości $\sigma = 0,25; 0,30; 0,35; 0,40$. Okazało się, że dla konkretnej metody, zmiana poziomu zakłócenia wpływała na wielkość optymalnych wartości. Uwzględnienie tego faktu oznaczałoby opracowanie filtru adaptacyjnego. Filtr ten w pierwszej kolejności wyznaczałby poziom zakłócenia (wartość $\hat{\sigma}$) a następnie obliczał optymalne wartości parametrów zależne od oszacowania poziomu zakłócenia $\hat{\sigma}$. Filtr ten ma jednak podstawową wadę wyrażającą się dużą złożonością obliczeniową.

Z tabeli 1 wynika, że niezależnie od rozpatrywanej metody, wariant II prowadzi do błędu $rmse$ niemal dwukrotnie mniejszego niż błąd $rmse$ metody I. Oznacza to, że nie należy wyznaczać wartości średniej dla trzech sekwencji 10-ciu obrazów (wzór(6)), lecz prowadzić obliczenia dla całej sekwencji 30-tu obrazów. W związku z powyższym, dalsze porównania wyników zostaną ograniczone do trzech ostatnich kolumn tabeli 1 (wariant II). Odnośnie wartości obciążenia estymatora należy rozróżnić dwa poziomy zakłócenia .

Dla $\sigma = 0,25$ oraz $\sigma = 0,30$ najmniejsze wartości obciążenia $b(\hat{v})$ uzyskano w metodzie MAII a największe dla WWII. Natomiast, dla $\sigma = 0,35$ oraz $\sigma = 0,40$ najmniejsze wartości obciążenia $b(\hat{v})$ uzyskano w metodzie WWII a największe dla PARII.

W przypadku błędu średniokwadratowego sytuacja zmienia się dla poszczególnych poziomów zakłócenia. Poniżej zamieszczono wyniki, gdzie literą r oznaczono wartość $rmse$:

$$\begin{aligned} \text{dla } \sigma = 0,25 : r_{MAII} < r_{PARII} < r_{WWII} \\ \text{dla } \sigma = 0,30 \text{ i } \sigma = 0,35 : r_{PARII} < r_{WWII} < r_{MAII} \\ \text{dla } \sigma = 0,40 : r_{MAII} < r_{WWII} < r_{PARII} \end{aligned} \quad (11)$$

Oprócz osiągalnej dokładności algorytmu równie ważna jest złożoność obliczeń.

Dla wszystkich trzech metod, wspólną częścią algorytmu jest poszukiwanie maksimum – w związku z czym nie będzie brane pod uwagę.

Uwzględniając wzory (1) i (2) stwierdza się, że złożoność obliczeniowa dwustronnej metody wygładzania wykładniczego wynosi $Z_w = 6 \cdot N$.

Ze wzorów (5b) i (5c) wynika złożoność obliczeniowa metody aproksymacji parabolicznej $Z_P = 5 \cdot N \cdot (P+1)$. Ze wzoru (6) otrzymuje się złożoność obliczeniową metody średniej ruchomej $Z_{MA} = 2L \cdot N$. Biorąc pod uwagę optymalne wartości $P=6$ oraz $L=3$, uzyskuje się następujące wielkości:

$$Z_w = 6 \cdot N, \quad Z_P = 35 \cdot N, \quad Z_{MA} = 6 \cdot N \quad (12)$$

Zdecydowanie najgorzej wypada metoda aproksymacji parabolicznej. Pozostałe dwie metody wykazują jednakową złożoność obliczeniową – dzieje się tak, ponieważ $L=3$. Dla $L > 3$ złożoność metody MA będzie większa, niż złożoność metody dwustronnego wygładzania.

4. WNIOSKI

W pracy zaprezentowano metodę estymacji prędkości pojazdu na podstawie obrazu zarejestrowanego przez kamerę wideo, zawierającego zakłócenia o wysokim poziomie. Algorytm wykorzystuje metodę wygładzania (wyrównywania) wykładniczego Browna (wzór (1)). W pracy zaproponowano dwustronną metodę wygładzania wykładniczego (wzory (1) i (2)), która prowadzi do mniejszego błędu *rmse*, niż metoda Browna (wzór (1)). Wyniki proponowanej metody porównano z metodą aproksymacji parabolicznej [2] oraz metodą średniej ruchomej [3].

W trakcie symulacji komputerowych rozpatrzono wykorzystanie filtru medianowego do wstępnej obróbki sygnału. Niestety, uzyskiwano wartości *rmse* niemal dwukrotnie większe, niż dla pozostałych metod - w związku z czym nie umieszczono wyników dla tej metody.

Uwzględniając wartości błędu średniokwadratowego (wzór (11)) oraz złożoność poszczególnych algorytmów (wzór (12)), należy polecić metodę dwustronnego wygładzania wykładniczego oraz metodę średniej ruchomej.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Krzyśko M.: *Statystyka matematyczna. Cz.II*, Poznań, UAM 1997
- [2] Purczyński J.: *Estimation of the Mean Velocity of a Group of Vehicles in Strong Random Noise Conditions*, Series: Communications in Computer and Information Science No 104, TST, Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2010, pp.168-174
- [3] Purczyński J.: *Estymacja prędkości pojazdu w warunkach silnych zakłóceń losowych z wykorzystaniem funkcji interkorelacji*, Logistyka nr 6/2010 str. 2839-2846 (CD-ROM)
- [4] Zeliaś A., Pawełek B., Wanat S.: *Prognozowanie ekonomiczne Teoria, Przykłady, Zadania*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2003

Praca finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Projekt badawczy Nr N N509 399136 „Estymacja trajektorii ruchu pojazdów z wykorzystaniem analizy bayesowskiej oraz algorytmów cyfrowego przetwarzania obrazów”).