

# Rozpoznawanie cyfr arabskich pisanych ręcznie na podstawie sygnałów z 3-osiowego akcelerometru za pomocą metody DTW z uwzględnieniem różnych kryteriów detekcji

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono algorytm opracowany do przetwarzania sygnałów pomiarowych z 3-osiowego akcelerometru, które przyjęto do opisu ruchu pióra podczas odręcznego pisania cyfr. Do rozpoznawania wspomnianych symboli zastosowano metodę DTW z uwzględnieniem różnych kryteriów detekcji. W artykule zaprezentowano wyniki oceny dokładności rozpoznawania cyfr arabskich. Wykazano, że dokładność rozpoznawania cyfr arabskich metodą DTW zależy od przyjętego kryterium detekcji.

**Abstract.** The article presents an algorithm developed for processing measurement signals from a 3-axis accelerometer, which was adopted to describe the movement of the pen when writing digits by hand. The DTW method was used to recognize these symbols, taking into account different detection criteria. The article presents the results of the assessment of the accuracy of digits recognition. It has been shown that the accuracy of digits recognition using the DTW method depends on the adopted detection criterion. (*Recognition of handwritten digits on the basis of signals from a 3-axis accelerometer using the DTW method taking into account various detection criteria.*)

**Słowa kluczowe:** rozpoznawanie symboli pisanych ręcznie, akcelerometr, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, DTW

**Keywords:** handwritten symbol recognition, accelerometer, digital signal processing, DTW.

## Wstęp

W wielu ośrodkach badawczych na świecie prowadzone są prace w celu utworzenia systemu do rozpoznawania symboli (cyfr, liter, znaków) czy ciągu znaków (wyrazów, fraz) zapisywanych odręcznie za pomocą pióra lub długopisu. Rozpoznawanie pisma ręcznego jest trudne z powodu wpływu indywidualnych cech osoby piszącej, takich jak: szybkość pisania, nacisk czy kąt nachylenia długopisu. Niemniej jednak wymienione cechy biometryczne są przydatne np. w systemach identyfikacji osoby składającej podpis w tradycyjny sposób.

Do rejestracji ruchu ręki lub pióra podczas pisania ręcznego można wykorzystać różne technologie, które zostały opracowane do rozpoznawania aktywności ruchowej człowieka. Najczęściej stosowane są metody bazujące na analizie obrazu z kamery, które wymagają zapewnienia odpowiedniego oświetlenia na stanowisku pomiarowym. W ciągu ostatniej dekady opracowano takie rozwiązania jak m.in. ultradźwiękowe pióra, cyfrowe pióra działające w zakresie promieniowania podczerwonego czy tablety dotykowe [1].

Konkurencyjnymi rozwiązaniami są tzw. pióra elektroniczne, które za pomocą zestawu różnych czujników (umieszczonych w obudowie wewnętrznej pióra lub w dodatkowym module na zewnątrz) umożliwiają rejestrację ruchu pióra podczas pisania ręcznego [2, 3]. Powszechnie wykorzystuje się sensory przyspieszenia (akcelerometry) [4, 5], czujniki prędkości kątowej (żyroskopy) [6] oraz czujniki zmian pola magnetycznego (magnetometry) [7] wykonane w technologii MEMS. Istotną zaletą aplikacji bazujących na czujnikach ruchu jest możliwość ich bezprzewodowej obsługi.

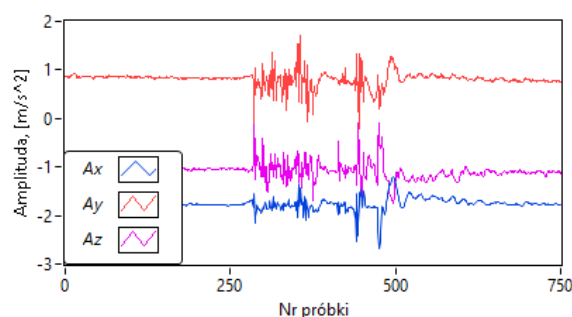
W niniejszej pracy opisano algorytm opracowany do przetwarzania sygnałów pomiarowych z 3-osiowego czujnika przyspieszenia, które zostały zarejestrowane podczas odręcznego pisania cyfr arabskich. Algorytm umożliwia wydzielenie składowych przyspieszenia liniowego dla osi X, Y, Z w celu porównania tych sygnałów z wzorcem przyjętym dla każdej z cyfr wg metody DTW [8].

W artykule przedstawiono także wyniki badań, które dotyczą oceny dokładności rozpoznawania cyfr arabskich metodą DTW z uwzględnieniem różnych kryteriów przyjętych do detekcji tych symboli.

## Stanowisko pomiarowe

Do akwizycji sygnałów reprezentujących przyspieszenie liniowe w kierunkach X, Y, Z generowane podczas ruchu pióra w trakcie zapisywania różnych symboli wykorzystano przenośny rejestrator z transmisją bezprzewodową. Rejestrator umożliwia odczyt danych z czujnika przyspieszenia oraz przesłanie zarejestrowanych sygnałów drogą radiową do komputera PC. Moduł wyposażony jest w układ nadawczy z sensorami ruchu oraz układ odbiorczy.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe sygnały pomiarowe z 3-osiowego akcelerometru zarejestrowane podczas pisania cyfry '7'.



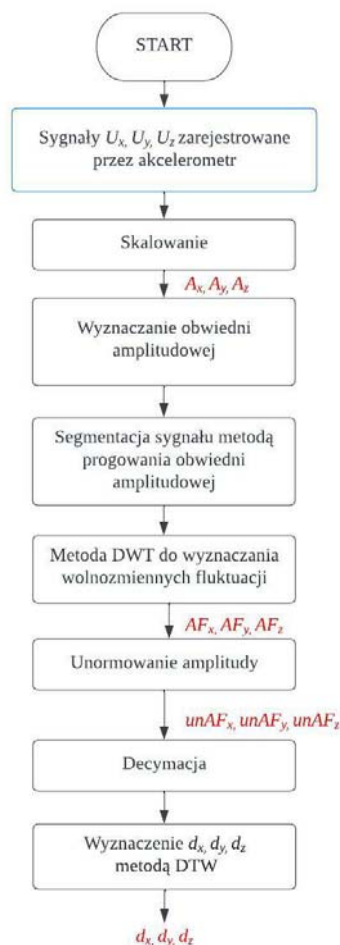
Rys. 1. Sygnały pomiarowe z 3-osiowego czujnika przyspieszenia zarejestrowane podczas pisania cyfry '7'

Pierwszy z wymienionych układów realizuje zadania związane z konfiguracją 3-osiowego akcelerometru (układ LSM6D33) oraz odpowiada za odczyt i przesyłanie danych drogą radiową. Pomiary przyspieszenia przeprowadzono w zakresie pomiarowym  $\pm 2$  g. Napięciowe sygnały wyjściowe z akcelerometru próbkowano z częstotliwością próbkowania wynoszącą 104 Hz.

Drugi układ bazujący na mikrokontrolerze STM32F030 odbiera nadesłane dane i przesyła je do komputera za pomocą złącza USB. Program do obsługi rejestratora umożliwia wizualizację danych pomiarowych i ich archiwizację do pliku.

## Przetwarzanie danych pomiarowych

Algorytm opracowany do przetwarzania danych pomiarowych z 3-osiowego akcelerometru, które reprezentują cyfry arabskie, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Algorytm przetwarzania danych pomiarowych z 3-osiowego akcelerometru zarejestrowanych podczas ręcznego pisania symboli [9]

Sygnały napięciowe z 3-osiowego akcelerometru, które reprezentują przyspieszenie wywołane ruchem pióra podczas zapisywania cyfry arabskiej, są najpierw poddawane operacji skalowania. Przyspieszenie wyrażane jest w jednostkach zgodnych z układem SI, tj. jako  $m/s^2$ . Przyjęto, że każdy zapisany symbol reprezentują trzy sygnały  $A_x, A_y, A_z$ . W celu wydzielenia z zarejestrowanego sygnału pomiarowego (oddzielnie dla każdej z osi X, Y, Z) segmentu, który odpowiada tylko zamierzonemu ruchowi ręki podczas pisania symbolu, zastosowano metodę progowania obwiedni amplitudowej tego sygnału.

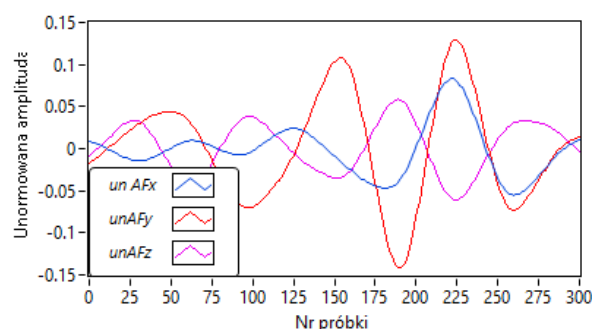
Ponadto założono, że zamierzony ruch reprezentowany jest przez składowe sygnały występujące w paśmie niskich częstotliwości (do około 4 Hz). Do usunięcia z zarejestrowanego sygnału składowej stałej oraz fluktuacji przyspieszenia o większych częstotliwościach (będących skutkiem podnoszenia i opuszczania ręki podczas zapisywania symbolu) zastosowano dyskretną transformatę falkową (DWT) [8]. Ustalono, że największą dokładność rozpoznawania cyfr arabskich można osiągnąć, jeżeli do wyodrębnienia składowych opisujących zamierzony ruch zostanie zastosowana falka „sym4”. Następnie wydzielone sygnały  $AF_x, AF_y, AF_z$  są poddawane operacji normowania amplitudy, tzn. próbki sygnału przyjmują wartości z

przedziału  $[-1, +1]$ , co w dalszym etapie znacznie ułatwia porównywanie sygnałów.

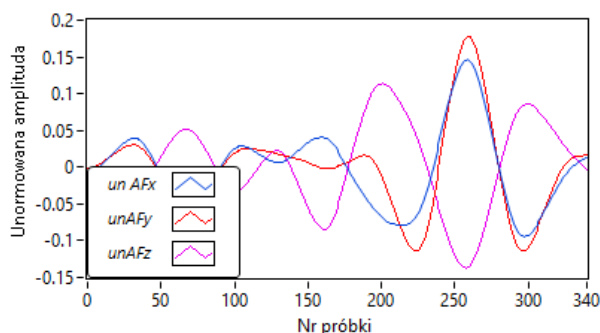
Operację normowania przeprowadzono w taki sposób, aby zachować wartość stosunku amplitud sygnałów  $AF_x, AF_y, AF_z$ . W tym celu określono wartości maksymalne dla każdego z sygnałów  $AF_x, AF_y, AF_z$ , a następnie spośród tych wartości wybrano największą ( $Max$ ). Następnie wartości próbek sygnałów  $AF_x, AF_y, AF_z$  podzielono przez  $Max$ . Operacja decymacji wymienionych sygnałów pozwala na skrócenie czasochłonnych obliczeń związanych z porównywaniem sygnału z wzorcem wg metody DTW.

Unormowane sygnały  $unAF_x, unAF_y, unAF_z$  stanowią dane wejściowe do systemu rozpoznania symboli, który polega na metodzie DTW. Porównanie symbolu z wzorcem polega na porównaniu trzech par sygnałów z uwzględnieniem osi X, Y, Z. Wynik takiego porównania jest przedstawiany w postaci  $(d_x, d_y, d_z)$ .

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono unormowane sygnały przyspieszenia  $unAF_x, unAF_y, unAF_z$ , tj. odpowiednio wzorce cyfry '5' i '7'.



Rys. 3. Wzorec przyjęty dla cyfry '5'

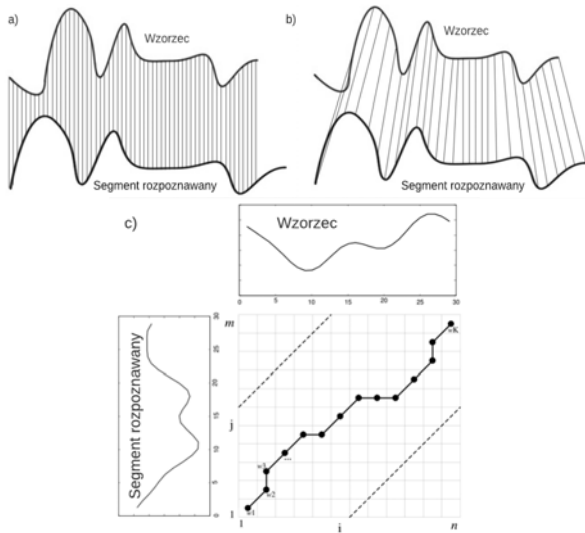


Rys. 4. Wzorec przyjęty dla cyfry '7'

## Metoda DTW

Do porównywania dwóch sygnałów, po operacji próbkowania reprezentowanych jako ciągi czasowe w różnym stopniu rozciągnięte w czasie, wykorzystuje się często tzw. metodę DTW (ang. *Dynamic Time Warping*) [9]. Wykrywanie optymalnego dopasowania dwóch sygnałów odbywa się poprzez minimalizowanie wartości sumarycznej odległości pomiędzy próbkami obu sygnałów.

Na rysunku 5 przedstawiono ideę wyznaczania odległości pomiędzy dwoma przebiegami czasowymi (tj. wzorcem i segmentem rozpoznawanym) dla dopasowania euklidesowego (rys. 5a) oraz wyznaczonego wg metody DTW (rys. 5b). Na rysunku 5c zaprezentowano graficznie wyznaczanie najkrótszej zakumulowanej ścieżki przejścia w macierzy błędu dopasowania rozpoznawanego sygnału do wzorca.



Rys. 5. Graficzna interpretacja wyznaczenia: a) odległości euklidesowej, b) odległości metodą DTW, c) zakumulowanego kosztu przejścia dla macierzy DTW

Jeden z szeregów czasowych to sygnał wzorca przyjętego dla danego symbolu ( $W_x$ ) (np. cyfry arabskiej), zaś drugi szereg czasowy reprezentuje symbol, który jest porównywany do wzorca ( $S_x$ ) w celu rozpoznania tego symbolu. Najpierw tworzona jest macierz  $d(w_{xi}, s_{xj})$  o wymiarach  $W_x \times S_x$ , której elementy mają wartości równe odległości Euklidesowej pomiędzy próbkami sygnału sprawdzanego i sygnału wzorcowego odpowiednio o numerze  $w_{xi}$  oraz  $s_{xj}$ . Następnie obliczany jest najmniejszy zakumulowany koszt przejścia pomiędzy lewym dolnym, a prawym górnym rogiem wspomnianej macierzy. Wyznaczanie tzw. odległości zakumulowanej polega na sumowaniu wartości  $d(w_{xi}, s_{xj})$  znajdujących się w węzłach, przez które się przechodzi wg określonych zasad opisanych m. in. w pracy [8]. Im obliczona w ten sposób liczba jest mniejsza, tym rozpoznawany sygnał jest bardziej podobny do wzorca.

Wartości parametrów  $d_x, d_y, d_z$  wyznaczono metodą DTW na podstawie minimalnych odległości dla trzech par sygnałów (uwzględniając osie X, Y, Z). Zakumulowaną wartość kolejnych odległości cząstkowych obliczono według wzorów:

$$(1) \quad D_{i,j} = d(w_{xi}, s_{xj}) + \min\{D_{i,j-1}, D_{i-1,j}, D_{i-1,j-1}\}$$

gdzie:  $d(w_{xi}, s_{xj}) = \sqrt{(w_{xi} - s_{xj})^2}$ ,

$$(2) \quad d_x = DTW(W_x, S_x)$$

gdzie:  $d_x$  - sumaryczna wartość odległości wyznaczona dla wzorca i rozpoznawanego sygnału (dla osi X).

### Kryteria przyjęte do rozpoznawania cyfr

Odległości  $d_x, d_y, d_z$  (otrzymane w wyniku porównania rozpoznawanego symbolu z przyjętym wzorcem wg metody DTW) wykorzystano do określenia kryterium do rozpoznawania cyfr arabskich. W celu ustalenia kryterium, które zapewni największą dokładność rozpoznawania cyfr przeprowadzono badania z uwzględnieniem czterech kryteriów.

Wzory (3)-(6) definiują przyjęte kryteria:

$$(3) \quad K_1 = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$$

$$(4) \quad K_2 = \sqrt[3]{d_x \cdot d_y \cdot d_z}$$

$$(5) \quad K_3 = \frac{3}{\frac{1}{d_x} + \frac{1}{d_y} + \frac{1}{d_z}}$$

$$(6) \quad K_4 = \frac{d_x + d_y + d_z}{3}$$

gdzie:  $d_x, d_y, d_z$  - odległości uzyskane w wyniku porównywania sygnałów metodą DTW z uwzględnieniem osi X, Y i Z.

### Wyniki wstępnych badań

W celu badania wpływu kryterium detekcji na dokładność rozpoznawania cyfr arabskich utworzono własną bazę danych, która zawiera dane pomiarowe z 3-osiowego akcelerometru zarejestrowane podczas pisania ręcznego cyfr arabskich. W akwizycji danych uczestniczyło kilka osób w różnym wieku. Każda z osób wielokrotnie zapisywała poszczególne cyfry (20 razy), przy czym zapis tej samej cyfry odbywał się w wolnym, normalnym i szybkim tempie z zachowaniem kilkusekundowej przerwy pomiędzy kolejnymi zapisami. Dla każdej cyfry arabskiej przyjęto jeden wzorec, z którym porównano kolejne powtórzenia tej samej cyfry pisane przez daną osobę. Jako wartości progowe determinujące zakwalifikowanie danego powtórzenia cyfry jako poprawnie rozpoznany przyjęto średnią wartość dla danego kryterium wyznaczoną na podstawie kilkudziesięciu powtórzeń zapisanych przez jedną osobę. Powtórzenia, które przekroczyły wartość progu uznano za błędnie rozpoznane.

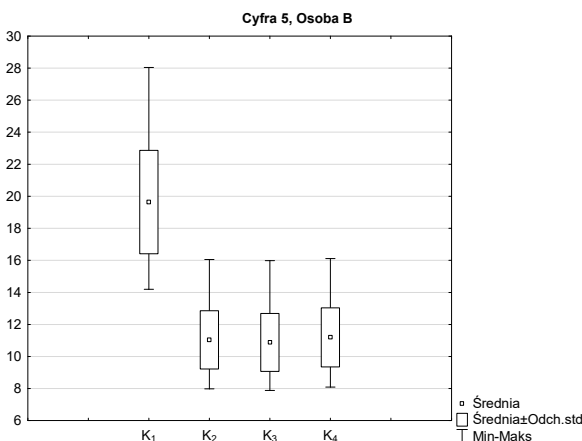
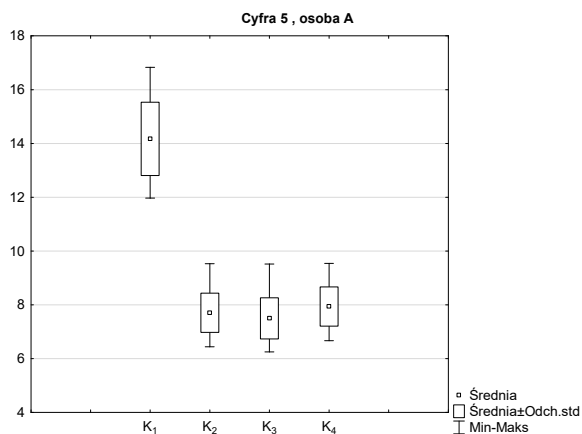
W tabeli 1 zestawiono wyniki dotyczące dokładności rozpoznawania cyfr arabskich, które uzyskano dla przyjętego kryterium.

Tabela 1. Wyniki rozpoznawania cyfr arabskich za pomocą kryteriów  $K_1, K_2, K_3, K_4$

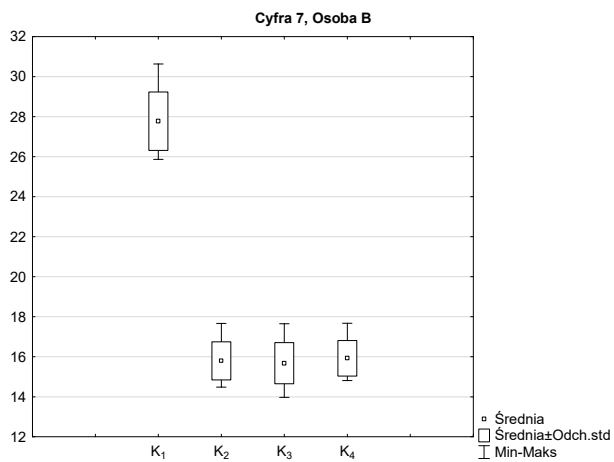
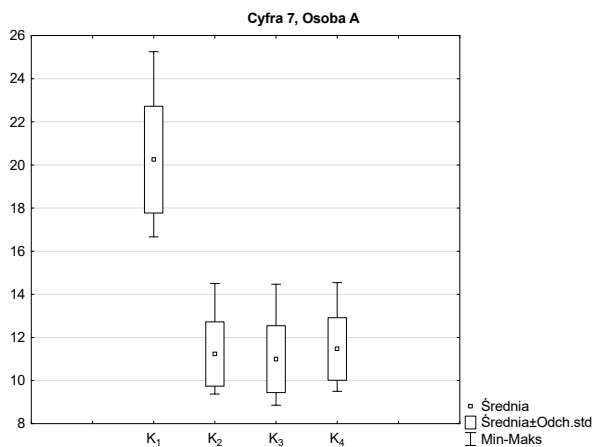
| Cyfra | Dokładność rozpoznawania, % |       |       |       |
|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|       | $K_1$                       | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ |
| 0     | 63,16                       | 73,68 | 52,63 | 68,42 |
| 1     | 57,89                       | 63,16 | 63,16 | 57,89 |
| 2     | 50,00                       | 70,00 | 60,00 | 60,00 |
| 3     | 68,42                       | 73,68 | 68,42 | 68,42 |
| 4     | 73,68                       | 52,63 | 68,42 | 84,21 |
| 5     | 81,25                       | 75,00 | 87,50 | 68,75 |
| 6     | 70,00                       | 70,00 | 60,00 | 60,00 |
| 7     | 73,68                       | 73,68 | 63,16 | 73,68 |
| 8     | 83,33                       | 50,00 | 66,67 | 88,89 |
| 9     | 55,56                       | 77,78 | 77,78 | 72,22 |

Największą dokładność rozpoznawania osiągnięto dla cyfr 5 i 8 (ponad 80 % dla dwóch spośród czterech kryteriów). Łatwo można zauważyć, że kryterium  $K_2$  umożliwia najdokładniejsze rozpoznawanie siedmiu spośród dziesięciu cyfr, co jest najlepszym wynikiem. Porównywalną dokładność rozpoznawania uzyskano w pracach [7, 10] wykorzystując jedynie sygnały przyspieszenia, które posłużyły do określenia parametrów dokładności na podstawie metody DTW.

W kolejnym etapie badań wyznaczono rozrzuty wyników wokół wartości średnich dla kryteriów  $K_1, K_2, K_3$  i  $K_4$  z udziałem dwóch osób piszących (A i B). Na rysunkach 6 i 7 zostały przedstawione przykładowe wyniki badań dla cyfr 5 i 7.



Rys. 6. Rozrzut wartości przyjętych kryteriów dla cyfry 5 – osoba A i osoba B



Rys. 7. Rozrzut wartości przyjętych kryteriów dla cyfry 7 – osoba A i osoba B

Porównania dokonano z udziałem dwóch osób piszących sprawdzając wpływ cech biometrycznych na dokładność rozpoznawania cyfr arabskich. Jako wzorzec powtórnie przyjęto jedno z powtórzeń każdej z cyfr wykonane przez osobę A, następnie porównano kolejne powtórzenia danej cyfry zapisane przez osobę A i osobę B. Największe wartości średnie, rozpiętość wartości oraz ich rozrzut cechują kryterium  $K_1$ . Różne wartości średnie oraz ich rozrzut uzyskane dla osoby A i B w przypadku rozpoznawania tej samej cyfry arabskiej świadczą o dużym wpływie cech biometrycznych osoby piszącej na dokładność rozpoznawania symboli. Łatwo zauważyć, że wartości średnie przyjętych kryteriów nie są takie same dla różnych cyfr arabskich.

## Podsumowanie

W niniejszej pracy opisano szczegółowo algorytm opracowany do przetwarzania sygnałów pomiarowych z 3-osiowego akcelerometru, które reprezentują cyfrę arabską zapisaną ręcznie długopisem. Przedstawiono wyniki badań dotyczące dokładności rozpoznawania cyfr metodą DTW w zależności od przyjętego kryterium. Dokładność rozpoznawania cyfr arabskich metodą DTW nie przekracza 90%. Niestety nawet najlepsze kryterium nie zapewnia dużej dokładności rozpoznawania wszystkich cyfr arabskich. W ramach kontynuacji badań do rozpoznawania cyfr zostaną wykorzystane także sygnały pomiarowe z żyroskopu.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019–2022, nr projektu 027/RID/2018/19, kwota finansowania 11 999 900 zł.

**Autor:** mgr inż. Małgorzata Augustyn, Politechnika Rzeszowska, Katedra Metrologii i Systemów Diagnostycznych, ul. W. Pola, 35-959 Rzeszów, e-mail: m.augustyn@prz.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Guilbert J., Alamargot D., Morin M.-F., Handwriting on a tablet screen: Role of Visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults, *Human Movement Science* 65, (2019), 30-41
- [2] Pan T.-Y., Kuo Ch.-H., Liu H.-T., Hu M.-Ch., Handwriting Trajectory Reconstruction Using Low-Cost IMU, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, No. 3, (Czerwiec 2019), 261-270
- [3] Pan T.-Y., Kuo Ch.-H., Hu M.-Ch., A noise reduction method for IMU and its application on handwriting trajectory reconstruction, *2016 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*, (2016)
- [4] Wang J.-S., Hsu Y.-L., Chu C.-L., Online Handwriting Recognition Using an Accelerometer-Based Pen Device, *2nd International Conference on Advances in Computer Science and Engineering (CSE 2013)*, (2013), 229-232
- [5] Wang J.-S., Chuang F.-C., An accelerometer-based digital pen with a trajectory recognition algorithm for handwritten digit and gesture recognition, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, No. 59, (July 2012), 2998–3007
- [6] Griechisch E., Malik M.I., Liwicki M., Online Signature Verification using Accelerometer and Gyroscope, *16<sup>th</sup> Biennial Conference of the International Graphonomics Society*, (June 2013), 143-146
- [7] Hsu Y.-L., Chu Ch.-L., Tsai Y.-J., Wang J.-S., An Inertial Pen With Dynamic Time Warping Recognizer for Handwriting and Gesture Recognition, *IEEE Sensors Journal*, No.15, (January 2015), 154-163
- [8] Zieliński T., *Cyfrowe Przetwarzanie Sygnałów. Od teorii do zastosowań*, WKiŁ, (2016)
- [9] Wilk B., Augustyn M.: Parametrization of the acceleration signals recorded during handwriting, *IEEE Signal Processing Symposium*, (2019), 189-192
- [10] Han B.-K., Lim J.G., Kwon D.-S., Acceleration Feature Extraction for Handwritings with Natural Similarities, *ICROS-SICE International Joint Conference*, (2009), 1095-1099