

OKREŚLANIE PUNKTÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH PRZESTRZENI PARAMETRYCZNEJ W SYSTEMACH ROZPOZNAWANIA ZNAKÓW

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę automatycznego rozpoznawania kodów adresowych na przesyłkach pocztowych. Rozpoznawanie kodów pocztowych jest kluczowym elementem systemu maszyn sortujących w węzłach pocztowych. Kod pocztowy, najczęściej zapisany w postaci z cyfr może być przedstawiony w postaci obrazów reprezentujących pojedyncze znaki. Ze względu na to, że obrazy znaków zawierają zniekształcenia, zaproponowano transformację obrazu do przestrzeni parametrów, gdzie możliwe będzie przeprowadzenie operacji normalizacji i korekcji rotacji, a ponadto możliwe będzie przetwarzanie obrazu w skali szarości wraz z zakłóceniami specyficznymi dla systemów pocztowych. Zastosowano metodę bazującą na parametryzacji wydzielonych obszarów w otoczeniu punktów charakterystycznych, która pozwala na wprowadzenie do wektora cech znaku wielkości niezależnych od rotacji obrazu znaku. Metoda może być zastosowana zarówno dla transformaty Radona, jak również jej modyfikacji. Dużą zaletą jest to, że zaproponowane rozwiązanie może być dowolnie rozwijane ze względu na inne techniki opisu wydzielonych obszarów, np. wyznaczanie cech bazujących na teksturze wydzielonego obszaru.

WSTĘP

W dynamicznie zmieniających się warunkach geopolitycznych istotne jest, aby usługi takie jak transport zbiorowy, dostawy wody, łączność, czy usługi pocztowe były utrzymywane w dobrej jakości. Sprawne działanie systemu logistycznego ma kluczowe znaczenie dla jakości usług pocztowych i bezpieczeństwa przesyłek. Coraz więcej firm realizujących usługi pocztowe musi uwzględniać w swym działaniu elementy cyberbezpieczeństwa. Wiąże się to z większą liczbą systemów informatycznych uwzględniających systemy automatycznego przetwarzania obrazu. Sprawna identyfikacja przesyłek pozwala na zapewnienie bezpieczeństwa wewnętrznego (ochrony przesyłki), zwłaszcza w następujących obszarach: poufności, spójności i dostępności korespondencji oraz niezaprzeczalności autorstwa. Pomimo szeregu rozwiązań stosowanych w dziedzinie automatycznej identyfikacji kodów pocztowych uzyskiwane wyniki, w szczególności dla pisanych ręcznie nadal są niezadowolające (przesyłki opisane ręcznie stanowią 30% całości). Kod pocztowy składający się z cyfr może być przedstawiony w postaci obrazów reprezentujących pojedyncze znaki. Obrazy znaków zawierają szumy i zakłócenia oraz mogą być poddane przekształceniom obrotu czy zmiany skali. Sytuacja taka utrudnia bezpośrednie wyznaczenie cech znaku oraz późniejszą identyfikację. W związku z czym zaproponowano transformację obrazu do przestrzeni parametrów, gdzie możliwe będzie przeprowadzenie operacji normalizacji i korekcji rotacji, a ponadto możliwe będzie przetwarzanie obrazu w skali szarości wraz z zakłóceniami specyficznymi dla systemów pocztowych.

1. ZASTOSOWANIE DANYCH PRZESTRZENI PARAMETRYCZNEJ W ZADANIU ROZPOZNAWANIA INFORMACJI TELEADRESOWYCH

Dane obrazu znaku przedstawione w postaci reprezentacji parametrycznej (np. uzyskane za pomocą transformaty Radona) zawierają istotne informacje pozwalające na opis znaku, a także na wyznaczenie szeregu cech umożliwiających przyporządkowanie do odpowiedniej klasy. Parametryczna reprezentacja fragmentów znaku (np. linii prostych) uzyskiwana w postaci lokalnych maksimów tablicy akumulatora pozwala opisać informację zawartą w obrazie

znaku. Przeprowadzona analiza przestrzeni parametrycznej obrazów z własnej bazy znaków (tabela 1) pozwoliła na obserwacje podobnych rozkładów (pod względem liczby wartości maksymalnych) w ramach poszczególnych klas znaków. Możliwe jest więc rozpatrywanie liczby i rozkładu lokalizacji maksimów reprezentacji parametrycznej jako cechy obrazu znaku na podstawie której, będzie on sklasyfikowany.

1.1. Transformata obrazu znaku

Wykorzystując rozkład osłabienia (absorpcji) wiązki promieniowania w obiekcie można na podstawie obliczeń serii pomiarów tzw. projekcji, zrekonstruować obraz obiektu. Realizowane jest to z zastosowaniem m.in. metod algebraicznych, iteracyjnych, Fouriera lub projekcji wstecznej [5,6]. Proces uzyskiwania pojedynczych projekcji sprowadza się do analizy wiązki promieni równoległych (rysunek 1) na oś powstałą w wyniku obrotu osi x o pewien kąt. Uwzględniając proces uzyskiwania pojedynczych projekcji $P\theta(x')$ można przedstawić w postaci [1,2]:

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - x') dx dy \quad (1)$$

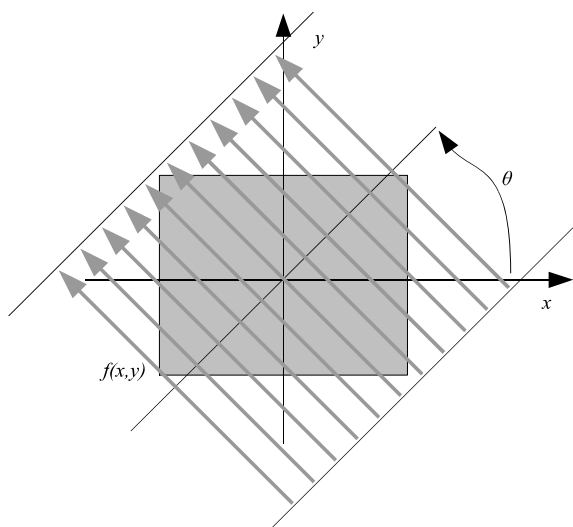
gdzie

$$\delta(x \cos \theta + y \sin \theta - x') \quad (2)$$

jest funkcją delta o wartości różnej od zera tylko dla argumentu równego 0, oraz:

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

x' jest odległością prostej prostopadłej do wiązki od środka.



Rys. 1. Przykładowa projekcja dla wybranego konta
Źródło: Opracowanie własne

Zastosowana we wzorze (1) podwójna całka wskazuje na sumowanie wartości funkcji $f(x,y)$ dla zmiennych x i y (stąd przyrosty dx i dy). Otrzymany w ten sposób wzór przekształcenia nosi nazwę transformacji Radona. Podobnie jak w przypadku transformaty Hougha w celu obliczenia transformaty konieczna jest odpowiednia reprezentacja przestrzeni parametrów. W standardowych implementacjach każdy wymiar przestrzeni parametrów podlega kwantyzacji i zawężeniu do odpowiedniego przedziału. W wyniku takiego postępowania otrzymuje się tablicę (akumulator), której komórki są zwiększane, gdy krzywa analityczna określona współrzędnymi (ρ, θ) przechodzi przez punkt obiektu na obrazie. Z tym, że proces sumowania uwzględnia wartość punktów obrazu $f(x,y)$.

1.2. Wydzielanie punktów charakterystycznych przestrzeni parametrycznej

W przedstawionych m.in. w pracach [3,4] metodach wydzielenia cech, podstawowymi informacjami uzyskiwanymi z reprezentacji przestrzeni parametrycznej są lokalne maksima, które odpowiadają punktom przecięcia linii (lub ich przedłużenia) opisujących kształt badanego znaku. Za pomocą lokalnych maksimów przestrzeni parametrycznej można utworzyć reprezentację obrazu znaku. Dodatkowe informacje to: współrzędne oraz wartość ekstremów (wartość komórki akumulatora odpowiadająca współrzędnym maksimum) w przestrzeni parametrycznej. W rezultacie daje to możliwość sformułowania wektora cech badanego obrazu znaku. Rozmiary reprezentacji parametrycznej transformaty Radona określone są za pomocą parametrów (ρ, θ) . Ustalając zmiany kąta obrotu co jeden stopień otrzymamy 180-kolumnową reprezentację parametryczną. Natomiast uwzględniając rozmiar obrazu $m \times n$, jednostkowe zmiany długości promienia ρ oraz zależność:

$$\rho = \left[\frac{m}{2} \sqrt{2} \right] \tag{4}$$

to uzyskany zakres zmian długości promienia mieści się w przedziale $(-\rho, \dots, 0, \dots, \rho)$. Np. dla obrazu o wymiarach 128x128 uzyskamy więc 183 wiersze reprezentacji transformaty Radona.

Rozpatrując tablice akumulatora możliwe jest określenie następujących parametrów:

- liczba maksimów tablicy akumulatora

$$l_{\max} \tag{5}$$

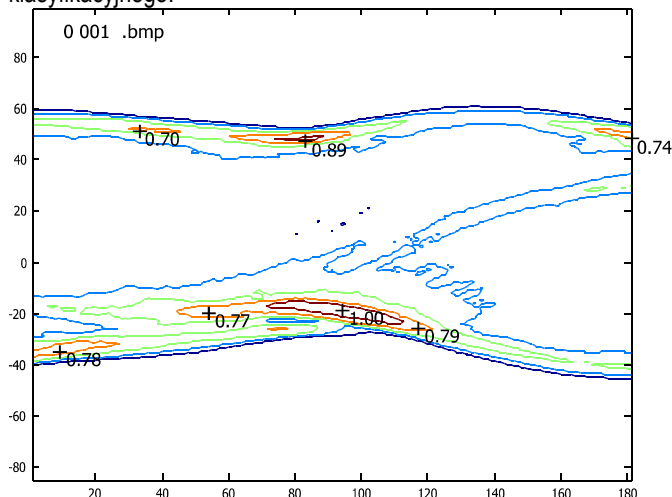
- zbiór wartości maksimów tablicy akumulatora

$$\{wm_1, \dots, wm_{l_{\max}}\} \tag{6}$$

- zbiór współrzędnych maksimów akumulatora

$$\{(\theta_1, \rho_1), \dots, (\theta_{l_{\max}}, \rho_{l_{\max}}), (wm_{l_{\max}})\} \tag{7}$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy przestrzeni parametrycznych bazy obrazów znaków (tabela 1) można stwierdzić, iż dla różnych klas znaków (jak również ich podzbiorów) liczba maksimów jest na tyle zróżnicowana, że sama nie może stanowić kryterium klasyfikacyjnego.



Rys. 2. Rozmieszczenie wartości maksymalnych dla wybranego znaku ze zbioru ZT1. Źródło: Opracowanie własne

W związku z powyższym niezbędne jest wyznaczenie dla każdego maksimum odpowiadającej mu wartości w_m reprezentacji parametrycznej oraz współrzędnych położenia.

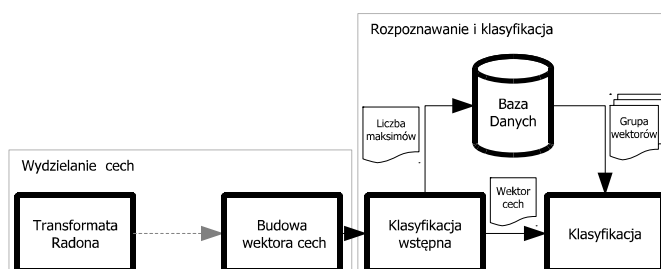
Tab. 1. Przedziały liczby maksimów lokalnych akumulatora transformaty Radona dla obrazów z własnej bazy znaków (BZ1)

| Znaki | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| lmax | 4-10 | 1-4 | 2-5 | 3-10 | 3-8 | 3-9 | 2-10 | 2-4 | 3-10 | 3-9 |

Wyniki analizy dla własnej bazy obrazów znaków zostały przedstawione w tabeli 1. Przykładowe rozmieszczenie wartości maksymalnych dla wybranych znaków ze zbioru Z1 zostało przedstawione na rysunku 2. Na podstawie powyższego wektor cech punktów charakterystycznych (CPC) można zapisać w postaci:

$$FV_{CPC} = \{l_{\max}, ((w_{m1}, w_{\theta1}, w_{\rho1}), \dots, (w_{ml_{\max}}, w_{\theta l_{\max}}, w_{\rho l_{\max}}))\} \tag{8}$$

Wektor cech dla każdego znaku składa się z dwóch części. Pierwsza zawiera liczbę maksimów, druga przechowuje jego wartości w_m oraz ich współrzędne. Wartość pierwszego maksimum ze względu na zastosowanie znormalizowanej tablicy akumulatora będzie równa jedności. Rozdzielenie wektora na części pozwala na przeprowadzenie klasyfikacji wstępnej, bazującej np. na liczbie punktów maksymalnych.



Rys. 3. Schemat klasyfikacji wstępnej. Źródło: Opracowanie własne

Schemat klasyfikacji wstępnej przedstawiony na rysunku 3 opiera się na analizie liczby maksimum lokalnych uzyskanych w procesie tworzenia wektora cech. Na podstawie tego parametru określana jest grupa wektorów z bazy danych, które należy dostarczyć do klasyfikatora w celu porównania ich z wektorem znaku badanego. Długość wektora cech (największa liczba punktów maksimum lokalnych) została ustalona na podstawie przeprowadzonych badań z wykorzystaniem własnej bazy znaków. W związku z tym, określono skuteczność metody ze względu na liczbę maksimum lokalnych (l_{max}). Zwiększono l_{max} w zakresie od 1 do 10. Okazało się, że liczba poprawnie sklasyfikowanych znaków była największa dla wektora cech o 5 maksimumach, natomiast dalsze zwiększanie liczby l_{max} skutkowało spadkiem liczby poprawnie sklasyfikowanych znaków.

Tab. 2. Parametry wektora cech FVCPC dla zestawu ZT1

| Cyfra | l_{max} | $w_{m\theta 1}$ | $w_{m\rho 1}$ | w_{m2} | $w_{m\theta 2}$ | $w_{m\rho 2}$ | w_{m3} | $w_{m\theta 3}$ | $w_{m\rho 3}$ | w_{m4} | $w_{m\theta 4}$ | $w_{m\rho 4}$ | w_{m5} | $w_{m\theta 5}$ |
|-------|-----------|-----------------|---------------|----------|-----------------|---------------|----------|-----------------|---------------|----------|-----------------|---------------|----------|-----------------|
| 0 | 5 | 121 | 68 | 0,9 | 110 | 134 | 0,8 | 35 | 52 | 0,5 | 2 | 137 | 0,5 | 16 |
| 1 | 2 | 101 | 83 | 0,9 | 71 | 105 | | | | | | | | |
| 2 | 4 | 120 | 81 | 0,7 | 29 | 64 | 0,6 | 128 | 112 | 0,6 | 87 | 126 | | |
| 3 | 4 | 56 | 97 | 1,0 | 110 | 52 | 0,8 | 107 | 131 | 0,7 | 130 | 106 | | |
| 4 | 4 | 30 | 109 | 1,0 | 36 | 82 | 0,9 | 150 | 104 | 0,6 | 53 | 91 | | |
| 5 | 6 | 85 | 121 | 0,8 | 58 | 84 | 0,8 | 91 | 58 | 0,7 | 124 | 113 | 0,6 | 152 |
| 6 | 2 | 132 | 108 | 0,5 | 96 | 94 | | | | | | | | |
| 7 | 3 | 130 | 87 | 0,8 | 77 | 81 | 0,7 | 91 | 117 | | | | | |
| 8 | 3 | 65 | 82 | 0,9 | 147 | 100 | 0,5 | 20 | 97 | | | | | |
| 9 | 3 | 59 | 88 | 0,7 | 138 | 61 | 0,7 | 109 | 142 | | | | | |

Na podstawie powyższego w bloku klasyfikacji wstępnej utworzono pięć grup znaków, gdzie numer grupy odpowiada liczbie maksimum lokalnych. W przypadku znaków o większej liczbie maksimum wybierane są te z największymi wartościami akumulatora. Przykładowe parametry wektora cech dla zestawów testowych (ZT1) zostały przedstawione w tabeli 2.

1.3. Wydzielanie obszarów połączonych przestrzeni parametrycznej

W drugiej metodzie wektor cech wyznaczany jest na podstawie obszarów połączonych (BLOB). Metoda ta bazuje na wyznaczaniu parametrów geometrycznych wydzielonych obszarów reprezentacji transformaty Radona. Rozpatrując tablice akumulatora, dla której wyznaczane są cechy w następujący sposób:

a) określa się granice obszarów na podstawie współrzędnych maksimum lokalnych z zastosowaniem progowania elementów macierzy:

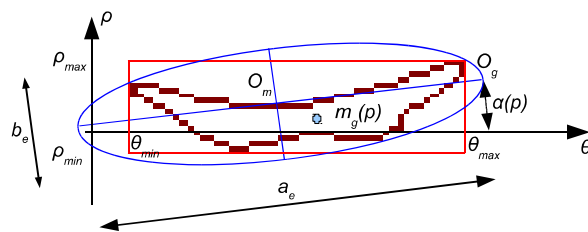
$$\hat{A}_{cu}(\rho, \theta) = \begin{cases} \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) \geq thr \\ 0 & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) < thr \end{cases} \quad (9)$$

gdzie wartość progu thr jest ustalana za pomocą:

$$thr = \frac{\max\{w_{m1}, \dots, w_{ml_{max}}\}}{2} \quad (10)$$

Uzyskiwanych jest w ten sposób l_b obszarów, które są następnie przetwarzane w ograniczonym zakresie (w prostokątnej macierzy zawierającej dane akumulatora należące tylko do wydzielonego obszaru) wyznaczonym na podstawie wartości granicznych wydzielonych obszarów przez pary współrzędnych (max_k, max_k) oraz (min_k, min_k) dla $k=1, 2, \dots, l_b$ (rysunek 4).

b) przeprowadzana jest następnie parametryzacja elementów ze zbioru B, dla których brane są pod uwagę następujące wielkości:



Rys. 4. Parametryzacja wydzielonych obszarów: obszar dla znaku 2 001.bmp. Źródło: Opracowanie własne

- wartość maksimum lokalnego dla wydzielonego obszaru - $w_m(b)$,
- współrzędne maksimum wydzielonego obszaru - $w_m(b)$,
- liczby punktów wydzielonego obszaru - $fb(b)$, określane na podstawie zliczania punktów reprezentacji parametrycznej obszaru b, wyznaczane jest na podstawie zależności:

$$fb(b) = \sum_{\rho} \sum_{\theta} \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) \quad (11)$$

gdzie:

$$\hat{A}_{cu}(\rho, \theta) = \begin{cases} 1 & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) \geq thr \\ 0 & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) < thr \end{cases} \quad (12)$$

- kąt (b) (wartość kąta zawiera się w przedziale (-90,90), jaki tworzy oś główna O_g wydzielonego obszaru z prostą [7],
- współrzędne położenia środka ciężkości wydzielonego obszaru - $ws(b)$, wyznaczane na podstawie zależności:

$$ws_{\rho}(b) = \frac{1}{fb(b)} \sum_{\rho} \sum_{\theta} \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) \quad (13)$$

gdzie:

$$\hat{A}_{cu}(\rho, \theta) = \begin{cases} \rho & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) \geq thr \\ 0 & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) < thr \end{cases} \quad (14)$$

natomiast dla wyznaczenia $ws(b)$ brany jest pod uwagę warunek:

$$\hat{A}_{cu}(\rho, \theta) = \begin{cases} \theta & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) \geq thr \\ 0 & \hat{A}_{cu}(\rho, \theta) < thr \end{cases} \quad (15)$$

- współczynnik osi głównej O_g i osi mniejszej O_m wydzielonego obszaru - e_b , definiowany jako:

$$e_b = \sqrt{1 - \frac{b_e^2}{a_e^2}} \quad (16)$$

gdzie: a_e i b_e - odpowiednio długość osi głównej i osi mniejszej wydzielonego obszaru (wartość współczynnika zawiera się w zakresie $<0, 1>$).

- c) utworzono wektor cech metody wydzielonych obszarów (BLOB) składający się ze zbioru parametrów znaku w postaci:

$$FV_{BLOB} = \left\{ \begin{matrix} l_b, (w_{m1}, w_{m\theta 1}, w_{m\rho 1}, ws_{\theta 1}, ws_{\rho 1}, fb_1, \alpha_1, e_{b1}), \dots, \\ (w_{ml_b}, w_{m\theta l_b}, w_{m\rho l_b}, ws_{\theta l_b}, ws_{\rho l_b}, fb_{l_b}, \alpha_{l_b}, e_{b l_b}) \end{matrix} \right\} \quad (17)$$

Wektor cech dla każdego znaku składa się z dwóch części. Pierwsza zawiera liczbę wydzielonych obszarów oraz podwektory przechowujące wartości maksimum, współrzędne maksimum, współrzędne środków ciężkości, sumy wartości punktów przestrzeni parametrycznej dla wydzielonych obszarów, pole wydzielonych obszarów, kąty nachylenia osi głównej, współczynniki osi głównych. Rozdzielenie wektora na części pozwala

na przeprowadzenie klasyfikacji wstępnej, bazującej na liczbie obszarów.

2. ANALIZA UZYSKANYCH REZULTATÓW

Dokonano analizy liczby wydzielonych obszarów dla obrazów z własnej bazy, co pozwoliło na określenie liczby obszarów dla poszczególnych znaków z bazy. W tabeli 3 przedstawiono przedziały liczb wydzielonych obszarów dla poszczególnych klas znaków. Ze względu na dużą różnorodność postanowiono ograniczyć liczbę obszarów branych pod uwagę przy klasyfikacji. Podobnie jak w przypadku metody bazującej na punktach charakterystycznych przeprowadzono testy z wykorzystaniem bazy znaków. Dzięki temu można określić liczbę obszarów do jakiej należy ograniczyć wektor cech znaku.

Tab. 3. Przedziały liczb wydzielonych obszarów lb akumulatora transformaty Radona Acu dla obrazów z bazy znaków (BZ1)

| Znak | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Liczba obszarów lb | 2-7 | 1-4 | 2-6 | 2-8 | 1-7 | 3-8 | 1-8 | 1-4 | 1-8 | 2-6 |

Dodatkowo w oparciu o liczbę obszarów można przeprowadzić klasyfikację wstępną, dzięki której w procesie klasyfikacji będą porównywane tylko wektory cech o jednakowej długości. W związku z tym długość wektora cech (największa liczba wydzielonych obszarów) została ustalona eksperymentalnie na podstawie badania sprawności klasyfikacji w funkcji liczby (sprawdzono kolejno wartości z zakresu od 1 do 10) wydzielonych obszarów. Okazało się, że zwiększanie liczby obszarów powyżej 4 powodowało spadek sprawności klasyfikacji znaków dla tej metody. Na podstawie powyższego w bloku klasyfikacji wstępnej utworzono cztery grupy wektorów znaków. Numer grupy odpowiada liczbie wydzielonych obszarów. W przypadku znaków o większej liczbie obszarów, wybierane są te z największą wartością wm .

PODSUMOWANIE

Metoda bazująca na parametryzacji wydzielonych obszarów w otoczeniu punktów charakterystycznych pozwala na wprowadzenie do wektora cech znaku wielkości niezależnych od rotacji obrazu znaku. Związane jest to z tym, że uszeregowano obszary ze względu na wartość maksymalną i wyznaczono parametry opisujące tylko dany obszar. Rotacja obrazu znaku powoduje tylko zmiany położenia rozpatrywanych obszarów, co pozwala na uzyskanie cech obrazu znaku bez względu na kąt obrotu. Metoda może być zastosowana zarówno dla transformaty Radona, jak również jej różnych modyfikacji. Należy zaznaczyć, że metoda ta nie nadaje się do wykorzystania w przypadku przekształcenia FRT, w którym dynamika zmian wartości komórek akumulatora jest znacznie mniejsza. Dużą zaletą jest to, że zaproponowane rozwiązanie może być dowolnie rozwijane ze względu na inne techniki opisu wydzielonych obszarów, np. wyznaczanie cech bazujących na teksturze wydzielonego obszaru.

BIBLIOGRAFIA

1. Aissaoui A., *Normalized Fourier Coefficients for Cursive Arabic Script recognition*. PhD Thesis, Universite Mohamed, 1990.
2. Averbuch A., Coifman R., *Fast Slant Stack: A notion of Radon Transform for Data in a Cartesian Grid which is Rapidly Computable, Algebraically Exact, Geometrically Faithful and Invertible*, SIAM J. Scientific Computing, 2001.

3. Miciak M., *Character Recognition Using Radon Transformation and Principal Component Analysis in Postal Applications*, IMCIST 2008, Wisla, 2008.
4. Miciak M., *Radon Transformation and Principal Component Analysis Method Applied in Postal Address Recognition Task*, International Journal of Computer Science and Applications, vol.7, pp.33-44, India, 2010.
5. Peter T., *The Radon Transform - Theory and Implementation*. PhD Thesis, Technical University of Denmark, 1996.
6. Venturas S., Flaounas I., *Study of Radon Transformation and Application of its Inverse to NMR*, Algorithms in Molecular Biology, 2005.

THE CHARACTERISTIC POINTS EXTRACTION OF THE PARAMETRIC SPACE IN CHARACTER RECOGNITION SYSTEMS

Abstract

The article presents the problem of automatic recognition of postal codes on mail pieces. Recognition of the postal codes is a main component of the system sorting machines in the mail nodes. The postal codes usually written in the form of digits can be presented in the form of digital images representing the particular characters. Due to the fact that the images contain various distortions, has been proposed the image transformation to parameter space, where it will be possible to perform the operation of normalization and correction of rotation. Using this procedure, which is based on parameterization of the areas surrounded by characteristic points which allows to obtain the invariant character feature vector of the sign. The method can be used both for the Radon transform, as well as its various modifications. The big advantage is that the proposed solution can be freely developed due to the different techniques of parameterization on separate areas, for example to determination of the characteristics based on texture isolated area.

Autorzy:

dr inż. **Mirosław Miciak** – Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy
e-mail: miroslaw.miciak@utp.edu.pl

dr inż. **Roman Wiatr** – Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy
e-mail: roman.wiatr@utp.edu.pl

dr inż. **Adam Marchewka** – Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy
e-mail: adam.marchewka@utp.edu.pl