

**WYBRANE PRZYKŁADY WYKORZYSTANIA MORFOLOGII
MATEMATYCZNEJ W PRZETWARZANIU OBRAZÓW W TELEDETEKCJI**

**SELECTED EXAMPLES OF APPLYING MATHEMATICAL MORPHOLOGY
TO IMAGE PROCESSING IN REMOTE SENSING**

Przemysław Kupidura, Jacek Marciniak, Piotr Koza, Michał Kowalczyk

Politechnika Warszawska, Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP

SŁOWA KLUCZOWE: morfologia matematyczna, filtracja obrazu, klasyfikacja obiektowa, wykrywanie krawędzi

STRESZCZENIE: Morfologia matematyczna stanowi zbiór nieliniowych operacji, umożliwiających zmianę struktury obrazu cyfrowego. Jej specyficzna natura pozwala na przetwarzanie obrazów w zależności od kształtu, wielkości, tekstury czy sąsiedztwa obiektów obecnych na zdjęciu. W artykule przedstawiono wyniki uzyskiwane w projekcie MNiSzW Nr N526 034 32/3448, poświęconym w całości wykorzystaniu operacji morfologicznych w przetwarzaniu danych teledetekcyjnych. Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań potwierdzają wysoką skuteczność morfologii matematycznej w wielu różnorodnych zastosowaniach, jak filtracja dolnoprzepustowa, wydzielanie na obrazie heterogenicznych typów obiektów, czy wykrywanie krawędzi obiektów. W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania funkcji morfologicznych w przetwarzaniu danych teledetekcyjnych. Zaprezentowano również założenia darmowego oprogramowania BlueNote, stworzonego w ramach projektu.

1. WPROWADZENIE

Operacje morfologiczne znane są od 60-tych lat XX wieku. Wtedy właśnie, francuscy naukowcy, Jean Serra i George Matheron, opracowali na bazie operacji Minkowskiego funkcje erozji (ang. *erosion*) i dylacji (ang. *dilation*), które stały się podstawą dziedziny, nazwanej później morfologią matematyczną. Od stworzenia operacji erozji i dylacji funkcje morfologii matematycznej były dalej rozwijane, co doprowadziło do powstania kolejnych funkcji o różnorodnym przeznaczeniu, jak również przyczyniło się do rozwoju całej dziedziny morfologii matematycznej. Główną zaletą operacji morfologicznych jest dostosowanie ich działania do obiektowej struktury obrazu, zależnie od rodzaju operacji. Pozwala to na uzależnienie wyniku operacji od takich cech obiektów, jak wielkość, kształt, tekstura, czy sąsiedztwo i co istotne, w sposób odmienny, niż ma to miejsce w przypadku tradycyjnych kontekstowych przekształceń cyfrowych. Wymienione zalety funkcji morfologicznych sprawiły, że znalazły one zastosowanie w cyfrowym przetwarzaniu obrazów w wielu dziedzinach, m.in. w diagnostyce medycznej, astronomii, a także w teledetekcji. Mimo to, analiza możliwości morfologii matematycznej wskazuje na duży jej potencjał, dotychczas jeszcze niewykorzystany, zwłaszcza w teledetekcji.

Badania prowadzone w ramach projektu wykazały, że określone operacje morfologiczne mogą być z powodzeniem stosowane tam, gdzie tradycyjne metody przetwarzania obrazów zdają się zawodzić. Jest to możliwe dzięki silnemu uzależnieniu wyniku działania określonej funkcji od struktury przekształcanego obrazu.

W artykule zaprezentowano pokrótce kilka wątków, którymi zajmują się wykonawcy projektu. Są to, przede wszystkim, badania dotyczące klasyfikacji treści zdjęć lotniczych i satelitarnych (ze szczególnym uwzględnieniem wyodrębniania obiektów heterogenicznych, takich jak sady, czy tereny zabudowane), a także usuwaniu szumu na obrazie. Dodatkowo, przedstawiono główne założenia oprogramowania powstającego w ramach projektu, pod nazwą BlueNote, umożliwiającego wykonywanie operacji morfologii matematycznej, przede wszystkim tych, których przydatność dla teledetekcji stwierdzono w trakcie przeprowadzonych badań.

2. PODSTAWY MORFOLOGII MATEMATYCZNEJ

Dwie fundamentalne funkcje morfologiczne – erozja i dylacja – wywiedzione zostały z operacji Minkowskiego na zbiorach. W literaturze można spotkać dwie różne ich notacje: Serra/Matherona (Serra, 1982) oraz Haralicka/Sternberga (Sternberg, 1986, Haralick, 1987). Ta druga wydaje się być bardziej popularna w praktycznych zastosowaniach (Nieniewski, 1998), więc wykorzystano ją w niniejszym artykule do zapisu podstawowych operacji morfologicznych. W notacji Haralicka/Sternberga erozja zdefiniowana jest w następujący sposób:

$$X \ominus B = \bigcap_{y \in B} X_y, \quad (1)$$

natomiast dylacja, jak poniżej:

$$X \oplus B = \bigcup_{y \in B} X_y, \quad (2)$$

gdzie X oznacza zbiór przekształcany, B oznacza element strukturujący, natomiast

$$X_y = \{x + y : x \in X\}. \quad (3)$$

Wszystkie inne operacje morfologii matematycznej „zawierają” w sobie przynajmniej jedną z przedstawionych powyżej funkcji podstawowych. Przykładem mogą być dwie inne, popularne operacje morfologiczne, otwarcie i domknięcie, stanowiące proste sekwencje operacji erozji i dylacji. Otwarcie możemy zdefiniować przy użyciu następującego wzoru:

$$X \circ B = [X \ominus B] \oplus B, \quad (4)$$

natomiast domknięcie, jako:

$$X \bullet B = [X \oplus B] \ominus B \quad (5)$$

W celu bardziej dogłębnego zrozumienia morfologii matematycznej, autorzy zachęcają do zapoznania się z publikacjami, w których znacznie szerzej przedstawiono tak podstawy teoretyczne, jak i przykłady zastosowań wybranych funkcji morfologii matematycznej. Wymienić tu należy przede wszystkim (Serra, 1982, 1988, Nieniewski, 1998, 2005, Kupidura, 2006, Gwadera, 2008, Jakubiak, 2008).

3. PRAKTYCZNE PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ MORFOLOGII MATEMATYCZNEJ

Morfologia matematyczna, z racji swojej unikalnej właściwości, polegającej na zmianie struktury obrazu, w zależności od kształtu, wielkości, tekstury obiektów, czy też wzajemnych relacji między nimi, pozwala na obiektowe podejście do przekształcanego obrazu. Dotychczas dominujące w teledetekcji przekształcenia bezkontekstowe pomijają cechy interpretacyjne obiektów takie jak kształt, wielkość itd. Wykorzystanie tych cech przy przetworzeniach morfologicznych pozwala zbliżyć cyfrową interpretację obrazów do metod postrzegania naturalnych dla ludzi. Wykorzystanie podejścia obiektowego sprawia, że funkcje morfologiczne mogą stanowić narzędzie rozwiązania wielu problemów trudnych, czy wręcz niemożliwych do rozwiązania przy użyciu tradycyjnych metod.

Poniższy rozdział pracy przedstawia wyniki praktycznej weryfikacji zastosowań operacji morfologicznych w przetwarzaniu teledetekcyjnych obrazów. Kolejne podrozdziały prezentują potencjalne korzyści płynące z zastosowania morfologii matematycznej w:

- wydzieleniu heterogenicznych klas pokrycia terenu
- filtracji obrazów
- wykrywaniu krawędzi.

W każdym z podrozdziałów przedstawiono wyniki badań autorów oraz rezultaty weryfikacji przydatności operacji morfologicznych do poszczególnych zadań.

W przypadku wyróżnienia heterogenicznych obiektów w eksperymentach korzystano zarówno z lotniczych, jak i satelitarnych obrazów optycznych. Filtrację morfologiczną przeprowadzono na monochromatycznych optycznych obrazach satelitarnych i lotniczych oraz na mikrofalowych obrazach satelitarnych. Natomiast zagadnienie wykrywania krawędzi przeprowadzono na obrazach z amatorskiej kamery cyfrowej.

Każdy z podrozdziałów składa się z sekcji wstępu prezentującego problem, przedstawia metodykę badania oraz podsumowanie wyników. Wyniki operacji morfologicznych zestawiono z wynikami przetworzeń nie morfologicznych.

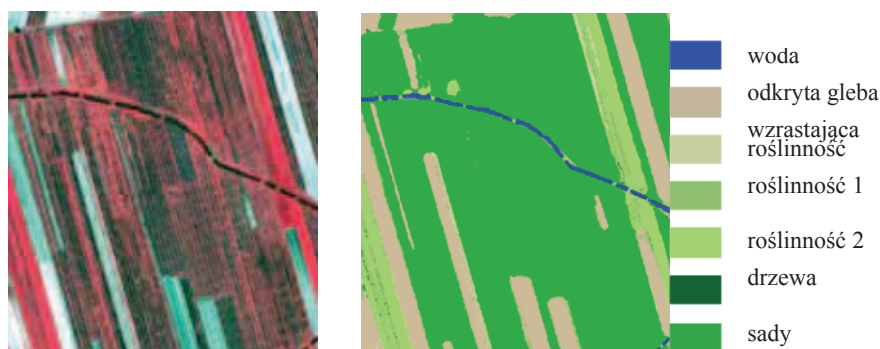
3.1. Wydzielanie heterogenicznych obiektów na zdjęciach lotniczych i satelitarnych

Klasyfikacja treści zdjęcia cyfrowego przy użyciu tradycyjnych metod bezkontekstowych, polegających na uwzględnieniu tylko wartości radiometrycznych poszczególnych pikseli (ang. *pixel-based*) jest dobrze znana i opisana w literaturze naukowej. Wskazując główne cechy tego typu algorytmów można stwierdzić, że wysokim współczynnikiem dokładności klasyfikacji charakteryzują się obiekty względnie homogeniczne, składające się jednocześnie z pikseli o wartościach wyróżniających się na tle innego typu obiektów. Znacznie gorzej tego typu metody sprawdzają się w przypadku obiektów z natury heterogenicznych, a więc nie spełniających powyższego warunku, jak np. sady, czy tereny zabudowane. Rozwiązaniem tego typu problemów może być oczywiście klasyfikacja obiektowa, jednak specjalistyczne oprogramowanie niezbędne do jej wykonania jest drogie, a i sam proces – stosunkowo skomplikowany.

Propozycja wykorzystania morfologii matematycznej do wydzielenia obiektów heterogenicznych na zdjęciach zakłada wykorzystanie ogólnie dostępnych i powszechnie znanych bezkontekstowych algorytmów klasyfikacyjnych. Zasadnicza różnica proponowanego podejścia polega na poddaniu klasyfikacji nie oryginalnych zdjęć, ale rezultatów ich przetworzeń, uzyskanych przy użyciu odpowiednich funkcji morfologicznych. Pierwszym krokiem przed przystąpieniem do klasyfikacji są morfologiczne przetworzenia obrazu wejściowego, przy czym należy wybrać takie funkcje, w wyniku zastosowania których obraz wyjściowy zawierać będzie najwięcej informacji o zadanych cechach obiektów (np. dotyczące częstotliwości przestrzennej w danych partiach obrazu, mówiąc inaczej, wielkości i rozkładu obiektów na obrazie). W ten sposób przygotowane zostają dane w postaci, w której tradycyjne algorytmy klasyfikacyjne będą w stanie wyodrębnić interesujące nas obiekty. Następnie na wynikowych obrazach przeprowadzana jest klasyfikacja bezkontekstowa (pikselowa).

Jednym z przykładów tego typu podejścia jest algorytm opracowany dla wyodrębniania sadów. Obraz sadów jest heterogeniczny i charakteryzuje się regularną teksturą. Opracowany algorytm zakłada złożenie obrazów otwarcia i domknięcia morfologicznego – na obu z nich obszary sadów uzyskują homogeniczną strukturę, na jednym charakteryzują się wartością radiometryczną podłoża, a na drugim drzew w sadzie. Połączenie obu wartości na obrazie otwarcia i domknięcia daje w rezultacie unikalną kombinację na tle innych typów pokrycia terenu. Tak przygotowany obraz może zostać poddany tradycyjnej (opartej na wartościach radiometrycznych pikseli) klasyfikacji.

Autorzy przeprowadzili szereg eksperymentów weryfikujących przydatność opisanego powyżej algorytmu dla wyróżniania obszarów sadów. Wykorzystano do tego obrazy satelitarne z systemu QuickBird (zakres widzialny oraz bliska podczerwień) o rozdzielczości 0,64 m. Testy dowiodły, że klasyfikacja obrazu poddanego przekształceniom morfologicznym pozwala na wyodrębnienie interesującej nas klasy (w tym wypadku sadów) z wysoką dokładnością (Kupidura, 2006, 2007, Gwadera, 2008), wyższą nawet niż w przypadku obiektowej klasyfikacji wykonanej przy użyciu specjalistycznego oprogramowania (Gwadera, 2008). Testy porównawcze przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu E-Cognition. Przykład klasyfikacji przeprowadzonej z wykorzystaniem opisanego algorytmu przedstawiony został poniżej (rys. 1.).



Rys. 1. Fragment sceny satelitarnej Quickbird i klasyfikacja jej treści przy użyciu przekształceń morfologicznych

Innym przykładem wykorzystania morfologii matematycznej do wyodrębniania obiektów heterogenicznych może być wydzielenie na zdjęciu terenów zabudowanych. Charakterystyczną cechą tej klasy pokrycia terenu jest duża zmienność jasności obrazu, spowodowana występowaniem w dużym zagęszczeniu stosunkowo niewielkich obiektów, tworzonych przez piksele o zróżnicowanych wartościach radiometrycznych. W tym przypadku, zastosowanie może znaleźć granulometria. Polega ona na przeprowadzaniu na obrazie operacji otwarcia (bądź domknięcia, wtedy mówimy o anty-granulometrii) elementem strukturującym o coraz większym rozmiarze a następnie wyszukaniu zmian pomiędzy obrazami otwarcie o różnych rozmiarach elementów strukturujących. W efekcie powstają tak zwane mapy granulometryczne (Serra, 1982), pokazujące różnice pomiędzy wynikami poszczególnych otwarć morfologicznych. Nałożenie na siebie serii map granulometrycznych pozwala uzyskać serię obrazów, w których wartości pikseli zależą od zróżnicowania przestrzennego obrazu w określonym otoczeniu piksela. Taki zestaw obrazów, poddany tradycyjnej klasyfikacji pozwala na skuteczne wyodrębnienie klasy terenów zabudowanych. Wstępne badania wskazują na znaczący potencjał tej metody. Przykład takiej klasyfikacji przedstawiono poniżej (rys. 2.).



Rys. 2. Przykład klasyfikacji przy użyciu map granulometrycznych, nałożony na zdjęcie satelitarne Quickbird. Czerwonym kolorem zaznaczono wyodrębnioną klasę terenów zabudowanych

Warto tu nadmienić, że przedstawione powyżej algorytmy w sposób istotny różnią się od innych znanych metod, np. analizy tekstury. W tej ostatniej metodzie, możemy poznać jedynie wartość statystyczną (odchylenie standardowe, wariancję itp.), która mówi nam o ogólnym zróżnicowaniu pikseli w określonym sąsiedztwie rozpatrywanego piksela, nie dotyczy jednak w żaden sposób rozkładu tych różnic wewnątrz tego sąsiedztwa, a taką informację możemy uzyskać np. przy wykorzystaniu map granulometrycznych.

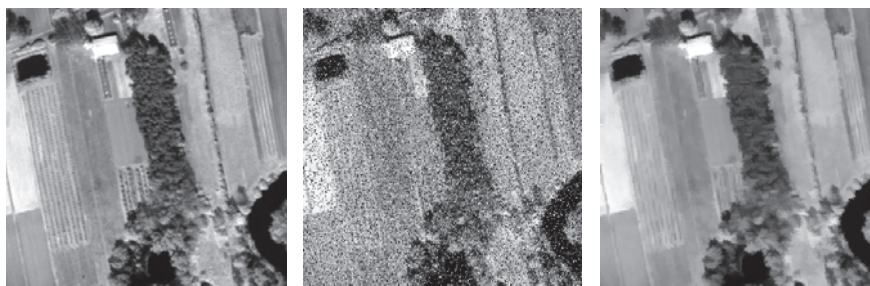
3.2. Filtracja obrazów

Jednym z istotnych zadań cyfrowego przetwarzania obrazów jest poprawianie ich jakości poprzez usuwanie z nich szumów. Cechą idealnego filtra jest usuwanie szumu z obrazu, przy jednoczesnym pozostawieniu sygnału bez zmian. Wymaga to umiejętności odróżnienia pikseli obraczonej błędnymi wartościami wynikającymi z występowania szumu, od pikseli posiadających prawidłowe wartości sygnału. Nieco upraszczając wymowę tego postulatu można stwierdzić, że prawidłowo działający filtr powinien usuwać szum wewnątrz obiektów, pozostawiając nienaruszone krawędzie obiektów. W rzeczywistości, większość dolnoprzepustowych filtrów cyfrowych powoduje większe bądź mniejsze rozmycie krawędzi, co prowadzi do spadku właściwości interpretacyjnych obrazu. Rozwiązaniem tego problemu może być podejście obiektowe.

Ciekawą propozycją okazują się być filtry morfologiczne z wielokrotną funkcją strukturującą. Pozwalają one na usuwanie odizolowanych pikseli o wyróżniających się wartościach (te zostają potraktowane jak szum), przy jednoczesnym bardzo dobrym zachowaniu liniowych struktur na obrazie, będących prawdopodobnie krawędziami obiektów.

W ramach opisywanego projektu przeprowadzono badania w celu określenia skuteczności filtracji morfologicznej. Testy przeprowadzono na tradycyjnych zdjęciach optycznych (lotniczych i satelitarnych) oraz na zdjęciach radarowych. Wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla innych, powszechnie stosowanych filtrów cyfrowych.

W przypadku obrazów optycznych testy przeprowadzono na monochromatycznych obrazach lotniczych oraz z satelity QuickBird. Obrazy te były sztucznie zaszumiane dwoma rodzajami filtów (gausowskim oraz „sól i pieprz”). Następnie było one odszumiane z wykorzystaniem powszechnie wykorzystywanych filtów oraz z wykorzystaniem filtów morfologicznych z wielokrotną funkcją strukturującą. Ocenę wyników przeprowadzono poprzez porównanie obrazu odszumionego z obrazem pierwotnym (przed sztucznym zaszumieniem). Wyniki uzyskane dla zdjęć optycznych wykazały, że filtracja morfologiczna cechuje się skutecznością w usuwaniu szumów porównywalną z innymi, najlepszymi filtrami, a jednocześnie w najwyższym stopniu zachowują krawędzie obiektów (Kupidura, 2006, Jakubiak, 2008) (rys. 3).



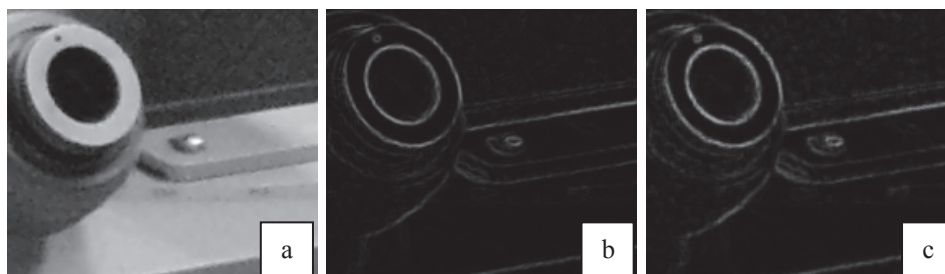
Rys. 3. Przykład filtracji morfologicznej. Po lewej – obraz oryginalny, w środku – obraz z symulowanym szumem, po prawej, wynik użycia filtra z wielokrotną funkcją strukturującą

Przeprowadzono również badania na zdjęciach radarowych z satelity TerraSAR-X, z trybu StripMap o rozdzielczości piksela ok. 4 metrów. Obrazy mikrofalowe z swojej natury są silnie zaszumione, tak więc nie wprowadzono do nich dodatkowych sztucznych szumów. Obrazy radarowe odszumiano filtrami GammaMap, Lee-Sigma, Local Region, Frost, a także filtrami morfologicznymi o wielokrotnym elemencie strukturującym. Porównanie efektów odszumienia przeprowadzono dwuetapowo – poprzez dokonanie klasyfikacji obszarów homomorficznych (a więc ocenę „ujednoczenia” obszarów) oraz ocenę zachowania krawędzi (zachowanie krawędzi jest głównym kryterium oceny przydatności filtru). Ocena zachowania krawędzi została przeprowadzona poprzez ręczne pozyskanie obiektów mogących zostać błędnie zakwalifikowanych przez filtr jako szum (czyli głównie budynków) na obrazach pierwotnych oraz odszumionych. Badania na obrazach mikrofalowych dowiodły, że filtry morfologiczne z wielokrotną funkcją strukturującą dorównują najlepszym filtrom przeznaczonym do odszumiania obrazów mikrofalowych (Kupidura, Koza, 2008). Filtry morfologiczne zapewniają jednakową dokładność zachowania krawędzi jak filt Frost’a oraz GammaMap - na poziomie 85% w przyjętej metodyce badawczej. Z racji specyficznej natury szumu na obrazach radarowych, uzyskiwane rezultaty były słabsze, niż w przypadku zdjęć optycznych.

3.3. Wykrywanie krawędzi

W szerokim zbiorze operacji morfologicznych, obok przetworzeń dolno-przepustowych, takich jak opisane powyżej operacje wykorzystywane do usuwania szumów, znaleźć można również przetworzenia górnoprzepustowe, które mogą znaleźć zastosowanie w wykrywaniu krawędzi na obrazie. Prawidłową do tego zastosowania operacją ze zbioru przetworzeń morfologicznych jest gradient morfologiczny. Gradient morfologiczny polega na różnicy wyników operacji dylacji i erozji. Tak więc gradient jest filtrem niekierunkowym, a rozmiar najmniejszej wykrywanej krawędzi zależy od rozmiaru elementu strukturującego zastosowanych operacji morfologicznych.

Przeprowadzone przez autorów badanie polegało na zestawieniu wyników wykrywania krawędzi metodą gradientu morfologicznego oraz powszechnie stosowanych bezkierunkowych filtrów niemorfologicznych – filtru Prewitt’a oraz gradientu Sobela. Do badań wykorzystano serię zdjęć naziemnych wykonanych amatorskim aparatem cyfrowym o rozdzielczości 8 megapikseli. Zdjęcia przedstawiały obiekt (w tym wypadku stereokomparator) o zróżnicowanych krawędziach, zarówno owalnych, jak i prostych, o różnych kierunkach. Zdjęcia wstępnie odszumiono (stosując zarówno filtry medianowe, jak i morfologiczne) a następnie przystąpiono do wzmocnienia krawędzi wymienionymi filtrami. Kolejnym krokiem było progowanie, które doprowadziło do ekstrakcji krawędzi. Wstępne porównania wynikowych obrazów pokazują, że gradient morfologiczny może stanowić alternatywną propozycję w stosunku do innych niekierunkowych algorytmów wykrywających krawędzie (Kowalczyk i in., 2008) (rys. 4).



Rys. 4. Obraz okularu stereokomparatora wykonany przy użyciu amatorskiego aparatu cyfrowego a) oryginalny obraz w skali szarości, b) obraz po przetworzeniu gradientem Sobela, c) obraz po przetworzeniu gradientem morfologicznym

4. BLUENOTE

Jednym z zadań projektu jest opracowanie oprogramowania pozwalającego na swobodne stosowanie morfologii matematycznej. Różnorodność operacji morfologicznych, a także możliwość wpływania na wynik operacji poprzez odpowiednie dobieranie wielkości i kształtu elementu strukturującego sprawia, że dopiero możliwość dowolnego ich projektowania przez użytkownika pozwoli na pełne wykorzystanie potencjału morfologii matematycznej. Najważniejsze cechy tworzonego programu o nazwie BlueNote to:

- szeroki wybór zaimplementowanych funkcji morfologicznych,
- możliwość dowolnego budowania sekwencji wybranych operacji na obrazach przy zastosowaniu wewnętrznego języka skrypcowego,
- wykorzystywanie dowolnie zaprojektowanych elementów strukturujących,
- szeroki wybór operacji bezkontekstowych i kontekstowych,
- obsługa obrazów georeferencjonowanych (geotiff).

Co istotne, oprogramowanie będzie darmowe i ogólnie dostępne poprzez Internet. W styczniu 2009 roku jego pierwsza wersja pojawi się na stronie Laboratorium Teledetekcji i SIP Politechniki Warszawskiej: <http://telesip.gik.pw.edu.pl> i będzie dostępna do ściągnięcia. W intencji autorów, program BlueNote ma wspomóc prace badawcze w zakresie cyfrowego przetwarzania obrazów i stanowić swego rodzaju platformę współpracy między ośrodkami badawczymi.

5. PODSUMOWANIE

Badania prowadzone w ramach projektu MNiSzW wykazały, że potencjał morfologii matematycznej jako pomocnego narzędzia w przetwarzaniu danych teledetekcyjnych, zwłaszcza tam, gdzie istotne jest obiektowe podejście do przekształcanego obrazu, jest wciąż nie do końca wykorzystany. Wybrane operacje morfologiczne stosowane do wydzielenia heterogenicznych obiektów na zdjęciach, czy usuwania szumu, umożliwiają uzyskiwanie wysokiej jakości rezultatów. Pewnym ograniczeniem w tym zakresie może być utrudniony dostęp do oprogramowania, pozwalającego na swobodne stosowanie

morfolologii matematycznej do przetwarzania obrazów. Opracowywane oprogramowanie BlueNote umożliwi szersze zbadanie potencjału funkcji morfologicznych. Autorzy mają nadzieję na współpracę z innymi ośrodkami badawczymi w tym zakresie.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2008.

6. LITERATURA

Gwadera, Ł., 2008. Badanie porównawcze wybranych metod wyodrębniania heterogenicznych klas pokrycia terenu na przykładzie sadów. Praca magisterska, Politechnika Warszawska.

Haralick, R. M., Sternberg, S. R., Zhuang, X., 1987. Image Analysis using Mathematical Morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(4), 532-550.

Jakubiak, M., 2008. Badanie przydatności operacji morfolologii matematycznej do filtracji danych teledetekcyjnych. Praca magisterska, Politechnika Warszawska.

Kowalczyk, M., Koza, P., Kupidura, P., Marciniak, M. 2008. Application of mathematical morphology operations for simplification and improvement of correlation of images in close-range photogrammetry. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. Volume XXXVII, Part B5. Benjin, 153-159.

Kupidura, P., 2006. Zastosowanie wybranych operacji morfolologii matematycznej do wydzielenia klas pokrycia terenu na zdjęciach satelitarnych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.

Kupidura, P., 2007. Morphological processing of satellite images for improvement of classification of orchards. *New Developments and Challenges in Remote Sensing*. Ed. Z. Bochenek, Millpress, Rotterdam, 225-232.

Kupidura, P., Koza, P., 2008. Filtration of radar images using morphological operations. *Polish Journal of Environmental Studies*.

Nieniewski, M., 1998. Morfologia matematyczna w przetwarzaniu obrazów, Akademia Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa.

Nieniewski, M., 2005. Segmentacja obrazów cyfrowych. Metody segmentacji wododziałowej. Akademia Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.

Serra, J., 1982. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, vol.1. Academic Press, Londyn.

Serra, J. (editor), 1998. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, vol.2: Theoretical Advances. Academic Press, Londyn.

Sternberg, S. R., 1986. Grayscale Morphology. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 35 (3) 333-355.

SELECTED EXAMPLES OF APPLYING MATHEMATICAL MORPHOLOGY TO IMAGE PROCESSING IN REMOTE SENSING

KEY WORDS: mathematical morphology, image filtration, object-oriented classification, edge detection

Summary

The paper presents results of a research project concerning the application of mathematical morphology in remote sensing.

Mathematical morphology was developed created in the 1960s by two French scientists: Jean Serra and George Matheron. Since then, the great progress in this discipline has led to the development of many different operators. Their most important advantage is involving important features of objects in the image, such as size, shape, texture, and neighbourhood. Because of that, selected morphological operators are used in digital image processing in many fields, including remote sensing. However, the analysis shows mathematical morphology to have an even greater potential in this field.

The first line of thought presented is the object-oriented classification. The traditional, pixel-based algorithms are often ineffective when classifying selected heterogenic types of land cover. A morphological operator developed by Kupidura, involving a combination of results of opening and closing of the original image, allows to extract the class of orchards by using a simple pixel-based algorithm. The subsequent research showed that granulometric maps, first presented by Serra, which – for each pixel - generate a set of values denoting heterogeneity of the pixel neighbourhood, allow to extract the built-up class in a traditional classification process.

The issue in which morphological operators prove their high efficiency is noise removal. Application of alternate filters allows to filter out both optical and microwave images with a high noise level. Noteworthy is that the filters show impressive results wherever detail preservation is concerned.

The project involved also experiments on edge detection with morphological gradient. Preliminary results showed a high efficiency of those procedures comparable to Sobel's gradient.

An additional aim of the project was to develop software that would allow running any combination of morphological operators. The software called BlueNote will be available free of charge, which could lead to further increase of applications of mathematical morphology to remote sensing.

dr inż. Przemysław Kupidura
e-mail: p.kupidura@gik.pw.edu.pl
tel. +48 22 234 7358
fax.: +48 22 234 5389

mgr inż. Jacek Marciniak
e-mail: jacekbm@gmail.com
tel. +48 667785 351

mgr inż. Piotr Koza
e-mail: piotr.koza@wp.eu
tel.: +48 22 234 7358
fax.: +48 22 234 5389

dr inż. Michał Kowalczyk
e-mail: mikowalczyk@wp.pl
tel. +48 22 234 7604