

ROBERT OLSZEWSKI  
Zakład Kartografii Politechniki Warszawskiej

## Systemy wnioskowania rozmytego (FIS) jako narzędzie nieliniowej generalizacji numerycznego modelu terenu

Zarys treści. W artykule omówiono zagadnienie zastosowania systemów generalizacji danych przestrzennych opartych na logice rozmytej do modelowania rzeźby terenu na różnym poziomie uogólnienia.

Słowa kluczowe: generalizacja, filtracja nieliniowa, systemy wnioskowania rozmytego, numeryczny model terenu

### 1. Wprowadzenie

Złożoność i wieloaspektowość procesu generalizacji kartograficznej sprawia, że zagadnienie to niezwykle trudno zdefiniować w postaci zestawu reguł algorytmicznych. Ze względu na złożoność problemu, jakim jest proces generalizacji, większość prowadzonych badań dotyczy wyłącznie automatyzacji wybranych elementów składowych procesu generalizacji (R. Olszewski 2002), np. opracowania operatorów upraszczania obiektów liniowych (T. Chrobak 1999).

W dotychczasowych próbach automatyzacji procesu generalizacji kartograficznej osiągnięto zadowalające wyniki w zakresie poszczególnych czynności, związanych z ilościowym aspektem generalizacji (R. Weibel 1995), mimo że wciąż nie są określone obiektywne prawa i reguły rządzące doбором elementów treści map i nadal poszukuje się metod ich definiowania w formie algorytmów. Jedną z najważniejszych potrzeb dzisiejszej kartografii jest zatem określenie obiektywnych reguł oraz próba skonstruowania na ich podstawie całościowego modelu procesu generalizacji. Większość podejmowanych prób skonstruowania takiego modelu generalizacji kartograficznej oparta jest na wektorowym modelu danych źródłowych (R. McMaster 1991).

W niniejszym artykule opisano próbę zastosowania obiektywnych reguł generalizacyjnych o charakterze lokalnym, determinujących całościowy proces generalizacji kartograficznej danych o charakterze rastrowym. Do zbudowania bazy wiedzy umożliwiającej realizację procesu uogólniania danych przestrzennych wykorzystano systemy wnioskowania rozmytego (ang. *fuzzy inference systems – FIS*). Zastosowanie logiki rozmytej pozwala na zdefiniowanie reguł generalizacyjnych umożliwiających nieliniową filtrację numerycznego modelu terenu zapisanego w formie macierzy wysokości.

### 2. Modelowanie kartograficzne a inteligencja obliczeniowa

Zgodnie ze współczesną definicją (A. Makowski 2005) „kartografia jest nauką metodyczną o modelowaniu i obrazowaniu czasoprzestrzennych struktur informacyjnych w postaci map opisujących wielowymiarową rzeczywistość”. W tym ujęciu model definiowany jest jako specyficzne odwzorowanie bytów rzeczywistych z pominięciem nieistotnych cech i związków. Służy on ukazaniu charakterystycznych cech badanego fragmentu rzeczywistości w stopniu umożliwiającym jego poznanie (R. Weibel 1991). Opracowanie modelu kartograficznego może być zatem utożsamione z procesem generalizacji, rozumianej jako odpowiednie do celu i przeznaczenia opracowania uogólnienie danych przestrzennych oddające istotę zamierzonego celu.

Modelowanie danych przestrzennych, w tym także modelowanie kartograficzne, może być realizowane na wiele sposobów różniących się

miedzy sobą zarówno pod względem przyjętej metodyki jak i stopnia automatyzacji samego procesu modelowania (R. Olszewski 2006). Jednym z nich jest wykorzystanie tzw. metod inteligencji obliczeniowej (ang. *computational intelligence* – CI). Rozwiązanie to polega na swoistym „przekazaniu” subiektywnej wiedzy kartograficznej narzędziu cyfrowemu, które realizując następnie proces modelowania danych przestrzennych na danym poziomie uogólnienia automatycznie określi odpowiednią metodę generalizacji i wyznaczy jej parametry (R. Olszewski 2005).

Do zrozumienia istoty tego procesu konieczne jest precyzyjne zdefiniowanie pojęcia inteligencji obliczeniowej oraz określenie jej stosunku do innych metod obliczeniowych. Wg W. Duchy (2005) inteligencja obliczeniowa jest działem informatyki zajmującym się rozwiązywaniem zagadnień efektywnie niealgorytmizowalnych za pomocą obliczeń. Do zagadnień tego typu można zaliczyć rozpoznawanie obrazów, sterowanie układami nieliniowymi, działania twórcze itp. Inteligencja obliczeniowa, w odróżnieniu od metod tzw. sztucznej inteligencji (ang. *artificial intelligence* – AI), wykorzystującej modelowanie wiedzy na podstawie metod symbolicznych, zmierza do automatyzacji procesów gromadzenia wiedzy z obserwacji, analizy danych, kategoryzacji i aproksymacji (W. Duch 2005). Według D. Poole’a, A. Mackwortha i R. Goebela (1998) inteligencja obliczeniowa to „studium zachowań inteligentnych agentów”, zaś wnioskowanie jest w tym ujęciu równoważne manipulacji symbolicznej, a więc obliczeniom. Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej pozwala zatem na kartograficznie poprawne modelowanie danych przestrzennych na różnym poziomie uogólnienia, łącząc w sobie zarazem zalety automatyzacji procesu modelowania z jego subiektywnością (R. Olszewski 2006).

Opracowanie bazy wiedzy systemu modelowania danych przestrzennych może być przy tym realizowane *explicite* – poprzez określenie jawnych reguł, np. w systemie wnioskowania rozmytego czy też reguły automatu komórkowego (R. Olszewski 2003) lub *implicite* – np. poprzez podanie poprawnych przykładów rozwiązań jako źródła wiedzy dla sztucznej sieci neuronowej. W artykule szerzej omówiono podejście oparte na wykorzystaniu wnioskowania rozmytego. Przykłady zastosowań algorytmów wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe można znaleźć w literaturze (A. Iwaniak, R. Olszewski, W. Pałuszynski, 2003; R. Olszewski 2003).

### 3. Logika rozmyta i systemy wnioskowania rozmytego

Początki tzw. logiki rozmytej i teorii zbiorów rozmytych związane są z nazwiskiem L.A. Zadeha (1965): „ogólnie rzecz biorąc, złożoność i precyzja są ze sobą w relacji odwrotnej w tym sensie, że jeżeli złożoność rozpatrywanego problemu wzrasta, to zmniejsza się możliwość jego precyzyjnej analizy”. Rozmytość jako matematyczna metoda opisu i poznania świata rzeczywistego okazała się niezwykle inspirująca w różnych dziedzinach nauki. Logika rozmyta, umożliwiającą rozpatrywanie w sposób formalny sytuacji „niedokładnych”, spełnia tym samym postulat odpowiedniości w opisie rzeczywistości (A. Maćkowiak, W. Ratajczak 1996). Teoria zbiorów i systemów rozmytych znalazła zastosowanie także w analizie i klasyfikacji danych o charakterze przestrzennym (M. Kępińska, R. Olszewski 2002).

W klasycznej, arystotelesowskiej logice dwuwartościowej zdanie może przybierać wartości ze zbioru  $\{0,1\}$  często opisywane jako *prawda* lub *fałsz*. W logice wielowartościowej zdanie jest prawdziwe lub fałszywe w określonym stopniu – przyjmuje dowolną wartość z przedziału  $[0,1]$ . Natomiast w logice rozmytej zdanie przybiera wartości logiczne lingwistyczne np. całkiem prawdziwe, w większości prawdziwe, częściowo prawdziwe, raczej nieprawdziwe, absolutnie fałszywe itp. Granice tych wartości nie są ściśle określone. Często przedziały zachodzą na siebie, przenikają się lub pokrywają (R. Yager, D. Filev 1994).

Istotnym pojęciem stosowanym w logice rozmytej jest tzw. funkcja przynależności. Funkcja przynależności jest to krzywa, która obrazuje stopień przynależności każdego punktu przestrzeni rozważań do danego zbioru rozmytego, np. *dwuletni samochód jest określany jako „nowy” z wartością funkcji przynależności równą 0,8*. Jako że granica zbioru rozmytego nie jest jednoznacznie określona, postać funkcji przynależności ma charakter subiektywny i może przybierać różne kształty.

Zaproponowana przez L. Zadeha (1965, 1973) teoria zbiorów rozmytych zakłada, że w opisie działania systemu wykorzystywane są:

- tzw. zmienne lingwistyczne (np. *duży, mały, około połowy, dość wysoki, raczej istotny, smaczny itp.*);
- tzw. rozmyte zdania warunkowe wyrażające zależności między zmiennymi lingwistycznymi

w postaci reguł <IF-THEN> (jeżeli – to), np. *jeżeli temperatura jest wysoka to proces krystalizacji przebiega szybko*;

- tzw. złożeniowe reguły wnioskowania pozwalające na indukowanie wartości wynikowej na podstawie znajomości zmiennej pierwotnej (np. *obiad podany w restauracji jest smaczny*) oraz zależności między zmiennymi (np. *jeśli obiad jest smaczny i obsługa miła to napiwek będzie wysoki*).

Wymienione elementy są wystarczające do opracowania systemu wnioskowania rozmytego – FIS, ponieważ umożliwiają reprezentację wiedzy eksperta wyrażonej w języku naturalnym i jej praktyczne wykorzystanie (J. Kacprzyk 2001). Opisane podejście jest przykładem metody deskryptywnej, tj. nie opartej na modelu, jako że w sposób jawny opisywany jest sposób sterowania procesem wnioskowania rozmytego.

Znaczna większość zastosowań logiki rozmytej związana jest z procesami szeroko rozumianego sterowania (L. Rutkowski 2005). Wykorzystuje się przy tym tzw. rachunek reguł rozmytych, w którym zależności są wyrażane w postaci reguł <IF-THEN> z poprzednikami i następnikami zawierającymi zmienne lingwistyczne. Umożliwia to opracowanie systemu automatyzującego działanie w sposób zbliżony do intuicji ludzkiej. Tak więc punktem wyjścia w sterowaniu rozmytym jest rozwiązanie zaproponowane przez eksperta w danej dziedzinie w postaci reguł rozmytych (L. Zadeh 1973). Istotnym elementem systemu wnioskowania rozmytego jest baza reguł. Baza ta zawiera zdania warunkowe określające zależności przyczynowe między zmiennymi wejściowymi i wynikowymi. Celem procesu wnioskowania realizowanego w systemie FIS jest znalezienie wartości zmiennej wynikowej indukowanej przez aktualne wartości zmiennych pierwotnych oraz bazę reguł. Jeżeli wynikiem wnioskowania jest wartość rozmyta, należy przeprowadzić proces tzw. defuzyfikacji (wyostrzenia). Polega on na przekształceniu wartości rozmytych w ściśle wartości liczbowe.

Użycie reguł rozmytych umożliwia uwzględnienie nieprecyzyzności, co pozwala na podniesienie efektywności rozwiązania. Według L. Zadeha (2005) kluczowe znaczenie dla budowy systemów wykorzystujących logikę rozmytą ma stosowanie języka naturalnego pozwalającego na kompleksowy opis modelowanego systemu dokonany przez eksperta w danej dziedzinie.

#### 4. Filtracja nieliniowa

W procesie przekazu kartograficznego istnieje konieczność celowego uogólnienia informacji źródłowej czyli generalizacji. Jednym ze sposobów generalizacji jest agregacja danych przestrzennych. Istnieje wiele algorytmicznych metod agregacji; większość z nich związana jest z generalizacją danych zapisanych w formacie wektorowym. Uogólnienie danych rastrowych wiąże się z zastosowaniem metod filtracji, najczęściej o charakterystyce liniowej, np. używaniem w przetwarzaniu zdjęć lotniczych lub satelitarnych filtrów wysokich częstotliwości (wygładzających) używaniem w przetwarzaniu zdjęć lotniczych lub satelitarnych filtrów wysokich częstotliwości (wygładzających) (A. Ciołkosz, A. Kęsik 1989). Filtry wygładzające, określane inaczej jako filtry dolnoprzepustowe, redukują składowe o wysokich częstotliwościach. W wyniku ich działania otrzymujemy „rozmycie” obrazu rastrowego. Istotne znaczenie dla efektu filtracji ma wielkość użytego okna maski filtrującej (3×3 piksele, 5×5, 7×7 itp.). Duże maski powodują większe rozmycie obrazu wynikowego (E. Wiggan 2001). Filtry górnoprzepustowe, redukujące niskie częstotliwości, pozwalają z kolei na podkreślenie konturów. Oprócz prostych filtrów o charakterystyce liniowej, a więc takich gdzie wartość wynikowa jest średnią ważoną z wartości wejściowych, do wygładzania obrazów rastrowych często stosowane są także filtry nieliniowe (I. Pitas 2000). Spośród licznych filtrów nieliniowych najlepszymi właściwościami odznacza się filtr medianowy. Filtr medianowy bardzo skutecznie eliminuje lokalne szумы nie powodując ich rozmywania na większym obszarze. Zestawienie najczęściej stosowanych filtrów nieliniowych zawiera tabela 1.

Do przekształcania danych rastrowych można także stosować filtry nieliniowe o bardziej złożonej charakterystyce, np. uwzględniające więcej niż jedną zmienną wejściową. Przykładem takiego podejścia jest uwzględnianie w procesie generalizacji numerycznego modelu terenu nie tylko wartości wysokości w otaczających komórkach, lecz także wartości nachylenia lub ekspozycji. Przykładem nieliniowej filtracji danych rastrowych jest także zastosowanie automatów komórkowych do generalizacji kartograficznej form pokrycia terenu (S. Wolfram 2002, R. Olszewski 2003).

Tab. 1. Najczęściej stosowane filtry nieliniowe

Nazwa filtra	Opis działania
<b>minimum</b>	wartość wyjściowa równa jest minimum spośród wartości analizowanych w oknie maski
<b>dolny kwartyl</b>	wartość wyjściowa równa jest 25% wartości spośród wartości analizowanych w oknie maski
<b>mediana</b>	wartość wyjściowa równa jest 50% wartości spośród wartości analizowanych w oknie maski
<b>górnny kwartyl</b>	wartość wyjściowa równa jest 75% wartości spośród wartości analizowanych w oknie maski
<b>maksimum</b>	wartość wyjściowa równa jest maksimum spośród wartości analizowanych w oknie maski
<b>rozpiętość</b>	wartość wyjściowa równa jest różnicy między wartością maksimum i minimum

## 5. Nieliniowa generalizacja numerycznego modelu terenu

Zagadnienie kartograficznego modelowania i generalizacji rzeźby terenu jest szeroko opisywane w literaturze (E. Imhof 1982, R. Weibel 1991). Współcześnie jako cyfrową metodę zapisu informacji wysokościowej w bazie danych przestrzennych stosuje się numeryczny model terenu (NMT). Jest on definiowany jako numeryczna, dyskretna (punktowa) reprezentacja wysokości topograficznej powierzchni terenu, wraz z algorytmem interpolacyjnym umożliwiającym odtworzenie jej kształtu w określonym obszarze (Z. Kurczyński, R. Preuss 2000). W systemach informacji przestrzennej generowane są najczęściej dwa podstawowe typy NMT: regularny w postaci prostokątnej siatki punktów – GRID i nieregularny w postaci siatki trójkątów – TIN. Model GRID może być zarazem interpretowany jako swoista macierz wysokości, co znacząco ułatwia prowadzenie analiz przestrzennych.

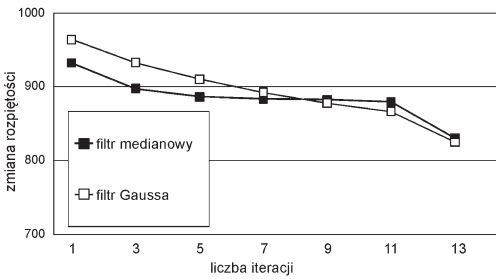
Numeryczny model terenu, jak każdy model, charakteryzuje się określonym stopniem aproksymacji modelowanej powierzchni terenu. O stopniu aproksymacji (wierności odtworzenia) NMT w najistotniejszym stopniu decydują dwa czynniki: struktura modelu i zastosowane metody aproksymacji (D. Kładoczny, W. Żyszkowska 1995). W procesie uogólniania NMT charakter i stopień generalizacji jest zdeterminowany przez typ modelu. W modelu GRID czynnikiem decydującym jest gęstość siatki oraz rodzaj algorytmu interpolacyjnego.

Zdecydowana większość prowadzonych ba-

dań skupia się na zagadnieniu doboru rozdzielczości modelu źródłowego (gęstości siatki), zakładając że interpolacja modelu wtórnego oparta jest na algorytmach liniowych. W przeprowadzonych badaniach autor podjął próbę nieliniowej filtracji numerycznego modelu rzeźby terenu, wykorzystując systemy wnioskowania rozmytego (FIS) o różnym stopniu złożoności reguł zapisanych w bazie wiedzy systemu. Uzyskane wyniki porównano z innymi metodami filtracji liniowej (np. filtrem Gaussa) i nieliniowej (np. filtrem medianowym). Analizie poddano także wpływ, jaki na uzyskane rezultaty ma liczba iteracji oraz wielkość maski filtrującej.

W przeprowadzonych badaniach jako dane źródłowe wykorzystano numeryczny model terenu dla obszaru testowego (5×5 km), obejmującego wysokie partie polskich Tatr. Tak zdefiniowany obszar testowy o znacznych deniwelacjach i wyrazistej rzeźbie terenu pozwala na łatwą weryfikację uzyskanych wyników. Dane NMT w formacie DEM zostały udostępnione przez PPWK SA. Model ten o rozdzielczości 5 m został opracowany na podstawie pomiarów fotogrametrycznych (ryc. 1a i 1b). Model ten poddano generalizacji stosując różne rodzaje systemów FIS. Uzyskane wyniki porównano z modelem źródłowym oraz NMT poddanym generalizacji klasycznymi metodami wieloetapowej filtracji liniowej i nieliniowej.

Klasyczne metody filtracji danych rastrowych, takie jak filtracja medianowa lub gaussowska, prowadzą do wygładzenia powierzchni wynikowej (ryc. 2 i 3), powodując zarazem znaczne spłaszczenie uzyskanych wyników. Spłaszczenie to wzrasta wraz ze wzrostem liczby iteracji



Ryc. 4. Wpływ liczby iteracji procesu filtracji na spłaszczenie danych wyjściowych

Fig. 4. Influence of the number of iterations in the filtration process on flattening of output data

– liczby powtórzeń procesu filtracji (ryc. 4), jak również wraz ze zwiększaniem maski filtra. W prowadzonych badaniach stosowano filtr o wielkości  $9 \times 9$  pikseli.

Znacząca zmiana rozpiętości wyników generalizowanego pliku, rozumiana jako zawężenie przedziału wysokości względnych na obszarze testowym, nie jest jedynym efektem ubocznym procesu uogólnienia NMT. Filtracja gaussowska, a zwłaszcza nieliniowa filtracja medianowa prowadzi bowiem do nieliniowych zmian morfometrycznych form rzeźby terenu. Istotne dla rzeźby wysokogórskiej formy strukturalne, takie jak linie grzbietowe i głęboko wcięte doliny rzeczne, spłaszczane są w większym stopniu niż pozostałe obszary (ryc. 5a i 5b). Zniekształcenia te znajdują także odzwierciedlenie w obrazie wynikowym, np. modyfikacji kątów nachylenia stoków (ryc. 6a i 6b).

Podobne lub znacznie gorsze wyniki uzyskuje się także stosując inne rodzaje klasycznych filtrów nieliniowych. Przykładem może być zastosowanie filtrów „dolny kwartyl” i „górny kwartyl” (ryc. 7a i 7b) prowadzące do istotnej zmiany charakterystyki rzeźby terenu. W ujęciu tym filtracja prowadzi do znaczącego poszerzenia dolin lub partii grzbietowych. Oba zastosowane modele w sposób niedopuszczalny zniekształcają charakterystykę morfometryczną obszaru.

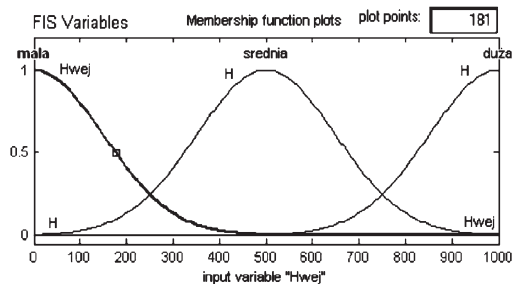
Uznając, że klasyczne metody filtracji NMT zapisanego w formie macierzy wysokości nie spełniają oczekiwań stawianych przed systemami automatycznej, kartograficznie poprawnej generalizacji obrazów rastrowych, autor podjął próbę opracowania systemu wnioskowania rozmytego jako odpowiedniego narzędzia uogólnienia modelu rzeźby<sup>1</sup>. Charakterystyka

opracowywanego systemu wnioskowania rozmytego, ze względu na silnie nieliniowy charakter funkcji przynależności stosowanych w narzędziach FIS, pozwala na zaliczenie opracowywanego systemu do klasy rozwiązań określanych jako filtracja nieliniowa.

Jako założenie przyjęto, iż metodyka prowadzonych badań powinna być relatywnie prosta, reguły warunkowe systemu FIS oparte na naturalnych zmiennych lingwistycznych, a celem filtracji nieliniowej jest uzyskanie kartograficznie poprawnych uogólnień modelu źródłowego. Założono ponadto, iż rozpiętość danych źródłowych nie może ulec spłaszczeniu, zaś proces uogólnienia nie powinien być realizowany iteracyjnie, lecz jednoetapowo. Pozwoliłoby to zarówno na znaczące uproszczenie samych obliczeń, jak i ułatwiłoby interpretację uzyskanych wyników. Bazując na powyższych założeniach autor opracował kilka wariantów systemu FIS wykorzystującego jedną lub więcej zmiennych wejściowych i różną liczbę reguł generalizacyjnych.

### Wariant 1

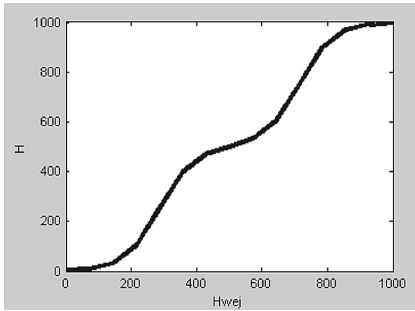
W ujęciu tym zakładamy, że istotą projektowanego modelu FIS jest nieliniowa transformacja wartości wysokości wejściowych ( $H_{wej}$ ) na wysokości) w modelu wyjściowym ( $H_{wyj}$ ). Kluczowe znaczenie dla procesu generalizacji NMT ma przy tym określenie kształtu funkcji przynależności dla zmiennych lingwistycznych określających dane wejściowe. Przyjęcie trzech wartości lingwistycznych {*małe wysokości*, *średnie wysokości*, *duże wysokości*} oraz założenie, że odpowiednie funkcje przynależności charakteryzuje rozkład normalny (ryc. 8) sprawia, iż model wynikowy cechuje znaczna nadreprezentacja wartości średnich. Wynika to z pos-



Ryc. 8. Funkcje przynależności dla zmiennej wejściowej  $H_{wej}$

Fig. 8. Membership functions of the input variable  $H_{wej}$

<sup>1</sup> Do przeprowadzenia badań wykorzystano programy: Matlab 2006a z modułami Fuzzy Logic, Matlab Compiler i Matlab Builder for .Net, Surfer 8.2 oraz własne aplikacje numeryczne.



Ryc. 9. Nieliniowa transformacja zmiennej  $H_{wej}$  na  $H_{wyj}$   
 Fig. 9. Non-linear transformation of  $H_{wej}$  variable onto  $H_{wyj}$

tacji funkcji transformującej zmienną  $H_{wej}$  na  $H_{wyj}$  (ryc. 9). Ma ona charakter silnie nieliniowy, „rozciągający” pojęcie wartości średnich. Efektem tak rozumianej transformacji jest NMT zachowujący rozpiętość danych źródłowych, lecz modyfikujący w sposób niedopuszczalny morfologię rzeźby terenu (ryc. 10).

Modyfikacja postaci funkcji przynależności określającej zmienne lingwistyczne charakteryzujących dane wejściowe pozwala jedynie na częściowe rozwiązanie tego problemu. Uzyskiwane rezultaty nie są satysfakcjonujące pod względem kartograficznym. Znacząca poprawa wyników wymaga zatem całkowitej zmiany podejścia do budowy systemu FIS.

## Wariant 2

Opracowany system wnioskowania rozmytego oparty jest na dwóch zmiennych wejściowych: wysokości ( $H_{wej}$ ) i krzywiznie lokalnej ( $K_{lok}$ ) oraz jednej zmiennej wyjściowej – względnej (wyrażonej w procentach) zmianie wysokości zgeneralizowanej w stosunku do wartości pierwotnej ( $Z_{\%}$ ). W tym ujęciu do określenia zmiany wysokości w modelu wynikowym niezbędne są zatem dwie wartości, charakteryzujące nie tylko wysokość w danym punkcie, lecz także krzywiznę. Wyznaczenie krzywizny lokalnej pozwala bowiem na zdefiniowanie i uwzględnienie w procesie obliczeniowym linii strukturalnych rzeźby terenu (ryc. 11).

Dla tak określonych danych źródłowych w systemie FIS zdefiniowano zmienne lingwistyczne i nieliniowe funkcje przynależności oraz sześć reguł warunkowych określających sposób generalizacji NMT:

1) <jeśli  $H_{wej}$  jest *bardzo mała* wówczas  $Z_{\%}$  jest *bez zmian*>

2) <jeśli  $H_{wej}$  jest *bardzo duża* wówczas  $Z_{\%}$  jest *bez zmian*>

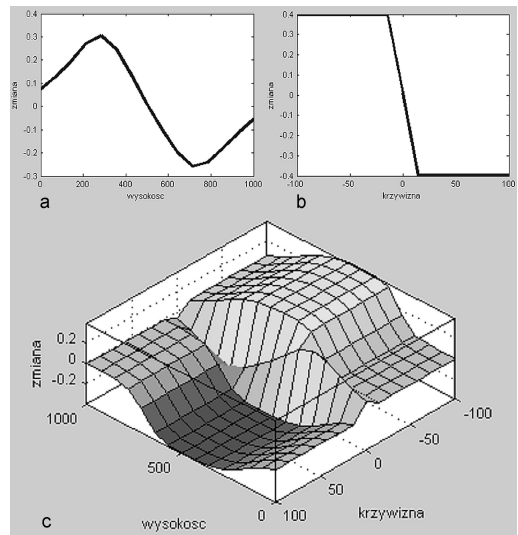
3) <jeśli  $H_{wej}$  jest *mała* i  $K_{lok}$  jest *dodatnia* wówczas  $Z_{\%}$  jest *pomniejszana*>

4) <jeśli  $H_{wej}$  jest *duża* i  $K_{lok}$  jest *ujemna* wówczas  $Z_{\%}$  jest *powiększana*>

5) <jeśli  $H_{wej}$  jest *mała* i  $K_{lok}$  jest *zerowa* wówczas  $Z_{\%}$  jest *powiększana*>

6) <jeśli  $H_{wej}$  jest *duża* i  $K_{lok}$  jest *zerowa* wówczas  $Z_{\%}$  jest *pomniejszana*>

Reguły 1–2 definiują zachowanie wartości ekstremalnych (globalne minimum i maksimum dla danych źródłowych), reguła 3 mówi, iż „jeśli jest to dolina to należy ją pogłębić”, zaś reguła 4 „jeśli jest to grzbiet to należy go wypiętrzyć”. Reguły 5–6 określają działanie systemu FIS dla obszarów nie będących formami strukturalnymi terenu, odpowiednio „jeśli jest nisko to należy wypiętrzyć” i „jeśli jest wysoko to należy obniżyć”. Stopień cyfrowego wypiętrzenia lub obniżenia definiowany jest poprzez określenie parametrów odpowiednich funkcji przynależności. Zależność pomiędzy zmiennymi wejściowymi a zmienną wyjściową (ryc. 12c) określa nieliniowe działanie systemu FIS. Zależność uzys-



Ryc. 12: a. Nieliniowa zależność zmiennej  $Z_{\%}$  od  $H_{wej}$ ;  
 b. Nieliniowa zależność zmiennej  $Z_{\%}$  od  $K_{lok}$ ;

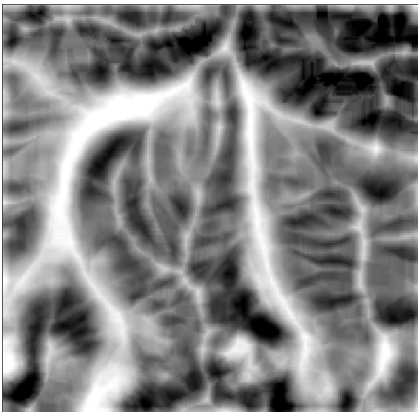
c. Nieliniowa zależność zmiennej  $Z_{\%}$  od  $H_{wej}$  oraz  $K_{lok}$

Fig. 12: a. Non-linear dependence of the  $Z_{\%}$  variable from  $H_{wej}$ ; b. Non-linear dependence of the  $Z_{\%}$  variable from  $K_{lok}$ ; c. Non-linear dependence of the  $Z_{\%}$  variable from  $H_{wej}$  and  $K_{lok}$

kiwanych wyników od wysokości danych źródłowych ma charakter funkcji sinusoidalnej – największa zmiana związana jest z wartościami „dość małymi” i „dość dużymi”, najmniejsza zaś z małymi, średnimi i dużymi (ryc. 12a). Wpływ krzywizny jest określany w postaci funkcji skokowej (ryc. 12b). Uzyskiwane wyniki (ryc. 13) wskazują, że zastosowane podejście jest lepsze niż najprostszy system FIS oparty na nieliniowej transformacji jednej zmiennej. Opracowany system wykorzystujący dwie zmienne lingwistyczne jest łatwo skalowalny, pozwala na zachowanie istotnych form strukturalnych rzeźby terenu oraz charakterystyki liczbowej modelu (wartości ekstremalne, średnia, odchylenie standardowe, mediana itp.). System jest jednak bardzo czuły na dobrane wartości parametrów poszczególnych funkcji. Linie strukturalne rzeźby terenu zostały w modelu wynikowym (ryc. 13) zbyt uwypuklone w stosunku do danych pierwotnych. Najistotniejszą wadą tego podejścia jest jednak jednakowe traktowanie zarówno istotnych jak i marginalnych form strukturalnych (dolin i grzbietów).

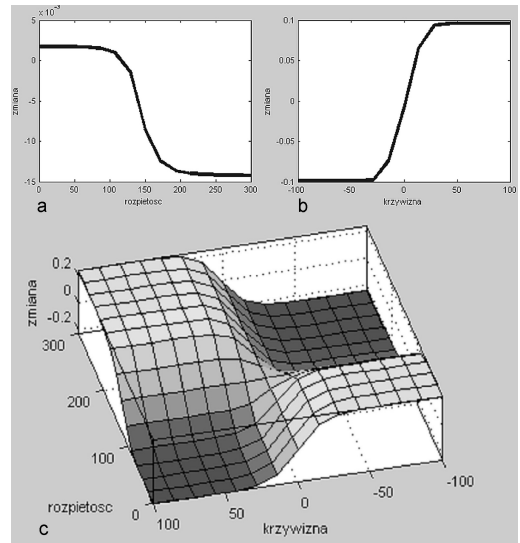
### Wariant 3

W wariancie tym w systemie FIS wyznaczana jest również względna wartość zmiennej wyjściowej ( $Z_{\%}$ ). Zastosowano także dwie zmienne wejściowe, rezygnując jednak z wartości pierwotnej, czyli wysokości terenu w źródłowym NTM. Jako zmienne wejściowe zastosowano krzywiznę lokalną ( $K_{lok}$ ) oraz lokalną rozpiętość danych źródłowych ( $R_{lok}$ ) określaną w polu  $9 \times 9$  pikseli (ryc. 14). Wartość ta określa istotność poszczególnych form terenu.



Ryc. 14. Wysokości względne na obszarze testowym ( $R_{lok}$ )

Fig. 14. Relative altitudes within the test site ( $R_{lok}$ )



Ryc. 15: a. Nieliniowa zależność zmiennej  $Z_{\%}$  od  $R_{lok}$ ; b. Nieliniowa zależność zmiennej  $Z_{\%}$  od  $K_{lok}$ ; c. Nieliniowa zależność zmiennej  $Z_{\%}$  od  $R_{lok}$  oraz  $K_{lok}$

Fig. 15: a. Non-linear dependence of the  $Z_{\%}$  variable from  $R_{lok}$ ; b. Non-linear dependence of the  $Z_{\%}$  variable from  $K_{lok}$ ; c. Non-linear dependence of the  $Z_{\%}$  variable from  $R_{lok}$  and  $K_{lok}$

Dla tak określonych danych źródłowych w systemie FIS zdefiniowano nieliniowe funkcje przynależności oraz pięć reguł warunkowych określających sposób generalizacji NMT:

- 1) <jeśli  $R_{lok}$  jest mała i  $K_{lok}$  jest ujemna wówczas  $Z_{\%}$  jest zwiększana>
- 2) <jeśli  $R_{lok}$  jest mała i  $K_{lok}$  jest dodatnia wówczas  $Z_{\%}$  jest pomniejszana>
- 3) <jeśli  $R_{lok}$  jest duża i  $K_{lok}$  jest ujemna wówczas  $Z_{\%}$  jest pomniejszana>
- 4) <jeśli  $R_{lok}$  jest duża i  $K_{lok}$  jest dodatnia wówczas  $Z_{\%}$  jest zwiększana>
- 5) <jeśli  $R_{lok}$  jest średnia wówczas  $Z_{\%}$  jest bez zmian>

Interpretacja reguł 1–4 jest następująca: znaczące grzbiety są wypiętrzane, znaczące doliny pogłębiane, zaś mniej istotne formy strukturalne ulegają spłaszczeniu. Ostania z reguł warunkowych pozwala na zachowanie gładkości nieliniowej transformacji danych źródłowych (ryc. 15c). Zależność uzyskiwanych wyników, zarówno od rozpiętości (ryc. 15a) jak i krzywizny (ryc. 15b) danych źródłowych ma charakter funkcji sigmoidalnej.

Uzyskiwane wyniki są zadowalające zarówno pod względem wartości liczbowych (zachowa-

nie charakterystycznych parametrów rozkładu wysokości terenu), jak i poprawności kartograficznej. Mniej istotne grzbiety i doliny ulegają wygładzeniu przy jednoczesnym podkreśleniu istotnych form strukturalnych (ryc. 16). System wnioskowania rozmytego jest w pełni skalowalny, umożliwiając dowolną modyfikację zarówno liczby zmiennych lingwistycznych, kształtu funkcji przynależności jak i reguł warunkowych. Normalizacja wartości zmiennych wyjściowych pozwala zarazem na uniwersalne stosowanie tak określonej struktury systemu FIS dla zróżnicowanych pod względem morfologicznym form rzeźby terenu.

## 6. Wyniki

Analizując uzyskane wyniki, należy zwrócić uwagę na efektywność modelowania nieliniowego. Do określenia kartograficznie poprawnego modelu generalizacji danych przestrzennych wystarczające jest zastosowanie dwóch łatwo wyznaczalnych zmiennych wejściowych, zdefiniowanie kilku prostych reguł oraz określenie funkcji przynależności charakteryzujących zmienne lingwistyczne.

Dużą zaletą proponowanej techniki, rozważanej jako alternatywa dla innych metod numerycznej generalizacji NMT, jest wysoki stopień automatyzacji prowadzonych przekształceń

oraz znaczny stopień uzyskiwanego uogólnienia. Przeprowadzone badania wskazują, że złożony, zgeneralizowany obraz wynikowy rzeźby terenu może być efektem zastosowania pojęciowo prostych technik modelowania nieliniowego, takich jak systemy wnioskowania rozmytego. W omawianym kontekście system FIS może być interpretowany jako nieliniowa transformacja modelu NMT. W stosunku do innych technik modelowania nieliniowego FIS ma wiele zalet:

- pozwala zachować parametry rozkładu danych źródłowych (skośność, rozpiętość itp.),
- umożliwia jawne i łatwo interpretowalne określenie reguł w bazie wiedzy (zależne od skali, przeznaczenia, szkoły kartograficznej itp.),
- oparty jest na zmiennych lingwistycznych, co ułatwia zrozumienie istoty procesu generalizacji,
- umożliwia skalowalność wyników poprzez parametryzację funkcji przynależności,
- proces generalizacji jest jednoiteracyjny,
- rozmytość obliczeń pozwala na uzyskanie gładkiej powierzchni wynikowej.

Zastosowanie logiki rozmytej i systemów generalizacji wykorzystujących wnioskowanie rozmyte pozwala zarazem na automatyzację procesu uogólniania z jednoczesnym zachowaniem subiektywności generalizacji kartograficznej. Uzyskane efekty są zależne od tworzonej przez badacza bazy wiedzy systemu FIS.

## Literatura

- Chrobak T., 1999, *Badanie przydatności trójkąta elementarnego w komputerowej generalizacji kartograficznej*. Kraków: Uczelniane Wydawn. Naukowo-Dydaktyczne AGH.
- Ciołkosz A., Kęsik A., 1989, *Teledetekcja satelitarna*. Warszawa: PWN.
- Duch W., 2005, *Dokąd zmierza inteligencja obliczeniowa?* <http://www.phys.uni.torun.pl/publications/kmk/03-CI-przyszlosc.pdf>
- Imhof E., 1982, *Cartographic relief presentation*. Berlin: de Gruyter.
- Iwaniak A., Olszewski R., Paluszyński W., 2003, *A comparison of urban area aggregation in satellite images using neural networks, cellular automata and median filtration*. W: *21st International Cartographic Conference of the ICA. Abstract of papers. 10–12 August, Durban 2003*, s. 36.
- Kacprzyk J., 2001, *Wieloletapowe sterowanie rozmyte*. Warszawa: Wydawn. Naukowo-Techniczne.
- Kępińska M., Olszewski R., 2002, *Od Bertina i Hotelinga do Zadeha i Kohonena, czyli o zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych w kartografii tematycznej*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 34, nr 2, s. 103–114.
- Kładoczny D., Żyszkowska W., 1995, *Struktura numerycznych modeli terenu a ich obraz poziomicowy*. „Polski Przegl. Kartogr.” T. 27, nr 4, s. 177–191.
- Kurczyński Z., Preuss W., 2000, *Podstawy fotogrametrii*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Maćkowiak A., Ratajczak W., 1996, *Wyznaczanie rozmytych granic regionalnych*. W: *Podstawy regionalizacji geograficznej*. Praca zbiorowa pod red. T. Czyż. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe, s. 97–126.
- Makowski A. (red.), 2005, *System informacji topograficznej kraju. Teoretyczne i metodyczne opracowanie koncepcyjne*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW.
- McMaster R. B., 1991, *Conceptual frameworks for geographical knowledge*. W: *Map generalization: Making rules for knowledge representation*. Red. B. Buttenfield, R.B. McMaster. London: Longman, s. 21–39.
- Nilsson N.J., 1998, *Artificial intelligence: a new synthesis*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Olszewski R., 2002, *Generalisation of a coast line – a multi-fractal approach*. „Geodezja i Kartografia” T. 51, 2002, z. 4, s. 191–201.



- Olszewski R., 2003, *Grid generalization based on cellular automata theory*. „Geodezja i Kartografia” T. 52, z. 2, s. 57–68.
- Olszewski R., 2003, *Modelowanie kartograficzne z wykorzystaniem neurorozmytych automatów komórkowych*. „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” Vol. 13A, Wrocław, s.171–180.
- Olszewski R., 2005, *Utilisation of artificial intelligence methods and neurofuzzy algorithms in the process of digital terrain model generalisation*. W: *XXII International Cartographic Conference. 9–10 July, A Coruña 2005, Spain. Abstract of papers*, s. 158–159.
- Olszewski R., 2006, *Wykorzystanie metod inteligencji obliczeniowej w procesie modelowania kartograficznego*. W: *Świat techniki w kartografii*. Wrocław (w druku).
- Pitas, I., 2000, *Digital image processing algorithms and applications*. New York: John Wiley and Sons.
- Poole D., Mackworth A., Goebel R., 1998, *Computational intelligence. A logical approach*. Oxford University Press.
- Rutkowski L., 2005, *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. Warszawa: Wydawn. Naukowe PWN.
- Weibel R., 1991, *Amplified intelligence and rule-based systems. W: Map generalization: making rules for knowledge representation*. Red. B. Buttenfield, R. B. McMaster. London: Longman, s. 172–186.
- Weibel R., 1995, *Map generalization in the context of digital systems*. „Cartography and GIS” Vol. 22, no. 4, s. 3–10.
- Wiggin E., 2001, *Elementary digital filtering*. <http://www.gamedev.net/reference/articles/article1068.asp>
- Wolfram S., 2002, *A new kind of science*. Winnipeg: Wolfram Media Inc.
- Yager R.R., Filev D.P., 1994, *Essentials of fuzzy modeling and control*. New York: Wiley.
- Zadeh L.A., 1965, *Fuzzy sets*. „Information and Control” Vol. 8, s. 338–353.
- Zadeh L.A., 1973, *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*. „IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics” SMC-2, s. 28–44.
- Zadeh L.A., 2005, *Toward a generalized theory of uncertainty*. Wystąpienie w Polskiej Akademii Nauk 15 kwietnia 2005 r., <http://www.cs.berkeley.edu/~zadeh/>

Recenzował dr hab. Artur Magnuszewski

## Fuzzy interference systems (FIS) as a tool of non-linear generalization of digital terrain models

### Summary

Key words: generalization, non-linear filtering, fuzzy inference systems, digital terrain model

Classic filtering methods of raster data (e.g. digital terrain model), such as median or gaussian filtering level the result surface, and consequently flatten the end results. A significant modification of results' range, understood as narrowing of the scope of relative altitudes in the test area, is not the only side effect of the process of DTM generalization. Gaussian filtering, and especially non-linear median filtering leads to non-linear morphometric modifications of generalized terrain relief. Structural forms common for high mountain relief, such as ridge lines and deeply cut river valleys are flattened more than other forms.

In the article the author attempts to elaborate a non-linear method of raster data filtering by defining the objective generalization rules of local character. These rules determine the global process of cartographic generalization of raster-type data. In order to build a database which would enable the realization of the process of spatial data generalization, fuzzy inference systems (FIS) are applied. Application

of fuzzy logic makes it possible to define generalization rules for non-linear filtering of a digital terrain model recorded in the form of an altitude matrix.

In the discussed context FIS can be interpreted as a non-linear digital terrain model transformation. Compared to other non-linear modeling techniques FIS has many advantages:

- it keeps the parameters of source data distribution (slant, range, etc.)
- enables open and easy to interpret definition of rules in the data base (in relation to scale, purpose, cartographic school, etc.),
- it bases on linguistic variables, which facilitates the understanding of the generalization process,
- it facilitates scalability of the results through parametrization of the membership function.

Application of fuzzy logic and generalization systems using fuzzy inference makes it possible

to automatize the generalization process while preserving subjectivity of cartographic generalization. The final effects depend on the FIS database created by the researcher.

Translated by M. Horodyski

## Системы размытого вывода (FIS) как орудие нелинейной генерализации цифровой модели местности

### Резюме

Классические методы фильтрации растровых данных (например, цифровой модели местности – ЦММ), такие как медианная или гауссовая фильтрация, ведут к сглаживанию итоговой поверхности, вызывая одновременно значительную сплюснутость полученных результатов. Значительное изменение диапазона результатов генерализированного массива, понимаемое как сужение интервала относительных высот на тестовом пространстве, не является единственным побочным эффектом процесса обобщения ЦММ. Ибо гауссовая фильтрация, а особенно нелинейная медианная фильтрация, ведёт к нелинейным морфометрическим изменениям обобщённых форм рельефа местности. Существенные для высокогорного рельефа структурные формы, такие как хребтовые линии и глубоко врытые речные долины, сплющиваются в большей степени, чем остальные пространства.

В статье автор предпринял попытку разработки нелинейного метода фильтрации растровых данных путём определения объективных правил генерализации локального характера. Эти правила детерминируют глобальный процесс картографической генерализации данных растрового характера. Для создания базы знаний, дающей возможность реализации процесса обобщения пространственных данных, использовано системы размытого вывода (анг. fuzzy inference systems – FIS). Примене-

ние размытой логики позволяет определить правила генерализации, дающие возможность проведения нелинейной фильтрации цифровой модели местности, записанной в форме матрицы высот.

В рассматриваемом контексте система FIS может быть интерпретирована как нелинейная трансформация ЦММ. По сравнению с другими техниками нелинейного моделирования FIS имеет много достоинств:

- разрешает сохранить параметры расположения исходных данных (наклонность, ширину и т.д.),

- даёт возможность явного и лёгко интерпретированного определения правил в базе знаний (в зависимости от масштаба, предназначения, картографической школы и т.п.),

- опирается на лингвистических переменных, что облегчает понимание сущности процесса генерализации,

- даёт возможность градуировать результаты путём параметризации функции принадлежности.

Применение размытой логики и систем генерализации, использующих размытые выводы, разрешает заодно использовать автоматизацию процесса обобщения с одновременным сохранением субъективности картографической генерализации. Полученные эффекты зависят от создаваемой исследователем постройки базы знаний системы FIS.

*Перевод Р. Толстикова*

