

AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie



Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Katedra Geomatyki

Rozprawa doktorska

**METODA WYKRYWANIA I USUWANIA KONFLIKTÓW
GRAFICZNYCH POWSTAŁYCH W PROCESIE
AUTOMATYCZNEJ GENERALIZACJI
KARTOGRAFICZNEJ**

MARIA ŻUKOWSKA

PROMOTOR:

prof. dr hab. inż. TADEUSZ CHROBAK

Kraków 2008

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007/08

jako projekt badawczy nr N526 018 32 / 1461.

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	1
1.1. Systemy Informacji Geograficznej.....	3
1.2. Generalizacja kartograficzna.....	6
1.3. Konflikty graficzne.....	17
1.4. Teoria Perkala.....	20
2. Sformułowanie problemu.....	23
2.1. Cele pracy.....	24
3. Analiza istniejących algorytmów identyfikowania i usuwania konfliktów graficznych pod względem ich obiektywności oraz efektywności.....	25
3.1. Kolizje typu: punkt – punkt oraz punkt – linia (algorytm Müllera).....	26
3.2. Samoprzecięcia oraz przecięcia linii – metoda Saalfelda.....	28
3.3. Samoprzecięcia linii. Algorytm Wu–Marquez.....	30
3.4. Metoda obiektywna – ograniczenie występowania konfliktów oparte na wartości progowej i regule geometrycznej	33
4. Struktura bazy danych a konflikty.....	35
4.1. Warstwy i reguły tematyczne.....	35
4.2. Logiczne struktury danych i reguły logiczne.....	36
4.3. Związki i reguły topologiczne.....	37
4.4. Relacje i reguły geometryczne.....	38
5. Rola klasyfikacji, hierarchii i topologii danych w procesie rozwiązywania konfliktów.....	39
5.1. Hierarchia klas i klasyfikacja obiektów.....	40
5.2. Zmodyfikowana hierarchia wierzchołków.....	42
5.3. Topologia.....	49
6. Zastosowanie teorii obiektywnej generalizacji Perkala.....	62
6.1. Modyfikacja kryterium rozpoznawalności rysunku dla potrzeb rozwiązywania konfliktów.....	64
7. Metoda identyfikowania i eliminacji konfliktów graficznych.....	67
7.1. Identyfikacja konfliktów.....	67
7.2. Grupy konfliktów.....	69
7.3. Rozwiązywanie grup konfliktów.....	74
7.4. Ogólny algorytm rozwiązywania konfliktów graficznych.....	76
7.5. Wpływ wyboru punktów stałych procesu upraszczania na rozwiązywanie konfliktów.....	81
7.6. Miejsce algorytmów i reguł odpowiedzialnych za wykrywanie konfliktów w systemach GIS.....	83
8. Zastosowanie metody identyfikacji i eliminacji konfliktów graficznych w procesie automatycznego upraszczania obiektów.....	88
8.1. Wykrywanie i eliminacja konfliktów wewnętrznych powstałych w procesie upraszczania geometrii pojedynczych obiektów.....	89
8.2. Zastosowanie metody wykrywania i usuwania konfliktów graficznych w rastrowych technikach pozyskiwania danych.....	112
9. Podsumowanie.....	116
Literatura.....	119
Spis rysunków.....	124
Spis tabel.....	126
Spis wykresów.....	127
Spis załączników.....	128

W owym Cesarstwie Sztuka Kartografii osiągnęła taką Doskonałość, że Mapa jednej tylko Prowincji zajmowała całe Miasto, a Mapa Cesarstwa całą Prowincję. Z czasem te Niezmierne Mapy okazały się już niezadowolające i Kolegia Kartografów sporządziły Mapę Cesarstwa, która posiadała Rozmiar Cesarstwa i pokrywała się z nim w każdym Punkcie. Mniej Oddane Studiom Kartografii Następne Pokolenia doszły do wniosku, że ta obszerna Mapa jest Nieużyteczna i nie bez Bezbożności oddali ją na Pastwę Słońca i Zim. Na Pustyniach Zachodu zachowały się rozczłonkowane Ruiny Mapy, zamieszkałe przez Zwierzęta i przez Żebraków; w całym Kraju nie ma innej pozostałości po Dyscyplinach Geograficznych.

[J. L. Borges, "O ścisłości w nauce"]

1. WPROWADZENIE*

Od najdawniejszych czasów mapy stanowiły z jednej strony sposób prezentacji danych przestrzennych, przez długi czas jedyny dostępny, z drugiej zaś były niezastąpionym źródłem informacji o odległościach, kierunkach i wielkości obszarów oraz jako pomoc w odkrywaniu i rozumieniu rozmieszczenia zjawisk i relacji przestrzennych (Kraak, Ormeling 1996). Obecnie, wraz z rozwojem technologii cyfrowej, mapy zaczęto prezentować wprost na ekranach monitorów, jak również łączyć je z bazami danych, zarówno przestrzennych jak i opisowych, co doprowadziło wprost do powstania programów komputerowych, a z czasem całych środowisk określanych dziś jako GIS, czyli systemy informacji geograficznej (ang. *Geographical Information Systems*). W ten sposób mapy przestały być jedynie ostatecznym produktem. Stały się nie tylko sposobem prezentacji, ale również przeprowadzania i wizualizacji analiz przestrzennych. Pojawiły się także nowe możliwości tworzenia map, takich jak mapy animowane lub trójwymiarowe.

Mapa stanowi efektywną metodę wizualnego przekazu informacji, zbliżoną w swej istocie do obrazów, które człowiek tworzy w swej świadomości. Przestrzenne uporządkowanie, organizacja obserwowanych obiektów (czy to najprostsze relacje topologiczne, typu wewnątrz, na zewnątrz, obok, blisko, daleko, czy też bardziej skomplikowane, związane

* Rozdziały 1, 1.2.1 i 1.2.2 powstały w oparciu o fragmenty niepublikowanej pracy magisterskiej Autorki: Kisiel M., 2004. *Generowanie mapy tematycznej z bazy danych na przykładzie mapy rozmieszczenia ludności w rejonach komunikacyjnych miasta Krakowa.*

z lokalizacją przedmiotu w przestrzeni) stanowią jedną z ważniejszych cech percepcji przestrzeni geograficznej przez człowieka (Robinson i in. 1978).

W semiotyce kartograficznej można wyróżnić dwa zasadnicze podejścia do mapy (Ostrowski 2001): traktując ją jako specyficzny język, lub też logiczno – graficzny model rzeczywistości. Mapa stanowi zarówno model myślowy jak i graficzny, przy czym te dwie jej cechy są ze sobą ściśle związane i wzajemnie uwarunkowane. Tworzenie modelu kartograficznego ma przede wszystkim na celu poznanie fragmentu przestrzeni geograficznej. Wobec jej złożoności niezbędne staje się uproszczenie w celu dostosowania modelu do możliwości percepcyjnych człowieka. Mapa jako model przestrzeni geograficznej pozostaje w określonej relacji podobieństwa do prezentowanego fragmentu rzeczywistości, co odpowiada wymiarowi semantycznemu, który z kolei zbliżony jest do koncepcyjnego etapu opracowania mapy. Wymiar syntaktyczny odpowiada natomiast relacji między znakami w systemie, a więc graficznej redakcji mapy. Wreszcie wymiar pragmatyczny określa stosunek znaku do odbiorcy i odpowiada percepcji mapy oraz sposobom jej wykorzystania.

Tak więc mapa to specyficzny sposób odzwierciedlenia rzeczywistości w formie modelu przestrzennego zawierającego ilościową i jakościową charakterystykę zjawisk realnych. *„Mapami geograficznymi nazywamy określone matematycznie uogólnione przedstawienia obrazowo – znakowe powierzchni ziemi na płaszczyźnie, pokazujące rozmieszczenie, stan i powiązania różnych zjawisk przyrodniczych i społecznych, wybieranych i charakteryzowanych odpowiednio do przeznaczenia każdej konkretnej mapy.”* (Saliszczew 1976).

Robinson i in. (1978) zwracają z kolei uwagę na przestrzenne uporządkowanie mapy, które osiąga się poprzez określone zależności matematyczne między przedstawionymi obiektami: odległości, kąty i powierzchnie muszą być przetworzone według ściśle określonych zasad odwzorowań kartograficznych. Stosunek zaś między światem rzeczywistym a mapą określa jej skala.

Podejście do map od strony informatycznej pozwala na jeszcze pełniejsze jej docenienie jako specyficznej formy przetwarzania, prezentacji i analizy informacji przestrzennej. Mapa pozwala na jednoczesną, całościową percepcję przedstawień kartograficznych, naoczne zróżnicowanie terytorialne oraz na łatwą analizę związków i prawidłowości przestrzennych.

Szczególnie należy podkreślić rolę mapy jako modelu przestrzennego oraz pojęciowego. Treść mapy stanowić bowiem mogą zjawiska rzeczywiste (np. miasta) i abstrakcyjne (np. gęstość zaludnienia), przedmioty realne (np. istniejąca sieć rzeczna) oraz przewidywane (np. projektowana autostrada). Istotna jest również możliwość przedstawienia na mapach pewnych procesów: przemieszczenia zjawisk, ich zmian przestrzennych oraz rozwoju w czasie, czyli w dalszym ciągu modelowania rzeczywistości. Mapa stanowi zatem, w procesie przekazu informacji, rodzaj kanału, przez który informacje o świecie rzeczywistym (źródle informacji), zakodowane dzięki użyciu ideogramów (znaków kartograficznych), trafiają do odbiorcy. Dlatego też, aby mapa spełniała swoje zadanie, czyli była zrozumiała i czytelna dla odbiorcy, wymagane jest od jej twórców zrozumienie zasad funkcjonowania wszystkich elementów tego systemu informacyjnego, jakim jest mapa.

1.1. Systemy Informacji Geograficznej*

Jeszcze kilkadziesiąt lat temu głównym środkiem przekazu informacji geograficznych były mapy papierowe. Jednak wraz z pojawieniem się technologii umożliwiających akwizycję i digitalizację danych przestrzennych (w tym geograficznych)¹ oraz interaktywną ich manipulację i analizy, powstał problem dedykowanego oprogramowania, określanego jako systemy GIS. Mają one za zadanie przechowywanie danych przestrzennych, pobieranie i łączenie ich w celu stworzenia nowych reprezentacji przestrzeni geograficznej, zapewnienie narzędzia do analiz przestrzennych oraz symulacji, szeroko wykorzystywanych m. in. w administracji publicznej, w przedsiębiorstwach zarządzających transportem i innych.

W związku z ciągle rosnącą ilością danych przestrzennych, jednym z głównych zadań stawianych przed systemami GIS, jak twierdzą Rigaux i in. (2002), jest efektywne zarządzanie olbrzymimi bazami danych, w których zapisane są specyficzne, złożone dane. Tradycyjne relacyjne systemy zarządzania bazami danych (ang. *Data Base Management System* – DBMS), stosowane w aplikacjach biznesowych, zarządzają dużymi, ale prostymi zbiorami danych. Okazuje się więc, że systemy te nie umożliwiają zarządzania danymi

* Rozdział 1.1 powstał w oparciu o fragmenty publikacji:

Żukowska M., 2007. *Miejsce reguł i algorytmów usuwania konfliktów graficznych w trójwarstwowej architekturze systemów GIS*. Materiały KKMU II, UWND AGH, Kraków.

¹ Pojęcie danych przestrzennych jest szersze niż danych geograficznych, gdyż oprócz obiektów już istniejących w przestrzeni geograficznej obejmuje m.in. obiekty projektowane.

geograficznymi, w szczególności z powodu nieodłącznego przestrzennego charakteru tych danych.

1.1.1. Charakter informacji geograficznej

Ponieważ w systemach GIS stosuje się wizualizację (np. wyników analiz) w formie map, konieczne jest rozróżnienie pomiędzy obiektem w bazie danych a obiektem na mapie. Konieczne więc staje się zdefiniowanie nowych pojęć (Luaces i in. 2004a). Tak więc *obiekt geograficzny* jest reprezentacją bazodanową obiektu występującego w świecie rzeczywistym. Składa się on z *danych przestrzennych*, czyli geometrii opisującej jego kształt i położenie, oraz *danych opisowych*, czyli atrybutów alfanumerycznych opisujących znaczenie geograficzne. Z kolei *obiekt kartograficzny* to wizualizacja obiektu geograficznego na mapie. Co za tym idzie – przed systemem informacyjnym stoi zadanie zapewnienia wsparcia dla dwóch typów zapytań do bazy danych: alfanumerycznych, identycznych z tradycyjnymi, oraz geograficznych. A więc system musi wspierać mechanizmy zapytań nie tylko przy pomocy operatorów relacyjnych, ale również predyktorów i funkcji geograficznych. Potrzebna jest również możliwość wizualizacji wyników obu typów zapytań.

Ponadto, w przypadku przechowywania danych przestrzennych przy użyciu tradycyjnych typów danych, implementacja operatorów geograficznych i procedur wizualizacji jest skomplikowana i nieefektywna. Lepsze efekty daje wprowadzenie nowych typów danych, takich jak: punkt, krzywa, powierzchnia, jak również ich zbiorów (kolekcji), np. kolekcji punktów. Dodatkowo istnieją specyficzne analizy oraz metody wizualizacji, stosowane na danych przestrzennych, które muszą być włączone w system informacji. A więc już w modelu koncepcyjnym należy zapewnić taki zbiór podstawowych operacji na abstrakcjach danych, które muszą z kolei być powiązane z językiem zapytań do bazy danych, aby umożliwić pobranie żądanych danych (Luaces i in. 2004b).

1.1.2. Cyfrowa reprezentacja danych

Zarówno systemy GIS jak i kartografia cyfrowa operują danymi przestrzennymi w celu przedstawienia opisu obiektów czy też zjawisk, bądź jego przetworzenia dokonującego się w procesie analiz przestrzennych. Sposób zapisu danych przestrzennych oraz ich atrybutów

zależy od przyjętego modelu. Wyróżnia się dwa podstawowe modele danych: model wektorowy oraz model rastrowy. Niejako pochodnym od nich jest model siatki (regularnej i nieregularnej, np. GRID, TIN).

W modelach wektorowych elementem kluczowym jest wyodrębniony z przestrzeni obiekt. Reprezentacja cyfrowa linii obrazującej obiekt geograficzny w wektorowym modelu danych składa się z ciągów punktów stanowiących jej wierzchołki, które parami tworzą odcinki. W modelu dwuwymiarowym punkty te obejmują pary współrzędnych (x, y) . Oprócz tego możliwa jest również implementacja oparta na matematycznym zapisie krzywych ciągłych, a więc opisująca krzywe wygładzone, na przykład przy pomocy B-splajnow. Bez względu na sposób zapisu linie mogą być zarówno obrazem krzywych (w tym łamanych) otwartych, opisujących kształt obiektów liniowych (np. sieć drogowa lub hydrograficzna), mogą one również być krzywymi zamkniętymi, których kształt opisuje brzeg obiektów powierzchniowych. W systemie tym zapis punktu, linii bądź wieloboku może być dokonany z pełną dokładnością, wyrażoną w określonym układzie współrzędnych. Atrybuty opisowe odnoszone są bezpośrednio do tak utworzonych obiektów.

Model rastrowy charakteryzuje się tym, iż elementem kluczowym jest tu najmniejszy element rastra – piksel. Przestrzeń nie jest więc widziana w sposób ciągły, lecz ziarnisty – każdemu obiektowi przyporządkowana jest pewna ilość pikseli. Model rastrowy tworzy się poprzez podział obrazu na pewną siatkę (kwadratów, prostokątów), gdzie piksel to właśnie najmniejsze oczko siatki. Każdemu elementowi siatki jest następnie przypisywana jakaś wartość, w przypadku obrazów – jasność. Elementy siatki opisywane są poprzez ich „współrzędne” w tablicy reprezentującej liczbę wierszy i kolumn siatki rastra. Atrybuty opisowe odnoszą się do każdego z najmniejszych elementów rastra.

W dalszej części, o ile nie powiedziano inaczej, omawiane będą zagadnienia związane z modelem wektorowym, w którym linia prezentowana jest jako dyskretny zbiór uporządkowanych punktów.

1.2. Generalizacja kartograficzna

1.2.1. Pojęcie generalizacji

Możliwość analizy obszaru o dowolnej rozległości i powierzchni na mapie uwzględnia odwzorowanie kartograficzne, pomniejszenie obiektów oraz przedstawienie ich generalizacji. Przedstawienia kartograficzne mają podstawowe cechy modelu: abstrahowanie od całości w celu badania części, uproszczenie polegające na rezygnowaniu z uwzględniania wielu cech i związków, a zachowaniu jedynie najistotniejszych oraz uogólnienie wydzielające ogólne cechy. Stanowią one istotę generalizacji (z łac. *generalis* – uogólnienie) rozumianej jako *wyбір rzeczy najważniejszych i istotnych oraz ich celowe uogólnienie* (Saliszczew 1976). Zgodnie z tą definicją można wskazać cztery główne czynniki oddziałujące na generalizację: przeznaczenie mapy, jej tematykę i skalę oraz właściwości przedstawianego obszaru.

Z kolei (Ratajski 1973) generalizacją nazywa *redukcję informacji chorologicznej (pierwotnej) wyrażającą dążenie do optymalnego kompromisu pomiędzy tendencją do przekazania maksimum tej informacji, a tendencją zastosowania minimalnej ilości sygnałów kartograficznych*. Oprócz naturalnej redukcji pierwotnych danych na temat rzeczywistych zjawisk i faktów, polegającej na odrzuceniu tych, które nie mają cech nadających się do przedstawienia kartograficznego, potrzebny jest dalszy dobór określonych cech i dostosowanie ich do pojemności mapy i możliwości percepcyjnych odbiorcy. Umiejętna generalizacja poprawia więc efektywność mapy oraz optymalny odbiór informacji, zgodnie z intencją kartografa.

1.2.2. Generalizacja cyfrowa

Chociaż od czasu ogłoszenia przez E. Sydowa słynnych „Drei Kartenklippen”, gdzie wśród nierozwiązywalnych „raf” kartografii, oprócz przedstawienia na mapie nierozwijalnej powierzchni sfery oraz przedstawienia trzeciego wymiaru, znalazła się również generalizacja kartograficzna, minęło już niemal 150 lat, to wciąż pozostaje ona postępowaniem, które najbardziej wymyka się ścisłym regułom i sztywnym normom. Cechuje się również największą indywidualnością. Każde nowe opracowanie, nowe technologie wymagają odmiennej generalizacji. Tak było w okresie kartografii manualnej i podobnie jest obecnie,

gdy technologia komputerowa przejmuje pewne etapy powstawania mapy, m. in. właśnie proces generalizacji.

Wraz z rozwojem technik komputerowych pojawiły się programy bezpośrednio wspomagające pracę kartografa, a więc służące do redagowania map, jak również systemy informacji geograficznej, których integralną częścią są mapy w różnych skalach. Pojawiła się więc potrzeba opracowania innego podejścia do procesu generalizacji.

Biorąc pod uwagę zarówno stosowane obecnie techniki przetwarzania danych kartograficznych, jak i problemy związane z przechowywaniem ich w bazach danych, generalizację kartograficzną można na nowo zdefiniować jako *proces wyboru (zależny od: przeznaczenia mapy, ilości i jakości danych) zbioru danych przestrzennych i jego przekształcenia (uwzględniającego: klasyfikację danych, ich upraszczania i implikowania) w celu podniesienia przekazu kartograficznego utraconego na skutek zmniejszenia skali mapy* (Chrobak i in. 2007).

Przeprowadzając generalizację należy zdawać sobie sprawę z faktu, iż prowadzi ona do uogólnienia poprzez utratę pewnej ilości informacji. Dlatego też należy próbować zachować istotę treści mapy, tj. zarówno dokładność geometryczną i atrybutową, jak i wartość estetyczną mapy. Ważne jest także zachowanie hierarchii wizualnej polegającej na tym, że główne cechy mapy oryginalnej nie ulegają zmianie po generalizacji. Oczywiście, w zależności od kręgu odbiorców, generalizację przeprowadza się na różnym poziomie. Tak samo zmniejszenie skali opracowania prowadzi do zdeformowania danych oryginalnych tym bardziej, im większy jest rozstęp skal. Kolejną sprawą są czynniki techniczne: w systemach komputerowych należy do nich rozdzielczość i rozmiar monitorów oraz wydruków. Ważne jest również uwzględnienie optymalizacji zastosowanych algorytmów – wybiera się taki, który przynosi maksimum efektów (redukcji) przy przy minimalnym czasie obliczeń. Biorąc pod uwagę czynnik ludzki, pamiętać należy o rozdzielczości oka ludzkiego oraz o ograniczeniach pamięci krótkotrwałej.

Na koniec generalizację podporządkować należy treści mapy. W zależności od tego, czy dotyczy ona informacji ilościowej, czy jakościowej, Kraak i Ormeling (1996) rozróżniają odpowiadające im dwa typy generalizacji: graficzną i pojęciową. Różnica między nimi polega na stosowanych metodach generalizacji.

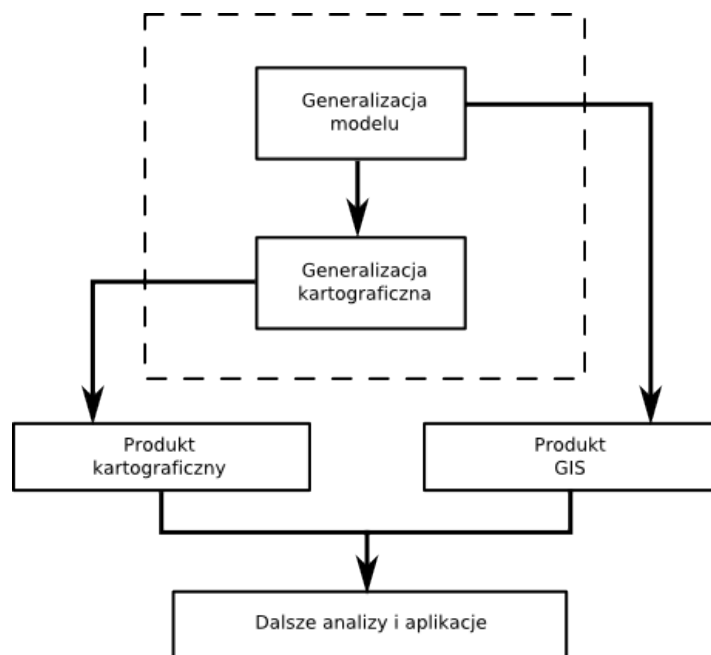
Generalizacja graficzna obejmuje uproszczenie, powiększenie, przesuwanie, łączenie i selekcję, jednakże procesy te nie obejmują w żaden sposób symboli na mapie. Dotyczy ona geometrii danych przestrzennych. Procesy generalizacji pojęciowej to również łączenie i selekcja, ale także symbolizacja i wzmacnianie, co może wpływać na zmiany symboli na mapie. Odnoszą się one do atrybutów danych przestrzennych i wymagają wiedzy z dyscypliny naukowej, której dotyczy treść mapy. W zasadzie wszystkie procesy generalizacyjne są ze sobą powiązane, zastosowanie jednego pociąga za sobą konieczność przeprowadzenia innego, np. gdy po zmniejszeniu skali dokonuje się przewiększenia drogi, aby mogła być nadal widoczna, konieczne staje się przesunięcie budynków wzdłuż niej usytuowanych. Jest to jeden z ważniejszych czynników, o których należy pamiętać myśląc o automatyzacji generalizacji.

Powszechność stosowania technologii komputerowej skłania wielu autorów do uznania, iż progi tradycyjnej, manualnej kartografii, w tym i generalizacji, zostały już pokonane. Wynika to z jednej strony z pomijania koncepcyjnego charakteru i funkcji generalizacji, z drugiej zaś z konieczności praktycznego stosowania technologii komputerowej w kartografii. Stwarza to pewien problem: czy należy uznać za generalizację wszystkie celowe, ale też często wymuszone formy przekształcania obrazu kartograficznego. Opcja ta zaczyna przeważać wśród praktyków, a dzieje się to dlatego, że dominują tutaj (dla map wielkoskalowych) selekcja, uproszczenie oraz w pewnym zakresie także uogólnienie, które często (w pewnym zakresie) można geometrycznie zdefiniować, co czyni je bardziej przewidywalnymi. Te trzy procesy cząstkowe zaczynają być określane jako kartograficzna generalizacja. Wtedy łatwo jest mówić o rozwiązaniu takiego bądź innego problemu tejże generalizacji. Następuje też oddzielenie od tego problemu komplikacji pojawiających się w czasie realizacji nie jednego, a kilku różnych operacji. Takie podejście, nadające im rangę problemów *stricto* technicznych, zubaża pojęcie kartograficznej generalizacji, traci się jej filozoficzno – poznawcze podłoże (Pawlak 2001).

Biorąc pod uwagę zarówno wspomniany złożony charakter procesu, jak również powszechną potrzebę generowania map z baz danych (co ma miejsce w technologiach GIS), określenie obiektywnych zasad przeprowadzania generalizacji należy zaliczyć do najważniejszych potrzeb współczesnej kartografii.

1.2.3. Generalizacja kartograficzna a generalizacja modelu

Weibel i Jones (1998) wydzieliли w generalizacji cyfrowej dwie odrębne gałęzie: wywiedzioną z kartografii *generalizację kartograficzną* oraz działającą na obiektach zapisanych w bazie danych tzw. *generalizację modelu* lub *bazy danych*. Obie mają podobne cele, jednak istnieją między nimi także znaczące różnice. Generalizacja kartograficzna służy utworzeniu produktu graficznego (wizualizacji) ze źródłowej bazy danych. Musi więc skupić się na problemach związanych z symbologią graficzną. Z kolei głównym celem generalizacji bazy danych jest redukcja danych bazy źródłowej. Takie dualne podejście ma silne odbicie w rzeczywistości, ponieważ często użytkownicy interesują zapytania analityczne (np. obliczanie trendów, średnich, wariancji, itp.) bez konieczności pełnej wizualizacji danych, bądź też przeciwnie – interesują ich obiekty geograficzne i ich związki, bez konieczności znajomości szczegółów struktur danych czy też sposobów ich kodowania (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Relacje między generalizacją modelu a generalizacją kartograficzną

Generalizacja bazy danych ma na celu filtrację danych z bazy źródłowej, dla różnych celów, takich jak redukcja wielkości bazy danych powodowana zwiększeniem jej efektywności i ułatwieniem przechowywania, wywiedzenie danych o zredukowanej dokładności/rozdzielczości, czy też w końcu etap wyjściowy dla generalizacji kartograficznej.

Generalizacja bazy danych nie ma na celu wizualizacji wyników, a więc jej priorytetami są dokładność przestrzenna i kompletność. Nie obejmuje przemieszczeń związanych z problemami symbolizacji. Nie obejmuje również żadnych aspektów „artystycznych”, może więc zostać w pełni sformalizowana i modelowana matematycznie.

Zazwyczaj baza danych geograficznych jest bogatsza w dane, niż wymaga tego żądany na wyjściu poziom informacji geograficznej. Jednocześnie w idealnym przypadku powinna ona umożliwiać generowanie wielu map w zadanym przedziale skal. Takie podejście znacząco ułatwia zastosowanie obiektowego modelu danych, który umożliwia definiowanie i przechowywanie rzeczywistych obiektów przestrzeni geograficznej jako obiektów bazy danych, reprezentujących naturalne zachowanie obiektów oraz ich związki przestrzenne. Taka baza danych, przy spełnieniu dodatkowych warunków, mogłaby więc być bazą „bezskałową”.

Jak podają Kazemi i in. (2004), zasadniczą zaletą generalizacji bazy danych jest redukcja kosztów i nakładów pracy względem przetwarzania manualnego, pod warunkiem, iż taka baza posiada silną strukturę oraz odpowiedni zbiór atrybutów obiektów. Proces generalizacji polega na wyborze odpowiedniego zestawu danych, a więc obiektów i ich atrybutów, określeniu żądanego poziomu generalizacji, zastosowaniu odpowiednich operatorów/algorytmów generalizacji (wspomnianych w rozdz. 1.1.2. operacji upraszczania, łączenia, wyboru, usuwania itd.) oraz ostatecznego post-processingu danych. Takie podejście w oczywisty sposób ogranicza interakcje człowieka. Jest więc podejściem obiektywnym, o ile taki też charakter cechuje wybrane algorytmy generalizacji.

Z kolei **generalizacja kartograficzna** ma na celu wywiedzenie poprawnego topologicznie zbioru rozpoznawalnych symboli reprezentujących obiekty, bez względu na sposób ich zapisu w bazie danych. W procesie generalizacji kartograficznej redaktor dokonuje wyboru obiektów z mapy o większej do mniejszej skali poprzez ich modyfikacje zmierzające do odfiltrowania zbędnej, zbyt szczegółowej informacji, przy jednoczesnym utrzymaniu stałej gęstości informacji oraz uwzględniając cel powstającej mapy. Ostatecznym zamysłem takiej generalizacji jest utworzenie poprawnego rysunku mapy, czyli również komunikacja z jej czytelnikiem. Posiada ona więc wspomniane aspekty „artystyczne”, subiektywne, powodowane koniecznością zachowania czytelności mapy oraz rozróżnialności jej poszczególnych symboli. Jasność przekazu oraz logiczna spójność informacji zawartych na

mapie posiada pierwszeństwo względem dokładności pozycyjnej (kartometrycznej) i kompletności. Tolerowane są więc np. przemieszczenia obiektów bądź ich części. Jednym z zadań kartografa jest ocena ważności obiektów geograficznych pod względem ich geometrii i semantyki. Dokonuje się to na drodze wyboru odpowiednich operatorów generalizacji. Wadą tak rozumianego procesu generalizacji jest fakt, iż silnie zależy on od doświadczenia i umiejętności kartografa.

1.2.4. Automatyzacja procesu generalizacji*

Początek komputerowej automatyzacji procesu generalizacji kartograficznej sięga połowy XX wieku. Pojawiły się wtedy próby określenia ogólnych zasad generalizacji, mających na celu ujednoczenie sposobów jej przeprowadzania oraz oceniania rezultatów. Skupiały się one na rozwijaniu dostępnych miar geometrycznych i rozwiązań algorytmicznych, takich, jak wymiar fraktalny elementów mapy, numeryczne ograniczenia symboli (minimalne, zależne od zmniejszającej się skali wielkości: kąta, długości czy powierzchni), związki między symbolami (np. minimalne odległości), filtrowanie danych przy pomocy algorytmów zmniejszających liczbę punktów tworzących wektorowe granice obiektów, filtrowanie danych rastrowych przy pomocy filtrów górno- lub dolnoprzepustowych, budowanie funkcji typu spline do wygładzania linii, przewiększanie granic obszarów na danych rastrowych, czy też wreszcie algorytmy przesuwania obiektów. Zasadniczy nacisk kładziony był na tworzenie algorytmów rozwiązujących pojedynczy problem czy też zadanie (zwłaszcza upraszczanie kształtu). Znacznie mniejszy wysiłek poświęcano rozwiązaniom holistycznym, biorącym pod uwagę związki między wieloma obiektami mapy oraz interakcji powstałych w wyniku działania operatorów generalizacji na pojedynczych obiektach (Jones i in. 1995).

W latach 80-tych nastąpił zwrot w kierunku procedur wyższego poziomu. Chodziło o przekształcenie zupełnie mechanicznego podejścia w bardziej imitujące sposób działania kartografa. W tym samym czasie coraz powszechniej zaczęto implementować konkretne algorytmy i rozwiązania w środowiskach GIS. Zwiększyła się też świadomość konieczności poszukiwania meta-wiedzy. Przykładowo, co kryje pod sobą termin „upraszczanie

* Rozdział 1.2.4 opracowano na podstawie autorskiego tłumaczenia fragmentu publikacji:

Meng L., 1997. *Automatic generalization of geographic data*. Technical Report, VBB Viak, Stockholm, Sweden.

kształtu” (jedynie redukcję danych, czy też dodatkowo np. ich wygładzenie), jakich technik wymaga dany kontekst, w jakiej kolejności oraz z jakimi wartościami parametrów należy wywołać odpowiednie procedury. Zaczęto tworzyć systemy eksperckie (jedna z rozwijanych metod sztucznej inteligencji) oparte na zasadach (ang. *rule-based*) znanych z podręczników lub powszechnie stosowanych konwencji. Śledzono wyniki zachowania się procedur w dobrze poznanych przypadkach. Wiedza ekspertów, określona jako względnie stała, była implementowana w postaci warunków JEŚLI – TO w językach proceduralnych (FORTRAN, C). Z czasem entuzjazm, z jakim poświęcono się rozwojowi systemów opartych o sztuczną inteligencję, ostygł. Spowodowały to podejrzenia, iż rozwiązania stuprocentowo wsadowe nie mogą powstać, a co więcej, wielozadaniowe systemy eksperckie tworzone w oparciu o wyodrębnione reguły, w zasadzie nie polepszają rezultatów tak przeprowadzanych generalizacji. Okazało się, iż powszechna wiedza i umiejętności, które posiadają kartografowie, dotyczące grafiki oraz równoległego przetwarzania elementów mapy, są w zasadzie niemożliwe do jawnego sformułowania w językach programowania. Zwrócono się więc w stronę systemów interaktywnych, a więc jedynie wspomagających pracę kartografa, a nie całkowicie ją zastępujących.

Pierwsza połowa lat 90-tych upłynęła na próbach oceny dotychczasowych rezultatów. Zauważono konieczność stworzenia narzędzi umożliwiających dokonanie obiektywnej oceny jakości pracy algorytmów czy też całych systemów, pod względem metrycznej, topologicznej i semantycznej dokładności, poprawności modeli oraz wyników ich pracy. Przykładowo zaczęto stosować diagramy Voronoi, tudzież ich grafy dualne, a więc triangulacje Delaunaya, jako narzędzi do wykrywania zmian w topologii obiektów na mapie powstałych w wyniku przemieszczeń obiektów, oraz do wykrywania związków między obiektami znajdującymi się na różnych warstwach tematycznych, a znajdujących się w swoim sąsiedztwie.

Nawiązując do dalszego rozwoju metod sztucznej inteligencji zaczęto badać zastosowanie sieci neuronowych jako symulatorów kognitywnych aspektów procesu generalizacji.

Druga połowa lat 90-tych przyniosła popularyzację komunikacji poprzez Internet (zwłaszcza World Wide Web), a co za tym idzie nowe wyzwania. Prędkość procesu generalizacji stała się jednym ze znaczących cech charakteryzujących pracę poszczególnych programów czy też systemów. Zaczęto zauważać silny wpływ, jaki na efektywność procesu

mają zastosowane struktury danych. Projekt odpowiednich struktur danych stał się więc częścią zadania generalizacji. Zwrócono się w stronę środowisk programistycznych i bazodanowych zorientowanych obiektowo jako bardzo elastycznych dla implementacji procedur generalizacji. Ciągłe postępowała akwizycja meta-wiedzy, która w rezultacie zwróciła uwagę na ważność „informacji chwilowej”, związanej z danym przebiegiem procesu, ponieważ może ona umożliwić poprawniejszą interpretację obrazu lub detekcję semantyki czy też np. pojawiających się konfliktów graficznych. W dodatku zaczęto zdawać sobie sprawę z wagi rozwoju rozwiązań bardziej lokalnych, jako że w zupełności globalne metody generalizacji okazały się niewystarczające dla reprodukcji subtelności map, ewidentnych nawet dla najmniej wykształconego ich czytelnika.

Podsumowując, można powiedzieć, że prace związane z generalizacją (za McMaster, Comenetz 1996) skupiają się obecnie na wielu zagadnieniach, zwłaszcza zaś: rozwoju bardziej wydajnych struktur danych, dalszym rozwoju algorytmów, semantycznym wsparciu procesu generalizacji, oraz modelowaniu geometrii obiektów.

1.2.4.1. Globalne algorytmy upraszczania kształtu łamanych jako przykład automatyzacji procesu generalizacji

Od początku automatyzacji procesu generalizacji powstawały algorytmy mające na celu uproszczenie kształtów elementów przestrzeni geograficznej, zapisanych w formie danych wektorowych. Pierwsze z nich były niezwykle proste obliczeniowo. Nie uwzględniając żadnych stosunków matematycznych zachodzących między punktami, polegały na usunięciu określonej liczby punktów. Na przykład n -ta procedura punktowa Toblera, która została opracowana w latach 60-tych ubiegłego wieku, polegała na pozostawieniu co n -tego punktu. Inne polegały np. na przypadkowym (randomizowanym) wyborze punktów.

Szybko okazało się, iż algorytmy tego typu są nie wystarczające, ponieważ generowane przez nie wyniki nie były związane z faktycznym przebiegiem czy też kształtem upraszczanych linii, ani związkami (np. topologicznymi) zachodzącymi między punktami linii. Powstały więc bardziej skomplikowane procedury korzystające z właściwości punktów sąsiadujących bezpośrednio (lokalne procedury przetwarzania), bądź też oceniające również

całe grupy punktów (procedury warunkowego lub bezwarunkowego przetwarzania lokalnego).

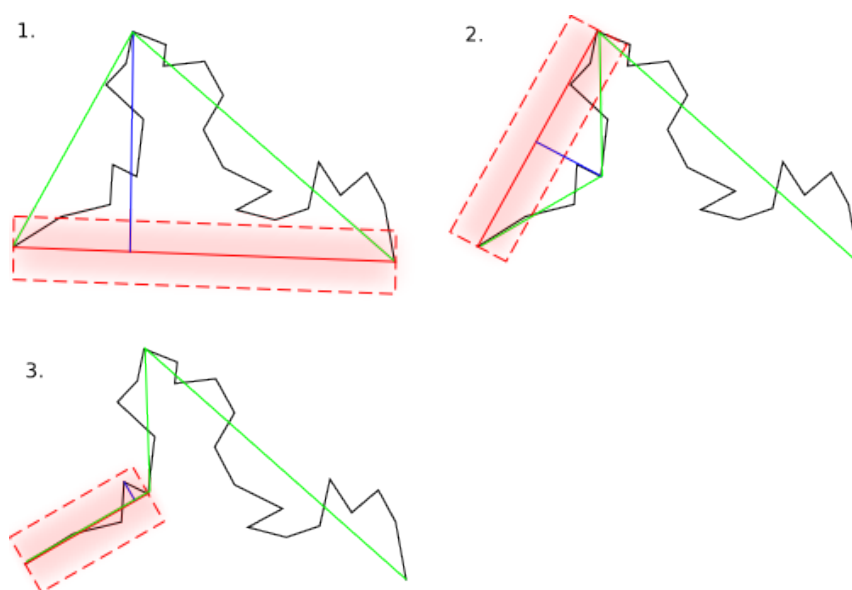
Ostatnią kategorię procedur upraszczania linii łamanych stanowią procedury globalne. W założeniu umożliwiają one badanie całej przetwarzanej łamanej (bądź też wyszczególnionego jej fragmentu). Podstawową cechą warunkującą działanie takich algorytmów jest wskazanie tak zwanych punktów krytycznych. Punkty te są niewralgiczne dla poprawnego oddania przebiegu łamanej, a więc stanowić powinny niezmienniki procesu upraszczania. Oczywiście wybór punktów krytycznych, a więc również ich liczba, powinna zależeć od skali docelowej, dla której przeprowadza się dany proces upraszczania. Typowym sposobem wybierania punktów krytycznych jest identyfikacja ekstremów lokalnych, czyli punktów danego fragmentu łamanej najbardziej oddalonych od punktów początkowego i końcowego przetwarzanego fragmentu. Przy czym różnice w pracy tak tworzonych algorytmów globalnych polegają na warunkach akceptacji danego ekstremum lokalnego.

Pierwszym przykładem może być najczęściej w praktyce stosowana procedura globalna, jaką jest **algorytm Douglasa–Peuckera** (1973). W każdej iteracji należy wpieryw zidentyfikować punkty początkowy i końcowy przetwarzanego aktualnie fragmentu łamanej: punkty te nazywane są odpowiednio „kotwicą” i „pływakiem”. Podstawą algorytmu jest zdefiniowanie tak zwanego *korytarza (przedziału) tolerancji* pomiędzy kotwicą a pływakiem. Szerokość tego korytarza obliczana jest jako podwójna wartość długości t_l , czyli określonej przez użytkownika wartości tolerancji. Geometrycznym obrazem tego korytarza są dwa równoległe pasy o szerokości t_l znajdujące się po obu stronach odcinka łączącego kotwicę i pływak.

Algorytm postępowania ma charakter rekurencyjny: na każdym etapie następuje testowanie punktu, stanowiącego ekstremum lokalne (o ile istnieje) aktualnie przetwarzanego fragmentu łamanej oraz ewentualne wywołanie procedury dla dwóch nowych fragmentów, powstałych przez podział aktualnego fragmentu w testowanym punkcie ekstremalnym.

Jak już wspomniano, przez ekstremum lokalne rozumie się punkt najbardziej oddalony od odcinka łączącego aktualną kotwicę i pływak. Testowanie ekstremum lokalnego polega na sprawdzeniu, czy znajduje się on wewnątrz korytarza tolerancji. Jeśli tak, oznacza to, iż cały aktualnie przetwarzany fragment jest wystarczająco dobrze przybliżony przez odcinek łączący

kotwicę i pływak. W tym wypadku procedura kończy swoje działanie. W przeciwnym przypadku ekstremum lokalne zostaje dodane do punktów stanowiących łamaną wyjściową. Następuje również rekurencyjne wywołanie procedury dla dwóch nowych fragmentów: pierwszego, przebiegającego od kotwicy do ekstremum lokalnego (które staje się nowym pływakiem), oraz drugiego, przebiegającego od ekstremum lokalnego (które staje się nową kotwicą) do pływaka (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Algorytm Douglasa–Peuckera

W każdym przebiegu algorytmu następuje eliminacja wszystkich punktów, które znajdują się wewnątrz korytarza tolerancji. W efekcie powstaje więc nowa łamana o zredukowanej (odfiltrowanej) liczbie wierzchołków.

Nieco inny przebieg ma **obiektywna metoda Chrobaka** (1999). W założeniach tej procedury leży zapewnienie rozpoznawalności (w skali docelowej) wszystkich punktów przetworzonej linii. Zastosowanym wzorcem rozpoznawalności jest tak zwany *trójkąt elementarny*, którego długości boków mają minimalną, rozpoznawalną w danej skali docelowej wielkość (związaną z rozdzielczością ludzkiego oka).

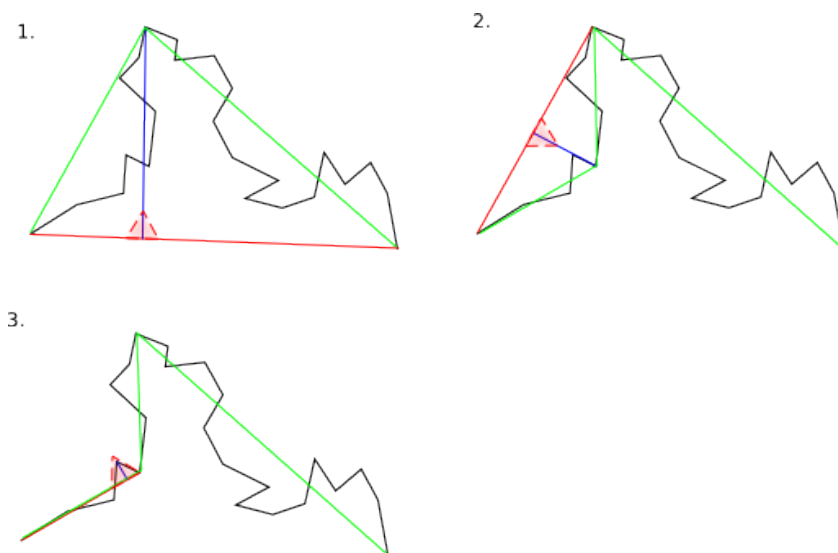
Wybór trójkąta jako figury wzorcowej podyktowany jest faktem, iż jest to figura jednoznacznie odnosząca się do linii zapisanej jako łamana: dwa boki (ramiona) trójkąta tworzą sąsiadujące odcinki łamanej, trzeci (podstawa trójkąta) stanowi cięciwa łącząca początek pierwszego z końcem drugiego odcinka. Stwierdzono równocześnie, że do zbadania

rozpoznawalności rysunku nie wystarczy pojedynczy odcinek, ale właśnie dwa sąsiadujące, na których budowany jest trójkąt. Ustalając minimalną długość boków takiego trójkąta można badać rozpoznawalność sąsiadujących boków, a co za tym idzie również całej łamanej. Długość boku takiego trójkąta elementarnego (e_f) dla danej skali docelowej można wyliczyć z zależności:

$$e_f = s \cdot M_i \quad (1.1)$$

gdzie: s – miara progowa rozpoznawalności rysunku mapy (niezależna od jej skali)

M_i – mianownik skali mapy opracowywanej.



Rys. 1.3. Metoda Chrobaka

Powyższe obiektywne (wyznaczone z jednoznacznej matematycznej zależności) kryterium rozpoznawalności rysunku posłużyło do ustalenia algorytmu postępowania podczas upraszczania kształtu łamanej. Jest on analogiczny jak w przypadku algorytmu Douglasa–Peuckera, z tym, że inny jest sposób testowania ekstremum lokalnego: zamiast oceny odległości od cięciwy łączącej kotwicę i pływak stosuje się kryterium oparte na ocenie rozpoznawalności trójkąta. Tak więc do wyjściowej łamanej dodawany jest ten punkt, dla którego trójkąt zbudowany na sąsiadujących z nim odcinkach łamanej spełnia jednoznacznie dla każdej skali wyznaczony warunek trójkąta elementarnego (rys. 1.3).

1.3. Konflikty graficzne*

Proces upraszczania łamanej, bez względu na algorytm, za pomocą którego zostanie przeprowadzony, skutkuje otrzymaniem pewnej „karykatury” łamanej wejściowej. Ten nowy kształt linii może w najprostszym wypadku składać się z podzbioru punktów łamanej wejściowej, jak na przykład w algorytmie Douglasa–Peuckera (1973), czy też n -tej procedurze punktowej (Tobler 1966). Możliwe są jednak również inne rozwiązania. Niektóre procedury upraszczania, jak np. globalny algorytm Chrobaka (1999), mogą, w zależności od pewnych warunków, dodawać nowe, nie istniejące w łamanej wejściowej punkty. Inne, jak np. algorytm zaprezentowany przez Christensena (1999), skutkują powstaniem nowej łamanej, to znaczy składającej się z całkiem nowego zbioru punktów pośrednich.

1.3.1. Definicja konfliktów

Pomimo różnej złożoności algorytmów upraszczania, większość z nich charakteryzuje się pewną niepożądaną cechą. W miarę upraszczania kształtów kolejnych elementów (obiektów) oraz zmieniania ich szerokości, a także odległości między nimi, pojawiać się mogą nowe, nieistniejące wcześniej punkty czy też obszary ich interakcji, które mogą powodować powstanie **konfliktów**. W kartografii i GIS przez konflikt należy rozumieć *niewłaściwie dobrane zbiory, lokalizacje lub kształty symboli kartograficznych (obiektów), dające użytkownikowi błędną informację o relacjach przestrzennych między obiektami lub różnymi częściami jednego obiektu lub też które są niekorzystne dla ludzkiej percepcji grafiki* (Fei 2002). Brak sposobów lokalizowania i rozwiązywania konfliktów, a także identyfikowania relacji przestrzennych między obiektami i właściwościami geometrycznymi obiektów, jest jednym z głównych problemów pojawiających się podczas opracowywania algorytmów generalizacji automatycznej (Ruas, Lagrange 1995).

W zależności od stopnia złożoności oryginalnych linii (kształtów obiektów) mogą zachodzić sytuacje, w których część elementów nowych segmentów (powstałych w procesie upraszczania) może ze sobą kolidować lub prawie kolidować (Müller 1990). Ogólnie można do nich zaliczyć kolizje: *punkt – punkt* (gdzie najbliższym elementem graficznym danego punktu jest inny punkt), *punkt – linia* (najbliższym elementem względem danego punktu jest

* Rozdział 1.3 oparty jest na fragmentach publikacji: Żukowska M., 2007. *Konflikty*. w: (Chrobak i in., 2007).

linia lub odcinek łamanej) oraz *linia – linia* (przecięcia linii), przy czym w zależności od tego, czy dotyczą tylko łamanej aktualnie upraszczanej, czy też większego zbioru łamanych, można je podzielić na konflikty wewnętrzne i zewnętrzne.

Biorąc pod uwagę nie tyle sam rysunek łamanej, ale obiekty, które on reprezentuje, wyróżnić można cztery rodzaje konfliktów powstałych na skutek generalizacji geometrii obiektów. Konflikty te zdefiniowano w następujący sposób (Shea, McMaster 1989):

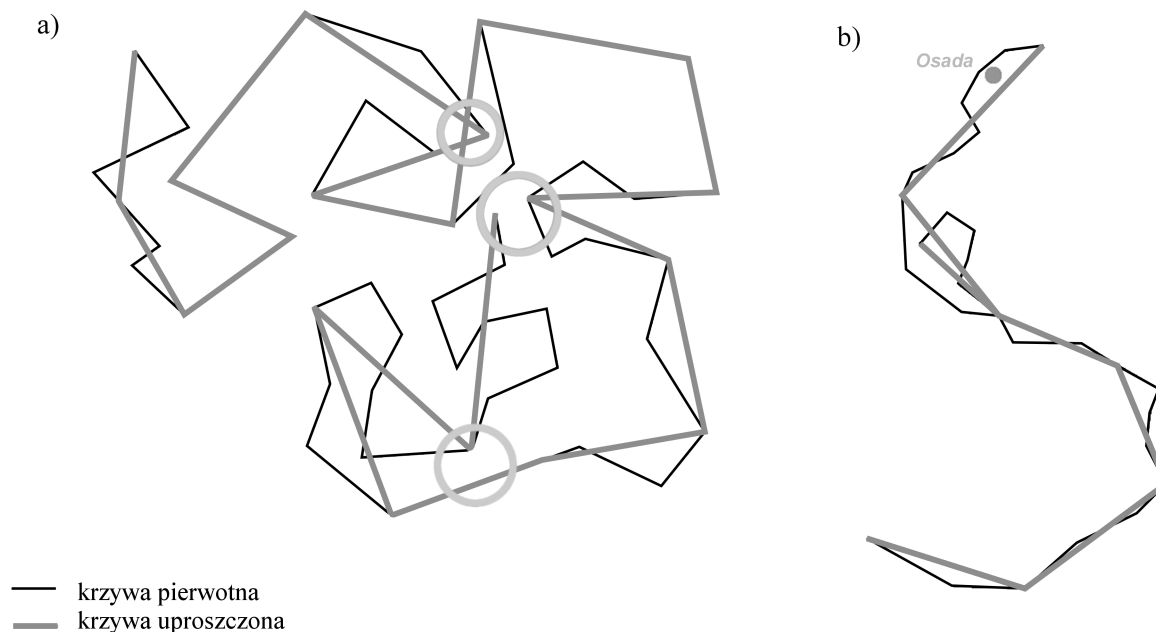
- 1) powierzchnie są zbyt małe,
- 2) odcinki są zbyt małe,
- 3) obiekty są zbyt wąskie,
- 4) obiekty są usytuowane zbyt blisko siebie.

Ważnym obszarem interakcji niezależnych łamanych, a więc również potencjalnym źródłem konfliktów, jest rozwarstwienie danych w systemie bazy danych. Ponieważ poszczególne warstwy tematyczne upraszczane są wzajemnie niezależnie, to ich nałożenie na siebie może powodować powstanie wielu konfliktów zewnętrznych między łamanymi należącymi do różnych warstw.

1.3.2. Podział konfliktów

Konflikty wewnętrzne dotyczą wyłącznie łamanej (otwartej bądź zamkniętej – konturu obiektu powierzchniowego) aktualnie przetwarzanej. Zaliczyć do nich można kolizje jednego wierzchołka z innym (punkt – punkt), jak również z jednym z segmentów łamanej (punkt – linia). Kolizje linia – linia polegające na przecięciu się dwóch odcinków określa się jako samoprzecięcia (ang. *selfintersections*) (rys. 1.4a).

Konflikty zewnętrzne dotyczą większego zbioru łamanych, wśród których znajduje się linia łamana aktualnie upraszczana. Podobnie jak w konfliktach wewnętrznych wyróżnić tu można kolizje dwóch punktów oraz punktu i odcinka, jak również przecięcia niezależnych linii łamanych. Oprócz tego może zaistnieć problem błędnej relacji topologicznej między obiektami (wśród nich badanymi obiektami liniowymi oraz obiektami punktowymi). Chodzi tu o błędną wzajemną lokalizację takich elementów, na przykład przejście jednego obiektu z lewej na prawą stronę drugiego obiektu (zmiana położenia symbolu miasta z lewo – na prawobrzeżne bądź zmiana dopływu z lewego na prawy) (rys. 1.4b).



Rys. 1.4. Przykłady konfliktów graficznych

Powyższe niespójności topologiczne (konflikty) zarówno wewnętrzne, jak i zewnętrzne, podzielić można na dwie grupy:

- *bezpośrednie kolizje* elementów linii łamanej (przykładowo przecięcie dwóch niezależnych linii),
- *konflikty względne*, to znaczy uwzględniające pewne zewnętrzne kryteria.

Do konfliktów względnych zalicza się sytuacje, w których elementy czy też odcinki linii wprawdzie nie kolidują bezpośrednio (to znaczy nie dochodzi na przykład do przecięcia), jednak ze względów na zachowanie rozpoznawalności rysunku uznaje się je za położone zbyt blisko siebie. W efekcie w skali docelowej elementy te nie będą rozróżnialne bądź też będą zaciemniać rysunek mapy.

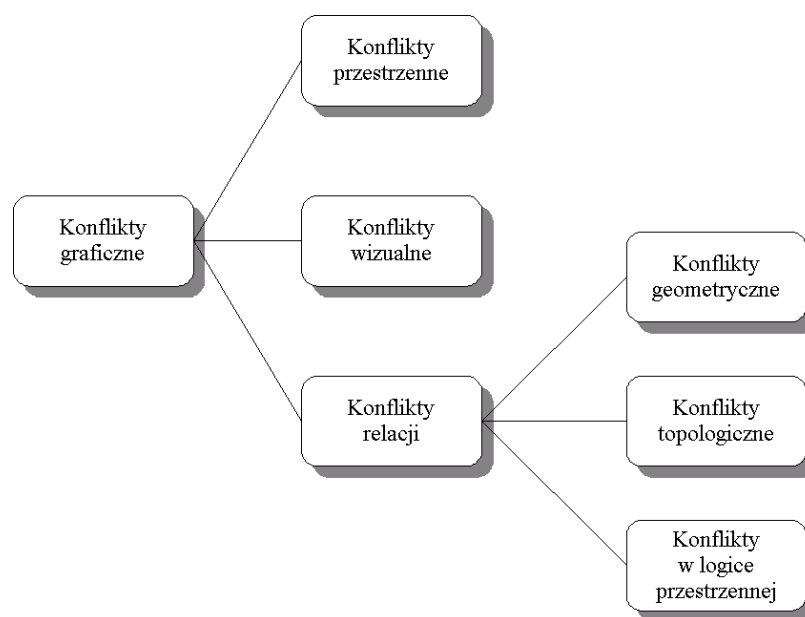
1.3.2.1. Typy konfliktów graficznych

Rozszerzoną systematykę konfliktów graficznych zaproponował Fei (2002). Podzielił on konflikty na trzy główne typy:

1. *przestrzenne* (nakładanie, przecinanie się obiektów),
2. *wizualne* (zbyt małe odległości między obiektami – wspomniane konflikty względne),

3. *konflikty relacji* (zniekształcone relacje między obiektami, związane z ich kształtem bądź położeniem).

Te ostatnie można podzielić na konflikty *geometryczne* (niezgodność elementów geometrii przed i po generalizacji, takich jak odległość, kąt czy równoległość), *topologiczne* (niezgodność w topologii obiektów przed i po generalizacji) oraz *konflikty w logice przestrzennej* (np. niespójność sieci drogowej) (rys. 1.5).



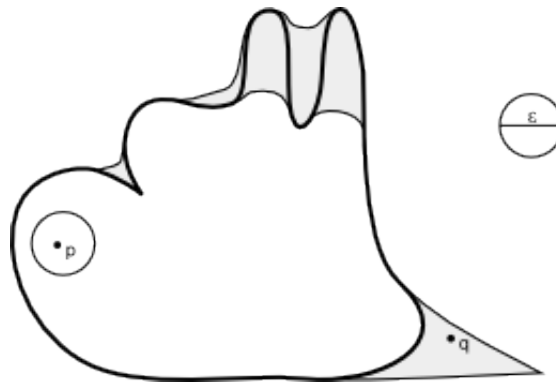
Rys. 1.5. Systematyka konfliktów graficznych

1.4. Teoria Perkala

W roku 1958 J. Perkal dokonał próby zdefiniowania obiektywnej metody generalizacji. Miała ona przebiegać na drodze jednoznacznego przekształcenia geometrycznego każdego obszaru w obszar zgeneralizowany. Generalizacja wykonana z pomocą tego przekształcenia byłaby więc generalizacją obiektywną. Zasadniczą trudnością, jaką wskazał autor, był fakt, że przekształcenie to z konieczności może opierać się jedynie na kształcie generalizowanego obszaru, z pominięciem innych czynników geomorfologicznych.

Długość odcinka (liczba rzeczywista ε) została użyta do określenia stopnia generalizacji. Dla obszaru zamkniętego D można wyróżnić punkty tego obszaru, które mają tę własność, że istnieje koło o średnicy ε zawierające się całkowicie w obszarze D i zawierające owe punkty (np. punkt p na rys. 1.6). W obszarze D istnieją również punkty (np. punkt q) takie, że żadne

koło o średnicy ε mieszczące się w obszarze D nie może zawierać owych punktów. Obszar złożony z punktów p obszaru D takich, że zawierają się one w kołach o średnicy ε mieszczących się całkowicie w obszarze D nazwał Perkal ε -generalizacją obszaru D i oznaczył jako $G_\varepsilon(D)$. Brzeg tego obszaru miejscami pokrywa się z brzegiem obszaru D .



Rys. 1.6. ε -generalizacja obszaru

Eksperyment myślowy ułatwiający wyobrażenie sobie ε -generalizacji obszaru D przebiega w następujący sposób: w obszarze D przesuwane jest koło o średnicy ε tak, aby leżało ono całkowicie wewnątrz obszaru D , czyli aby nie zachodziło na części rysunku nie należące do D . Miejsca pokryte przez przesuwane koło tworzą właśnie ε -generalizację obszaru D . W swojej pracy Perkal przedstawił także manualną technikę uzyskiwania takiej generalizacji dla dowolnego wyrysowanego obszaru.

Dopełnienie D' obszaru D do płaszczyzny jest również obszarem, a więc możliwe jest również dokonanie ε -generalizacji obszaru D' . Pomiedzy ε -generalizacją obszarów D i D' zawiera się pewien zbiór punktów, złożony z linii ciągłej w tych miejscach, gdzie pokrywa się ona z brzegami ε -generalizowanych obszarów D i D' , oraz z obszarów dwuwymiarowych zawartych między brzegami ε -generalizacji $G_\varepsilon(D)$ i $G_\varepsilon(D')$ tam, gdzie nie pokrywają się one z brzegami D i D' . Ten zbiór Perkal określił jako ε -zgeneralizowany brzeg obszaru D i jego dopełnienia D' . Jak wskazywał autor ten obszar ma swój realny sens, związany jest bowiem z trudnościami w idealnym zdefiniowaniu rozgraniczenia między dwoma obszarami, np. morzem i lądem. Jest on „czymś trzecim”, nierozróżnialną mieszaniną lądu i morza, którą stanowić będą np. zatoczki zbyt małe dla przedstawienia w danej skali mapy. Obszar ten na

mapie, jak stwierdza Perkal, powinien być pokryty barwą oznaczającą na mapie brzeg rozdzielający dwa obszary (np. wspomniane morze i ląd).

Dla coraz większych wartości ε , a więc dla generalizacji do coraz mniejszych skal, ε -generalizowany brzeg będzie coraz szerszy. Co więcej, zniknięcie wewnętrznego obszaru przy zadanej generalizacji można uznać za powód do eliminacji danego obszaru z mapy lub też do zastąpienia go przez symbol. Za przykład mogą posłużyć kolejne ε -generalizacje granic administracyjnych miasta, aż do zastąpienia go przez odpowiedni symbol.

Dobór odpowiedniej wartości ε określił Perkal jako konwencjonalny, ale uzasadniony różnymi względami, w tym technicznymi (np. może być związana z założoną gęstością linii na mapie).

Teoria obiektywnej generalizacji Perkala stwarza szereg problemów w przypadku prób jej implementacji dla potrzeb generalizacji cyfrowej. Za przykład (Christensen 1999) może posłużyć stwierdzenie Perkala, że lokalizacja zgeneralizowanych obiektów powinna być wskazana poprzez narysowanie linii odpowiednio grubym pisakiem tak, aby pokrywał on cały ε -generalizowany brzeg. Kształt czy też liczba linii niezbędna do wykonania tego zadania została pozostawiona woli kartografa. Jednak w dobie automatyzacji generalizacji takie rozwiązanie, jako niejednoznaczne, jest niewystarczające. Przebieg takiej ścieżki powinien być zdefiniowany zarówno logicznie jak i semantycznie. Co więcej, powinien istnieć logiczny związek pomiędzy ε -generalizacją obszaru oraz obszarem źródłowym. Christensen, ten oraz inne powiązane problemy, starał się rozwiązać przy zastosowaniu metody transformacji osi środkowych (Christensen 1999).

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Rozwój kartografii, w szczególności kartografii cyfrowej, związany jest nieodłącznie ze zmianami w generalizacji kartograficznej. Zmiany te dotyczą zarówno sposobu jej pojmowania i rozumienia, jak też konkretnych metod jej przeprowadzania. Komputeryzacja generalizacji spowodowała potrzebę opracowania algorytmów, które mają na celu automatyzację procesu kartograficznej generalizacji treści mapy cyfrowej. Jeden z elementów tej automatyzacji stanowią algorytmy upraszczania krzywych, wśród nich również tzw. globalne algorytmy upraszczania, do których zaliczyć można m. in. procedurę Douglasa–Peuckera czy metodę Chrobaka. Jednak istniejące globalne algorytmy upraszczania krzywych nie są wolne od generowania błędów w treści mapy, określanych ogólnie jako konflikty graficzne.

W odpowiedzi na ten problem powstał szereg metod, które mają na celu rozwiązanie konfliktów co najmniej jednego typu. Cechą charakterystyczną tych metod, co zostanie pokazane w dalszej części pracy, jest ich przeznaczenie tylko dla jednego, konkretnego algorytmu upraszczania krzywych. Zauważyć można również brak obiektywnego kryterium identyfikacji, a następnie eliminacji takich konfliktów, które dodatkowo można by zastosować dla różnych algorytmów upraszczania.

Powyższe przesłanki skłoniły Autorkę do znalezienia bardziej ogólnej i obiektywnej metody wyszukiwania i usuwania konfliktów graficznych. Przeprowadzone badania umożliwiły postawienie następującej tezy:

Zastosowanie zmodyfikowanego kryterium rozpoznawalności rysunku mapy do buforowania obiektów umożliwia jednoznaczną identyfikację oraz eliminację konfliktów graficznych powstałych w procesie cyfrowej generalizacji kartograficznej.

2.1. Cele pracy

Przygotowując dysertację postawiono sobie trzy zasadnicze cele: naukowy, praktyczny oraz ekonomiczny.

Celem naukowym pracy jest zbadanie możliwości zastosowania obiektywnego kryterium rozpoznawalności rysunku i jego ewentualna modyfikacja dla potrzeb identyfikacji oraz usuwania konfliktów graficznych.

Celem praktycznym jest opracowanie i implementacja algorytmów umożliwiających identyfikację i usunięcie konfliktów graficznych dla potrzeb weryfikacji metody oraz porównania uzyskanych wyników z rezultatami upraszczania metodą Chrobaka, dla kilku wybranych przykładów.

Cel ekonomiczny związany jest z automatyzacją procesu generalizacji kartograficznej. Mówiąc ściślej, praca ta stanowi kolejny krok zmierzający do zwiększenia stopnia automatyzacji tego procesu, co przybliży generowanie map w dowolnym przedziale skalowym z jednej bazy danych referencyjnych. Jest to wymierna korzyść polegająca na niższych kosztach przechowywania danych w jednej bazie, w stosunku do przechowywania ich w wielu bazach referencyjnych: zmniejszenie redundancji danych, a co z tym związane niższych kosztach choćby samej tylko aktualizacji tych danych oraz ich przechowywania.

3. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH ALGORYTMÓW IDENTYFIKOWANIA I USUWANIA KONFLIKTÓW GRAFICZNYCH POD WZGLĘDEM ICH OBIEKTYWNOŚCI ORAZ EFEKTYWNOŚCI*

System generalizacji komputerowej powinien umożliwiać usuwanie powstających konfliktów. Po zidentyfikowaniu powinny być one odpowiednio traktowane, w zależności od natury, geometrii i otoczenia ujętych obiektów. Wśród dotychczas opracowanych metod rozwiązywania konfliktów można wyróżnić:

- eliminację, powiększenie, scalenie bądź zmianę wymiarów (w odniesieniu do obiektów zbyt małych);
- scalenie, przesunięcie bądź usunięcie fragmentów obiektów położonych zbyt blisko siebie;
- przesunięcie, wygładzenie, usunięcie lub uwypuklenie przez powiększenie (w odniesieniu do szczegółów obiektów).

Ponadto można stwierdzić, że konflikty występują najczęściej na obszarach o dużym zagęszczeniu danych. Za optymalną metodę rozwiązywania konfliktów uznać można taką, która umożliwia jednoczesne rozwiązanie kolizji różnego typu. Musi ona zawierać także elementy kontrolne, ponieważ gdy ich nie ma, może się zdarzyć, że rozwiązanie jednego konfliktu stwarza inne.

Elementem, na który należy zwrócić szczególną uwagę, jest ścisła i jednoznacznie określona miara definiująca wielkości obiektów tworzących sytuacje konfliktowe. Inaczej mówiąc: elementarnym działaniem zmierzającym do rozpoznania, a następnie usunięcia konfliktów, będzie jednoznaczne zdefiniowanie wielkości odpowiadającej wyżej wspomnianym stwierdzeniom (zbyt małe, położone zbyt blisko siebie). Niemożność zdefiniowania tych wielkości stanowić będzie o niemożliwości określenia obiektywnych (niezależnych od operatora) mechanizmów określania i rozwiązywania konfliktów.

* Rozdział 3 oparty jest na fragmentach publikacji: Żukowska M., 2007. *Konflikty*. [w:] (Chrobak i in. 2007).

3.1. Kolizje typu: punkt – punkt oraz punkt – linia (algorytm Müllera)

Propozycją zmierzającą do usunięcia kolizji *punkt – punkt* oraz *punkt – linia*, które mogą powstać w wyniku upraszczania łamanej algorytmem Douglasa–Peuckera, jest praca (Müller 1990). Pokazano w niej metodę opartą na przemieszczeniu elementów linii łamanej tak, aby żaden punkt ani linia nie były bliżej siebie niż pewna wartość tolerancji odległości (T), którą określa sam użytkownik, a więc redaktor dokonujący generalizacji mapy. Odległość ta powinna być związana z rozdzielczością wizualną elementów graficznych. Np. wobec czarnych (lub bardzo ciemnych) elementów, Swiss Society of Cartography w 1987 r. określiła tę wartość jako 0,25 mm. Należy zaznaczyć, iż opisaną poniżej metodą można badać i usuwać zarówno konflikty bezpośrednie, jak i pośrednie.

3.1.1. Kolizje typu punkt – punkt

Kolizje *punkt – punkt* powstają wtedy, gdy najbliższym elementem badanego punktu o współrzędnych (x_i, y_i) jest punkt (x_j, y_j) , inny niż punkty bezpośrednio sąsiadujące z punktem (x_i, y_i) w uporządkowanym zbiorze punktów opisujących badaną linię. Dwa punkty kolidują, gdy:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 < T^2 \quad (3.1)$$

gdzie:

T – wartość tolerancji zadana przez użytkownika.

Kolizje mogą być rozwiązane za pomocą przesunięcia obu punktów w przeciwnych kierunkach o wektor v , którego wielkość określić można za pomocą równania:

$$2 \cdot v^2 = T^2 - [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2] \quad (3.2)$$

Kierunek przesunięcia określa odcinek, którego końce stanowią kolidujące punkty.

3.1.2. Kolizje typu punkt – linia

Kolizja *punkt – linia* powstaje między punktem (x_i, y_i) oraz odcinkiem linii, którego końce (x_j, y_j) i (x_k, y_k) są różne od punktów bezpośrednio sąsiadujących z punktem (x_i, y_i) w uporządkowanym zbiorze punktów opisujących badaną linię. Punkt i odcinek kolidują, gdy:

$$|\lambda x_i + \mu y_i - p| < T, \quad (3.3)$$

gdzie:

T – wartość tolerancji (jak opisano wyżej),

$\lambda x_i + \mu y_i - p$ – równanie normalnej do odcinka linii (z cosinusami kierunkowymi λ i μ) zawierającej punkt (x_i, y_i) .

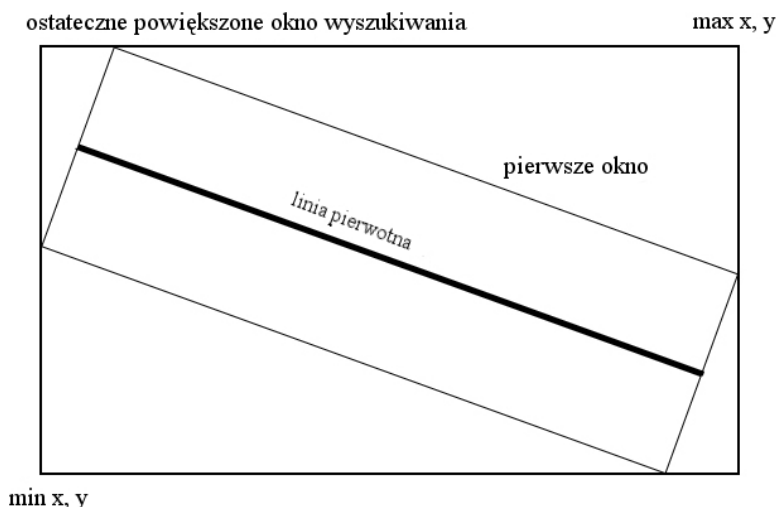
Kolizję tę można usunąć, przesuając punkt (x_i, y_i) o wektor \mathbf{v} taki, że:

$$\mathbf{v} = T - |\lambda x_i + \mu y_i - p|. \quad (3.4)$$

Kierunek przesunięcia zdefiniowany jest przez prostą prostopadłą do danego odcinka linii, przechodzącą przez punkt (x_i, y_i) .

3.1.3. Metoda wykrywania kolizji

Zaproponowana metoda wykrywania wyżej wspomnianych kolizji opiera się na spostrzeżeniu, że kolidujący punkt musi znaleźć się wewnątrz pewnego okna określonego wokół innego punktu (lub odcinka). Należy również pamiętać, że nie rozpatruje się tu punktów bezpośrednio sąsiadujących z badanym (w uporządkowanym zbiorze punktów opisujących badaną linię). Wielkość opisanego okna będzie się różnić w zależności od rodzaju kolizji. Dla kolizji *punkt – punkt* jego wielkość ograniczona będzie przez wartość tolerancji T (a więc będzie to kwadrat). Z kolei dla kolizji *punkt – linia* jego wielkość zależeć będzie od długości i położenia badanego odcinka.



Rys. 3.1. Konstrukcja okna poszukiwań

Należy najpierw skonstruować pierwsze okno, które składać się będzie z odcinków równoległych do badanego, odsuniętych od niego (w kierunku do niego prostopadłym) o wartość $T/2$ w obie strony (rys. 3.1). Okno użyte do wykrywania kolizji oparte jest na współrzędnych minimalnych i maksymalnych pierwotnie zdefiniowanego okna (rys. 3.1).

Znając współrzędne okna, badane są punkty, których współrzędne znajdują się w przedziale przez nie zdefiniowanym.

3.2. Samoprzecięcia oraz przecięcia linii – metoda Saalfelda

Saalfeld (1999) przedstawił metodę zmierzającą do usunięcia samoprzecięć łamanej, jak również jej przecięć z innymi łamanymi, które mają miejsce w procesie upraszczania przy pomocy algorytmu Douglasa–Peuckera. Opiera się ona na dwóch założeniach:

- 1) Obszar poszukiwań potencjalnych konfliktów zamyka się w ε -sąsiedztwie upraszczanej łamanej, gdzie wartość ε odpowiada przyjętej w algorytmie wartości tolerancji. Dodatkowo, potencjalnie konfliktowe punkty znajdują się wewnątrz otoczki wypukłej⁶ przetwarzanej łamanej.
- 2) Łamane wejściowe są spójne topologicznie i wolne od wszelkich konfliktów, co gwarantuje, że w pewnej odległości $\delta > 0$ od przetwarzanej krzywej nie znajdują się

⁶ Otoczka wypukła – dla danego zbioru punktów S jest to najmniejszy zbiór wypukły zawierający S (Preparata, Shamos 1985). Otoczka wypukła linii łamanej jest specjalnym przypadkiem charakteryzującym się tym, że punkt będący ekstremum lokalnym pewnego jej segmentu S_i należy do otoczki wypukłej tego segmentu (Saalfeld 1999, patrz rys. 3.6).

żadne punkty (zewnętrzne lub wewnętrzne w stosunku do badanej krzywej). Założenie to implikuje, iż przyjmując wartość tolerancji $\varepsilon < \delta$ usuwa się możliwość powstania konfliktów między przetwarzaną łamaną, a wszelkimi innymi obiektami mapy.

Ponadto autor dowodzi, iż techniką zmierzającą do usunięcia powyższych niespójności nie może być post-processing, ale raczej podejście całościowe. Polega ono na rozbudowaniu samego algorytmu upraszczania o nowe instrukcje, które odpowiadają za wykrywanie i rozwiązywanie pojawiających się konfliktów.

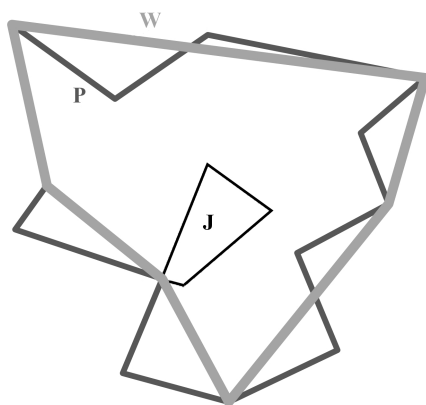
Metoda ta zakłada, iż zmniejszając wartość ε , a więc dodając do rysunku wyjściowego nowe punkty ze zbioru wierzchołków łamanej wejściowej, można osiągnąć zamierzony rezultat, czyli obraz linii łamanej wolny od niespójności topologicznych. W tym celu wykorzystano:

- 1) Rozszerzony algorytm dynamicznej otoczki wypukłej. Ekstremum lokalne pewnego fragmentu badanej łamanej musi należeć do jego otoczki wypukłej, podobnie jak punkty zewnętrzne, które mogą spowodować powstanie konfliktów.
- 2) Badanie i ograniczanie wielkości sąsiedztwa (ang. *neighbourhood screening*).
- 3) Efektywny pomiar spójności topologicznych między elementami. Punkty, które mogą zmienić swoje położenie względem aktualnie badanego fragmentu linii muszą się znajdować wewnątrz trójkąta utworzonego przez końce fragmentu oraz punkt stanowiący jego ekstremum lokalne. Na tej podstawie określa się parzystość elementów znajdujących się w potencjalnym konflikcie.

Proponowane przez Saalfelda rozwiązania stoją w sprzeczności z założeniami metody Chrobaka. Autor operuje zmienną wartością tolerancji, podczas gdy ze względu na rozpoznawalność rysunku w skali docelowej wartość ta (długość najkrótszego boku trójkąta elementarnego (Chrobak 1999)) powinna być stała.

3.3. Samoprzecięcia linii. Algorytm Wu–Marquez

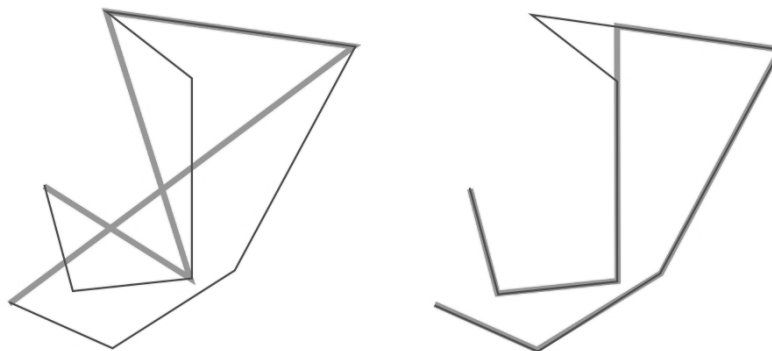
Nieco inną metodę rozwiązania problemu samoprzecięć linii pojawiających się w algorytmie Douglasa–Peuckera zaproponowali Wu i Marquez (2003). Wykorzystali oni właściwości geometryczne wielokątów gwiazdkształtnych⁷: podzbiór zbioru punktów tworzących wielokąt gwiazdkształtny zawsze tworzy łamaną, która jest wolna od samoprzecięć (rys 3.2).



Rys. 3.2 Wielokąt gwiazdkształtny P i jego jądro J oraz wielokąt W zbudowany na podzbiorze wierzchołków P

Proponowana procedura polega na wprowadzeniu do algorytmu Douglasa–Peuckera pewnych modyfikacji, zmierzających do wykonania upraszczania linii nie w sposób globalny, ale na pewnych odpowiednio dobranych jej fragmentach: pierwotną łamaną należy podzielić na skończoną liczbę podzbiorów wierzchołków tak, aby tworzyły one fragmenty gwiazdkształtne. Wobec poszczególnych fragmentów gwiazdkształtnych należy z kolei zastosować algorytm upraszczania Douglasa–Peuckera (rys. 3.3, 3.5).

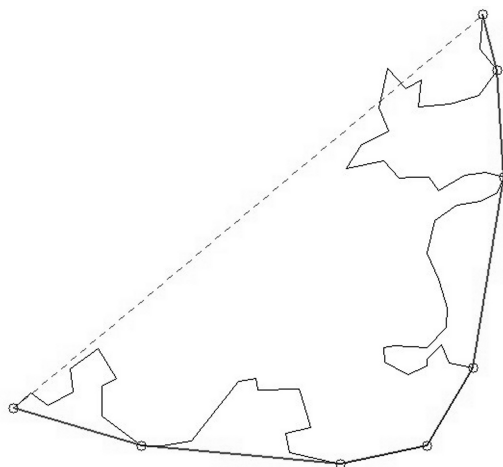
⁷ Wielokąt gwiazdkształtny – jest to wielokąt prosty P dla którego istnieje punkt z nie zewnętrzny do P taki, że dla wszystkich punktów p z P odcinek zp jest całkowicie zawarty w P . Zbiór takich punktów z tworzy J , czyli jądro wielokąta P (Preparata, Shamos 1985, por. rys. 3.2).



Rys. 3.3. Łamana uproszczona bez (po lewej) oraz z wykorzystaniem wielokątów gwiazdkształtnych (po prawej) (Wu, Marquez 2003)

3.3.1. Podział linii na fragmenty gwiazdkształtne

Zaproponowano podział łamanej na fragmenty gwiazdkształtne, opierający się na podziale pierwotnej łamanej na segmenty na podstawie jej otoczki wypukłej (rys. 3.4): punkty, które należą do otoczki stanowią będą punkty końcowe poszczególnych segmentów.



Rys. 3.4. Podział łamanej na segmenty z wykorzystaniem jej otoczki wypukłej

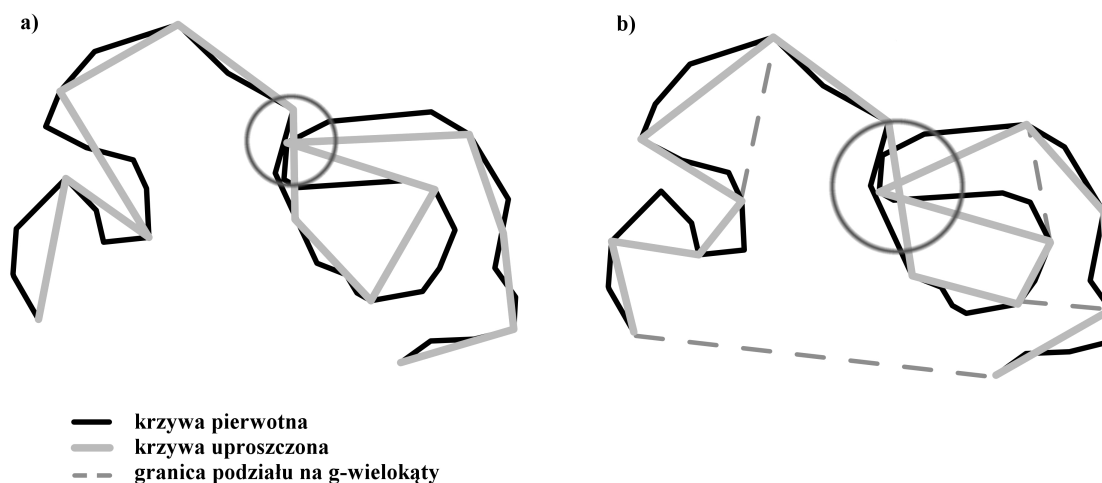
Pewien problem stanowią linie łamane, których punkty końcowe nie należą do takiej globalnej otoczki. W tym przypadku podział na segmenty został nieco zmodyfikowany poprzez wykorzystanie zliczania kierunków przecięć odcinka łączącego globalny początek i koniec przez badaną linię, por. (Wu i in. 2004)).

Następnie segmenty te dzielone są na fragmenty (wielokąty) gwiazdkształtne, zgodnie z zasadą, że wielokąt gwiazdkształtny stanowić będzie taki zbiór wierzchołków, które będą widoczne z jednego punktu – jądra wielokąta. Przyjęto bardzo uproszczoną metodę, polegającą na ustaleniu tego punktu jako środka odcinka łączącego końce dzielonego segmentu i badaniu, czy odcinek łączący powyższy punkt z kolejnymi punktami segmentu nie przecina żadnego z odcinków segmentu.

Podział segmentu na fragmenty gwiazdkształtne jest hierarchiczny, to znaczy kolejne punkty, które zostają odrzucone z pierwszego fragmentu, tworzą nowy segment, badany w analogiczny sposób.

3.3.2. Eliminacja przecięć niezależnych fragmentów gwiazdkształtnych

W trakcie działania omawianego algorytmu mogą pojawić się nowe konflikty, zewnętrzne w stosunku do upraszczanych fragmentów gwiazdkształtnych (rys. 3.5b). Eliminację tych przecięć oparto na wyżej wspomnianej technice, w której wykorzystywane są parzystości poszczególnych elementów (Saalfeld 1999).



Rys. 3.5. Niespójności topologiczne łamanej upraszczanej globalnie (a) oraz niespójności powstałe między upraszczanymi fragmentami gwiazdkształtnymi (b)

3.4. Metoda obiektywna – ograniczenie występowania konfliktów oparte na wartości progowej i regule geometrycznej

Zaproponowana metoda rozpoznawania oraz usuwania konfliktów w procesach komputerowej generalizacji kartograficznej (Chrobak 1999) opiera się na odpowiedzi na dwa zasadnicze pytania:

- 1) Kiedy konflikty nie występują?
- 2) Co należy zrobić, aby zminimalizować ich występowanie?

Częściowo odpowiedź na pytanie pierwsze jest oczywista – konflikty nie wystąpią, jeśli obiekty zostaną wyeliminowane bądź też nie zostaną uproszczone, a jedynie zmniejszone na skutek zmiany skali. Drugi warunek powoduje konieczność zdefiniowania tak zwanego progu generalizacji – atrybutu definiującego graniczną wartość stopnia generalizacji bez upraszczania. Zakładając jego jednoznaczną identyfikację, możliwe staje się wnioskowanie na podstawie wygenerowania z bazy danych informacji na temat wartości atrybutów obiektów będących treścią tworzonej mapy. Należy pamiętać, że warunkiem koniecznym jest również zdefiniowanie pewnych reguł ilościowych upraszczania obiektów liniowych.

3.4.1. Reguły ilościowe służące do eliminacji konfliktów

Chrobak (1999) proponuje zastosowanie następujących reguł:

- Wobec obiektów o priorytetowej treści mapy należy stosować symbolizację, gdy:
 - linia łamana otwarta składa się z $n > 2$ wierzchołków, a po generalizacji liczba punktów wynosi co najmniej $n = 2$;
 - linia łamana zamknięta jest budynkiem i po generalizacji liczba punktów $n \leq 3$ (bez niezmienników);
 - linia łamana zamknięta ma kształt nieregularny i składa się z $n > 3$ punktów, a po generalizacji liczba punktów $n < 3$ (bez niezmienników).
- Wobec obiektów nie stanowiących priorytetów treści mapy należy stosować eliminację, gdy:

- linia łamana otwarta składa się z $n > 2$ wierzchołków i po generalizacji liczba punktów wynosi co najmniej $n = 2$;
- linia łamana zamknięta jest budynkiem i po generalizacji liczba punktów $n \leq 3$ (bez niezmienników);
- linia łamana zamknięta ma kształt nieregularny i składa się z $n > 3$ punktów, a po generalizacji liczba punktów $n < 3$ (bez niezmienników).

3.4.2. Zastosowanie reguł do rozpoznania konfliktów

Zaproponowane reguły obejmują analizę konfliktów wewnątrz obiektów na podstawie liczby punktów, stopnia redukcji skal (ze źródłowej do tworzonej) i dokładności. Algorytm upraszczania Chrobaka (1999) umożliwia ich stosowanie zarówno do łamanych otwartych, jak i zamkniętych. Rozpoznanie konfliktów wewnątrz obiektów dotychczas odbywało się najczęściej na podstawie analizy powierzchniowej tych obiektów.

Do analizy konfliktów zewnętrznych między obiektami odnosi się reguła geometryczna (Chrobak 1999). Znając atrybuty zmiany skali obiektów (z bazy danych) oraz obiekty pozostające (na podstawie reguły geometrycznej), możemy dokonać analizy konfliktów między superklasami, klasami i podklasami obiektów o strukturze sieciowej (np. drogi czy też rzeki).

4. STRUKTURA BAZY DANYCH A KONFLIKTY*

System baz danych, z którego generuje się mapę, powinien zawierać elementy umożliwiające przeprowadzenie jej generalizacji. Należy o tym pamiętać już na etapie tworzenia koncepcji systemu. Bez poprawnie zbudowanej struktury reguł tematycznych, logicznych, topologicznych i geometrycznych w bazie danych nie może być mowy o automatycznej generalizacji kartograficznej, w tym również o rozpoznawaniu i usuwaniu konfliktów.

W najczęściej proponowanym (Chrobak i in. 2007) trójwarstwowym systemie bazy danych elementem odpowiedzialnym za eliminację konfliktów staje się serwer aplikacji. Ma on ogromny wpływ na implementację chociażby reguł geometrycznych czy topologicznych, które umożliwiają rozpoznanie i eliminację powstałych w procesie upraszczania konfliktów.

4.1. Warstwy i reguły tematyczne

W relacyjno – obiektowym modelu bazy danych przechowywane informacje w dalszym ciągu (analogicznie na przykład do nakładek analogowej mapy zasadniczej) rozwarstwia się, uwzględniając ich strukturę i tematykę. Każda warstwa tematyczna obejmuje dane geometryczne i semantyczne, zawiera też pewien zakres tych danych. Rozwarstwienie to stanowi o czytelności bazy danych i łatwości operowania danymi, zarówno pod względem ich aktualizacji, jak i prezentacji. Wpływa ono również na proces upraszczania danych, co oznacza, że poszczególne obiekty upraszczane są z uwzględnieniem ich przynależności do warstw, czyli oddzielnie i niezależnie.

Obecnie nie są projektowane wielowarstwowe bazy danych przeznaczone do generalizacji automatycznej, ponieważ trudno zapanować nad konfliktami, które mogą powstać między różnymi warstwami. Chodzi tutaj głównie o rozwiązanie problemu bliskości obiektów. Trudno jest również zachować integralność obiektu, gdy obiekty sąsiadujące rozdzielone są obiektami występującymi na innych warstwach (na przykład dwa budynki po przeciwnych stronach drogi).

* Rozdział 4 opracowany został na podstawie fragmentów publikacji: Żukowska M. 2007. *Konflikty*. [w:] (Chrobak i in. 2007).

W bazach danych o jednej warstwie tematycznej geometria obiektu może być wspólna różnym typom obiektów. Linia może równocześnie przedstawiać na przykład geometrię drogi i granice lasu. Wspólna geometria obiektów zdecydowanie upraszcza opanowanie tworzących się konfliktów.

Oddzielną kwestię stanowi możliwość konstruowania tematycznych reguł (czy też ograniczeń, niezmienników) generalizacji przy znajomości tematycznej przynależności danego obiektu. Stanowią je specyfikacje, które ukazują tematyczny poziom abstrakcji obiektu w generalizacji bazy danych. Do reguł tych zaliczyć można:

- unikanie częstej konwersji rzek z wymiaru liniowego do powierzchniowego,
- nie umieszczanie budynków na drodze albo elemencie hydrograficznym,
- możliwość połączenia obiektów sąsiadujących, należących do tej samej warstwy tematycznej.

Niespełnienie powyższych reguł może prowadzić do powstania kolizji między obiektami na zgeneralizowanej mapie.

Istnienie reguł tematycznych umożliwia przeprowadzanie tak zwanej generalizacji zależnej od tematu, polegającej na równoczesnym generalizowaniu obiektów o podobnej naturze.

4.2. Logiczne struktury danych i reguły logiczne

Logiczne struktury danych powinny być tworzone odpowiednio do koncepcyjnego modelu danych i wymagań postawionych przez użytkownika procesowi generalizacji.

Do automatyzacji procesu generalizacji niezbędne są metody pozyskiwania logicznych podzbiorów danych, do których, w zależności od wyszczególnionych czynników, należy stosować różne algorytmy. Procedury związane z generalizacją, takie jak upraszczanie czy też przemieszczanie (całych obiektów bądź też pewnych wierzchołków krzywych), można wykonać z chwilą utworzenia odpowiednich, logicznych podzbiorów bazy danych (Richardson 1993).

4.3. Związki i reguły topologiczne

Jedną z zasadniczych trudności pojawiających się w trakcie opracowywania metod automatycznej generalizacji jest, oprócz braku sposobów lokalizowania i rozwiązywania konfliktów, także problem identyfikowania relacji przestrzennych między obiektami (Ruas, Lagrange 1995). W bazie danych elementem odpowiadającym za przechowywanie zapisu relacji przestrzennych obiektów geograficznych jest topologia. Można więc przyjąć, że zbiór danych przestrzennych powinien składać się z elementów geometrycznych oraz topologicznych.

Nietrudno zauważyć, że związki topologiczne określają sąsiedztwo obiektu. W zależności od zastosowanego w bazie modelu danych, wliczając modele umożliwiające rozwiązywanie konfliktów (w tym przestrzennych), wymagana jest precyzja w określaniu wzajemnych relacji sąsiedztwa (bliskości). Związki topologiczne, po przeprowadzeniu generalizacji, powinny bowiem zostać zachowane, dlatego stanowią one pewne ograniczenie przestrzennego zachowania się obiektów (Yaolin i in. 2001).

Mechanizmy odpowiedzialne za modelowanie związków przestrzennych, a więc związane z topologią obiektów, powinny umożliwiać implementację reguł topologicznych odpowiadających wybranemu modelowi danych. Zaliczyć można do nich następujące reguły (Yaolin i in. 2001; ESRI 2004):

- poligony należące do tej samej klasy obiektów nie mogą się nakładać,
- wszystkie punkty danej klasy muszą należeć do granicy poligonów,
- wszystkie pojedyncze poligony powinny całkowicie pokrywać daną powierzchnię (luki są niepożądane),
- linii łamane nie powinny się nakładać ani przecinać inaczej, jak tylko w węźle,
- linie łamane (granice poligonów) nie mogą zawierać samoprzecięć,
- linie łamane nie mogą zawierać pseudowęzłów (czyli w każdym węźle powinny się zaczynać lub kończyć co najmniej trzy krzywe),
- należy unikać wprowadzania nielogicznych związków sąsiedztwa (związane jest to z aspektem tematycznym, np. dom na jeziorze),
- należy unikać rozdzielenia obiektów, gdy usuwana jest ich część.

Niespełnienie danej reguły przez obiekty powstałe w skutek upraszczania obiektów pierwotnych, powoduje powstanie niespójności topologicznych, a więc konfliktu między obiektami.

4.4. Relacje i reguły geometryczne

W celu prawidłowego opanowania konfliktów wewnątrz i międzyobiektowych należy znać relacje geometryczne między dowolnymi obiektami. Relacje te związane są z wielkością, szerokością oraz strukturą rozmieszczenia obiektów i są jednym z kluczowych elementów, stanowiących o możliwości uniknięcia lub rozwiązania już zaistniałych kolizji między obiektami. Poznanie bliskości obiektów pozwala np. na identyfikację obiektów sąsiadujących z miejscem wystąpienia konfliktów, a zrozumienie gdzie istnieją relacje powiązania i jak je zachować, zezwala na przekształcenie i przesuwanie obiektów przy jednoczesnym zachowaniu konsekwencji topologicznej. Umożliwia to uniknięcie wspomnianych już, nieprawidłowych wzajemnych lokalizacji obiektów.

Reguły czy też ograniczenia geometryczne są w dużej mierze zależne od danej aplikacji. Zaliczyć do nich można (Yaolin i in. 2001):

- geometryczny typ obiektu,
- minimalną wielkość obiektu (powierzchnia, długość),
- minimalną odległość między obiektami,
- minimalną szerokość obiektów,
- zachowanie globalnego kształtu i krętości obiektów.

Zastosowanie reguł opartych na geometrii jest jedną z metod lokalizacji oraz późniejszego rozwiązywania konfliktów. Przykładem może być wcześniej wspomniana propozycja Chrobaka (zob. rozdz. 3.4).

5. ROLA KLASYFIKACJI, HIERARCHII I TOPOLOGII DANYCH W PROCESIE ROZWIĄZYWANIA KONFLIKTÓW

Celem generalizacji kartograficznej jest eliminacja zbędnych treści mapy przy jednoczesnym zachowaniu informacji oraz reprezentowanych cech geograficznych upraszczanych obiektów. Kolejnym ważnym czynnikiem, o którym należy pamiętać w procesie generalizacji, jest zachowanie rozpoznawalności rysunku (Chrobak 1999). Jeśli generalizacja ma być efektywna, powinna spełniać oba te kryteria. A więc wszystkie automatyczne algorytmy generalizacji powinny działać w oparciu o zdefiniowaną „ważność” informacji (Beard 1991) (czy też wspomniane rozpoznawalne cechy), w szczególności jeśli ma być zachowana rozpoznawalność rysunku mapy oraz jej obiektów, wolnych od konfliktów przestrzennych.

Klasyfikacja obiektów oraz hierarchia klas w procesie generalizacji służy ustaleniu „ważności” poszczególnych obiektów, tudzież całych ich klas. Sama zaś klasyfikacja grupuje obiekty zgodnie z pewnymi ustalonymi kryteriami, np. funkcyjnymi. Umożliwia to operowanie nie tylko na poszczególnych obiektach, ale właśnie na całych ich ściśle określonych grupach. Elementy te pomocne są chociażby przy podejmowaniu decyzji odnośnie kolejności usuwania obiektów przynależnych do poszczególnych klas na mapie w zadanej skali docelowej.

Drugim elementem niezbędnym dla przeprowadzenia generalizacji jest możliwość korzystania z topologii obiektów. Topologia rozumiana jako wzajemne powiązania przestrzenne obiektów, a więc relacja logicznych związków w zbiorach obiektów mapy, niezbędna jest w sytuacjach wymagających określenia związków między dwoma lub więcej obiektami. Jest to niezwykle przydatne chociażby w przypadku łączenia na rysunku mapy obiektów przynależnych do rozdzielnych warstw tematycznych, a znajdujących się *de facto* w związku bezpośredniego sąsiedztwa. Znając topologię tych obiektów można dalej badać chociażby ich wzajemną rozpoznawalność.

5.1. Hierarchia klas i klasyfikacja obiektów

W poprawnie zaprojektowanym schemacie klasyfikacji pojedyncze obiekty powinny należeć do jednej i tylko jednej klasy – właściwość ta gwarantuje wzajemną rozłączność klas. Każdy z obiektów powinien więc być przypisany do tylko jednej ze zdefiniowanych klas i w jednej klasie nie mogą znaleźć się obiekty o jednakowych wartościach atrybutów (Muehrcke 1986).

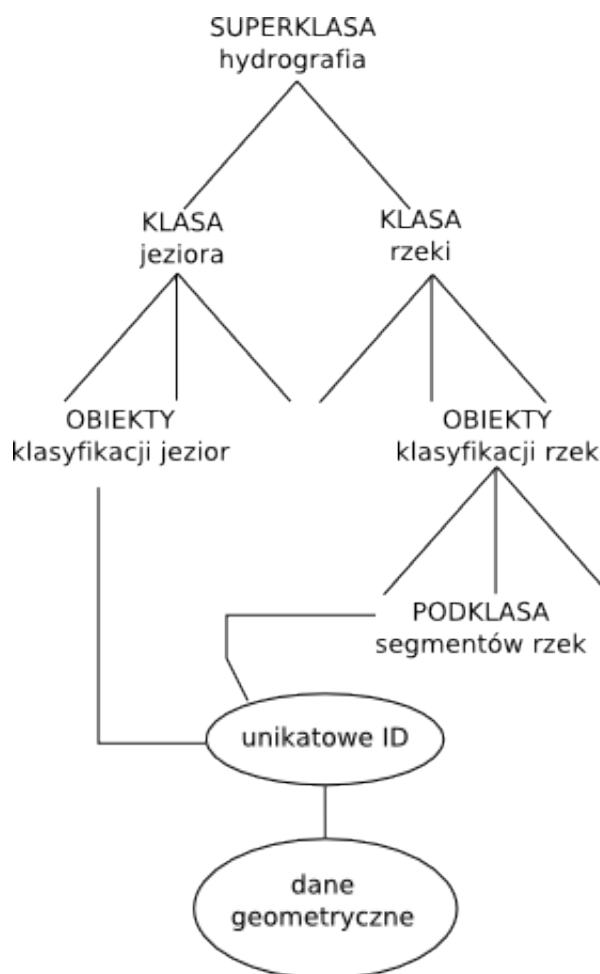
Hierarchia klasyfikacji oznacza, że obiekty danej klasy mogą być opisywane na kilka sposobów za pomocą podklas. Przy czym wszystkie obiekty danej podklasy muszą również należeć do wyższej w hierarchii klasy. Tak więc w całym zbiorze klas oraz ich podklas na szczycie hierarchii klasyfikacji powinna stać jedna superklasa.

Każda klasa reprezentuje zbiór obiektów posiadających wspólne charakterystyki. Podklasę z kolei stanowić będzie analogiczny zbiór obiektów, które jednocześnie będą członkami innej klasy.

Każda klasa (podklasa) w tak ustalonej hierarchii dziedziczy właściwości swojej superklasy, a więc wszystkie właściwości klasy dziedziczone będą w dół (Molenaar 1990, Thompson 1989). Dziedziczenie to ma kształt odwróconego drzewa i pozwala, wraz z poruszaniem się po coraz niższych jego gałęziach, na bardziej szczegółowy i wyspecjalizowany tematyczny opis obiektów.

Oprócz hierarchii klasyfikacji wyróżnia się także hierarchię łączenia. Różnią się one tym, iż hierarchia łączenia odnosi się do interpretacji, w której związek między obiektami stanowi obiekt wyższego rzędu. Pozwala więc na interpretowanie związane z obiektami złożonymi z elementów pochodzących z niższego poziomu. Hierarchia łączenia ma charakter drzewa, w którym zaczynając od obiektów elementarnych budowane są obiekty coraz bardziej złożone (dziedziczące część atrybutów tworzących je elementów prostszych, Molenaar 1991).

Przykładową hierarchię łączenia dla obiektów o charakterze hydrograficznym reprezentuje rys. 5.1.



Rys. 5.1. Hierarchia łączenia hydrografii
(Źródło: Chrobak i in. 2007)

5.1.1. Klasyfikacja i hierarchia klas a konflikty

Istnienie klasyfikacji obiektów bazy danych pełni zasadniczą rolę w procesie usuwania konfliktów graficznych, zwłaszcza konfliktów zewnętrznych. Klasyfikacja obiektów umożliwia bowiem jakościowe rozróżnienie obiektów zidentyfikowanych jako skonfliktowane. Można tym samym wskazać, który z takich obiektów jest istotniejszy, biorąc pod uwagę dodatkowo przeznaczenie mapy oraz jej zakres tematyczny. Jest to taki etap procesu generalizacji, który nie może zostać w pełni zautomatyzowany, gdyż warunki wyboru opartego o jakościowe charakterystyki obiektów mają charakter ulotny, związany z konkretną generalizacją dla potrzeb konkretnej prezentacji. Na przykład na mapie drogowej hydrografia zwykle jest elementem mniej istotnym, niosącym informację dodatkową, uzupełniającą

właściwą treść mapy. Mapę hydrograficzną cechować będzie odwrotny stosunek istotności sieci rzecznej i drogowej.

Z kolei rozróżnienie obiektów związane z hierarchią klas ma już charakter ilościowy, a więc możliwa jest automatyzacja procesu wyboru istotniejszego z obiektów skonfliktowanych. Ilościowy charakter hierarchii klas związany jest z obiektywnym i jednoznacznym jej charakterem – raz ustalona hierarchia klas bazy danych oraz związana z nią istotność obiektów do klas danej hierarchii przynależnych jest niezmienna w czasie i nie zależy od przeznaczenia ani zakresu tematycznego opracowania. Typowym przykładem może być sieć drogowa, gdzie ustalenie hierarchii dróg lokalnych, powiatowych, wojewódzkich i krajowych jest zadaniem posiadającym jedno, oczywiste rozwiązanie. A więc w przypadku konfliktu występującego między drogą wojewódzką a lokalną wskazanie ważniejszego z obiektów jest zadaniem trywialnym.

5.2. Zmodyfikowana hierarchia wierzchołków

Człowiek dokonując manualnej kartograficznej generalizacji obiektów nie ma problemu z określeniem, które punkty najlepiej oddają charakterystykę łamanej reprezentującej obiekt na mapie. Przełożenie tych umiejętności na język reguł zrozumiałych dla komputerów nie jest łatwym zadaniem. Jednym z powodów jest fakt, że zależy to od wielu czynników, w tym od przeznaczenia tworzonego opracowania kartograficznego. Podejmowano wiele prób określenia „ważności informacji” niesionej przez własności poszczególnych punktów upraszczanej łamanej. Ważność ta opiera się na kryteriach geometrycznych (Pavlidis 1978, Freeman 1978, Marino 1979, Dettori 1982, Thapa 1988, itd, za Beard 1991), wśród których wyróżnia się określenie punktów krytycznych⁹ jako punktów początkowych i końcowych upraszczanej łamanej, oraz punktów uzyskanych w oparciu o lokalne minima i maksima. Często podkreślano, że ważność punktów charakteryzujących kształt obiektów geograficznych zależy w szczególności od skali opracowywanej mapy.

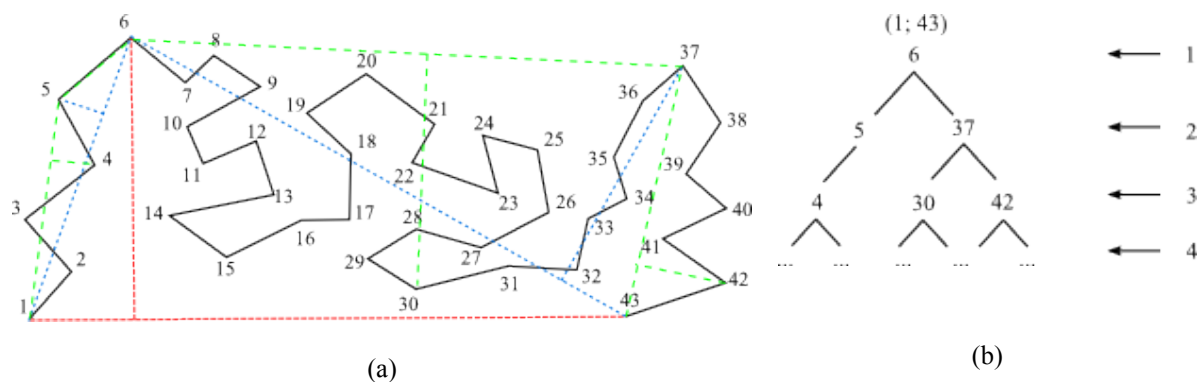
Obiektywna metoda upraszczania łamanych (Chrobak 1999) charakteryzuje się m. in. tym, że zachowuje topologię i hierarchię punktów tworzących tę łamaną, w dowolnym przedziale skal. Hierarchia ta, którą można określić jako hierarchię globalną, związana jest

⁹ Punkty krytyczne – punkty, które bezpośrednio i najpełniej przenoszą informację związaną z kształtem (bądź innymi charakterystykami) łamanej.

z kształtem łamanej i wynika z kolejnych (malejących ze względu na odległości) ekstremów lokalnych. Są one wyznaczone w przedziałach zamkniętych, określanych przez niezmienniki procesu przekształcania. Pierwszymi niezmiennikami są początek i koniec upraszczanej łamanej, zaś pierwsze ekstremum lokalne wyznacza punkt leżący pomiędzy punktami początkowym i końcowym, położony w największej odległości od cięciwy całego fragmentu upraszczanej linii. W kolejnych etapach łamana dzielona jest przez wyznaczone ekstremum na dwa fragmenty, dla których poszukuje się kolejnych ekstremów lokalnych, liczonych analogicznie do pierwszego (rys. 5.2a).

Poszukiwanie ekstremów jest więc procedurą rekurencyjną, która buduje hierarchię punktów łamanej, opartą o drzewo binarne, na którym do danego poziomu hierarchii przypisywany jest jeden lub więcej punktów. Stanowi to o niemożliwości rozwiązania ewentualnych konfliktów graficznych.

Taki sposób budowania hierarchii punktów przedstawia rys. 5.2b, na którym rozrysowano cztery poziomy binarne drzewa hierarchii globalnej (odpowiadają im liczby umieszczone po prawej stronie rysunku, wskazujące strzałkami kolejne poziomy węzłów drzewa). W węzłach drzewa umieszczono numery punktów stanowiących ekstremum lokalne odpowiadające danemu poziomowi hierarchii. Nad korzeniem drzewa, w nawiasie, umieszczono numery punktów początkowego (1) i końcowego (43) łamanej. Znajdują się one niejako na zerowym poziomie hierarchii.



Rys. 5.2. Hierarchia wynikająca z kolejnych ekstremów lokalnych

Do innych przykładów algorytmów działających w oparciu o globalną hierarchię punktów zalicza się m. in. algorytm Douglasa–Peuckera (w którym hierarchia ta budowana jest

analogicznie jak w metodzie Chrobaka), czy też algorytm hierarchicznego upraszczania Cromley'a (Chrobak i in. 2007).

Jednak nie wszyscy autorzy opracowań zajmujący się problematyką automatyzacji procesu generalizacji zgadzają się z tym, iż upraszczanie globalne, a co z tym związane również hierarchia globalna (Chrobak 1999, Douglas, Peucker 1973), najlepiej spełniają wspomniane na początku kryteria. Niestety, zwłaszcza przy zastosowaniu dużych wartości tolerancji, algorytmy te zostały określone jako wizualnie niedopuszczalne (Dutton 1999). Chociaż tak uproszczone łamane charakteryzują się dobrymi metrykami (porównującymi linię uproszczoną z jej oryginałem, np. małe wartości przemieszczenia), to często pomija się fakt, że łatwo mogą spowodować niepoprawny przebieg linii (konflikty graficzne, w tym samoprzecięcia linii, zob. Chrobak i in. 2007). Dutton (1999) wskazuje na algorytmy lokalne jako te, które generują lepszy wizualnie rysunek uproszczonych linii.

5.2.1. Hierarchia a konflikty

W naturalny sposób na ustalenie hierarchii punktów tworzących łamaną powinna mieć wpływ ich „ważność”, związana z informacją, którą one ze sobą niosą. Stąd też w procesie upraszczania wybór punktów określa się jako wybór punktów krytycznych. Zbudowanie jednoznacznej hierarchii punktów łamanej jest niezbędne, gdy proces upraszczania jej kształtu ma być wolny od konfliktów graficznych. Podobnie konieczne jest określanie, jeśli już konflikt zostanie rozpoznany, sposobu jego rozwiązania. W tym celu niezbędna staje się wiedza umożliwiająca wskazanie punktów „ważniejszych”, czyli tych, które w razie niemożliwości rozwiązania konfliktu na innej drodze, niż eliminacja, powinny pozostać w uproszczonej łamanej. Hierarchia punktów linii powinna być jednoznaczna, a naturalna hierarchia globalna, tworzona na drodze kolejnych ekstremów lokalnych (algorytm Douglasa–Peuckera, metoda Chrobaka), jest niewystarczająca do rozwiązywania konfliktów. Konieczne staje się więc jej rozszerzenie o atrybuty umożliwiające pełne rozróżnienie hierarchiczne punktów, co prowadzi do rozwiązania, w którym jednemu poziomowi hierarchii odpowiada jeden tylko punkt łamanej.

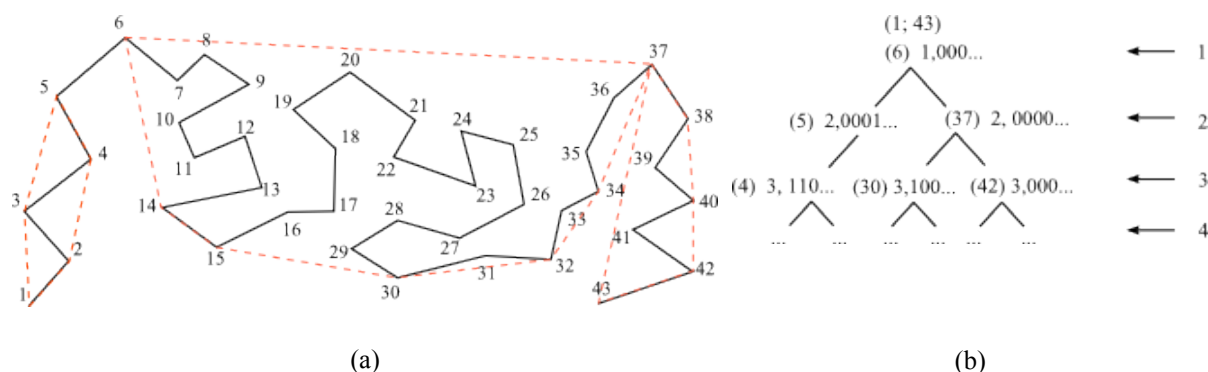
Proces budowania globalnej hierarchii punktów łamanej rozpoczyna się od ustalenia pierwszych niezmienników – punktu początkowego i końcowego, a następane określenia

pierwszego ekstremum lokalnego. Punkt stanowiący ekstremum lokalne fragmentu upraszczonej łamanej zawsze należy do otoczki wypukłej tego fragmentu (Saalfeld 1999). W procesie upraszczania całej łamanej można hierarchicznie budować otoczki wypukłe kolejnych fragmentów, tworzonych przez podział danego na dwa fragmenty dzielone w punkcie stanowiącym jego ekstremum lokalne. Ta hierarchia budowania otoczek odpowiada globalnej hierarchii punktów łamanej, przy czym kolejne poziomy otoczek wypukłych określać się będzie jako *rzędy otoczek*. A więc otoczka pierwszego rzędu będzie to otoczka, która zawiera pierwsze ekstremum lokalne, odpowiadające pierwszemu poziomowi globalnej hierarchii punktów. Przykład otoczek trzeciego rzędu znajduje się na rysunku 5.3a.

Dodając do zbioru punktów tworzących łamaną punkty należące do otoczek kolejnych rzędów ostatecznie otrzyma się łamaną wyjściową, a więc kolejne rzędy otoczek (stanowiące podstawę określenia nowych atrybutów punktów łamanej) stanowią w sumie coraz lepsze przybliżenie wejściowej łamanej.

Kolejne ekstrema lokalne będą należeć do obliczanych otoczek wypukłych kolejnych rzędów. Przy czym można zauważyć, że we fragmentach łamanej o mniej skomplikowanym rysunku, tworzonym przez mniejszą liczbę punktów, z zasady można zbudować mniej kolejnych otoczek. A więc fakt, czy punkt należy do danego rzędu otoczek wypukłych, z uwzględnieniem jego przynależności (bądź jej braku) do wszystkich innych (zwłaszcza wyższych) rzędów otoczek, może nieść informację o „ważności” danego punktu. Na przykład punkt, który będzie należeć do wszystkich kolejnych rzędów otoczek będzie niósł więcej informacji od punktu, który należeć będzie tylko do otoczki najniższego rzędu, ale również od punktu, który będzie należeć tylko do dwóch pierwszych rzędów otoczek.

Za przykład niech posłuży rysunek 5.3, gdzie punkty nr 5 i 37 znajdują się na tym samym (drugim) poziomie hierarchii, wynikającym z ekstremów lokalnych. Przy czym punkt nr 37 niesie więcej informacji niż punkt nr 5, ponieważ opiera się na nim większa liczba punktów znajdujących się niżej w naturalnej hierarchii łamanej. Tak więc w globalnej, jednoznacznej hierarchii powinien znaleźć się wyżej niż punkt nr 5. Zastosowanie dodatkowej informacji, związanej z przynależnością tych punktów do kolejnych rzędów otoczek wypukłych, umożliwi hierarchiczne rozróżnienie wspomnianych punktów, jednocześnie wprowadzając do hierarchii globalnej informację dotyczącą lokalnej istotności punktów.



Rys. 5.3. Otoczki wypukłe kolejnych rzędów ((a) - otoczki rzędu 3-go) oraz rozbudowanie hierarchii o informacje z nimi związane (b)

Rysunek 5.3b przedstawia budowę hierarchii punktów tworzących łamaną z rysunków 5.2a oraz 5.3a, stanowiącą poszerzenie hierarchii globalnej o informację związaną z przynależnością punktów do kolejnych rzędów otoczek wypukłych. W dalszym ciągu liczby znajdujące się po prawej stronie wskazują na kolejne poziomy hierarchii globalnej. W stosunku do rysunku 5.2b zmienił się natomiast opis węzłów drzewa binarnego. A więc liczby w nawiasach (dla pierwszego poziomu hierarchii jest to (6)) odpowiadają numerom punktów łamanej. Z kolei liczba poza nawiasem (dla poziomu pierwszego jest to 1,000...) odpowiada wartości poziomu hierarchii danego węzła (a więc danego punktu). Część całkowita liczby odpowiada dokładnie poziomowi naturalnej hierarchii globalnej. Z kolei z częścią ułamkową liczby związana jest informacja o przynależności (bądź nie) danego punktu do danego rzędu otoczek wypukłych. Na kolejnych miejscach ułamka (w_u) znajdować się może cyfra 0, oznaczająca przynależność do otoczki danego rzędu, bądź 1, oznaczająca brak przynależności do otoczki danego rzędu. Ułamek ten obliczany jest ze wzoru:

$$w_u = \sum_{i=1}^k (b \cdot 10^{-i}) \quad (5.1)$$

gdzie: i – rząd otoczki,

b – może przyjmować wartość 0 lub 1 (informacja o przynależności do otoczki rzędu i).

Im mniejsza wartość liczbowa w danym węźle drzewa, tym wyżej w hierarchii znajduje się punkt danemu węzłowi odpowiadający.

W przypadku, gdyby tak poszerzona hierarchia w dalszym ciągu powodowała przypisanie więcej niż jednemu punktowi danego poziomu w hierarchii, potencjalnie powodowała by nierozwiązanie konfliktu graficznego. Wówczas proponuje się dalsze rozszerzenie zbioru atrybutów umożliwiających zbudowanie hierarchii o obwód, a dalej pole trójkąta, z którego zostało określone pierwotne ekstremum lokalne, czyli pierwszy z atrybutów hierarchizujących punkty łamanej.

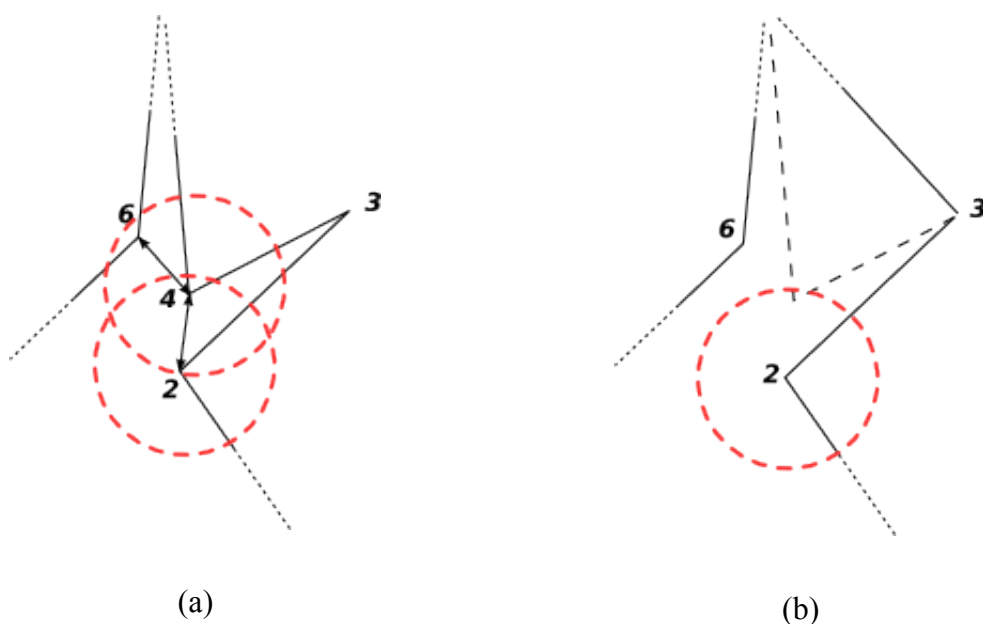
Ostatecznie proponuje się określanie hierarchii punktów łamanej na podstawie trzech atrybutów (h_i):

- 1) Naturalna globalna hierarchia punktów tworzona przez kolejne ekstrema lokalne, poszerzona o informacje na temat przynależności punktów do kolejnych rzędów otoczek wypukłych, wyliczanych równocześnie z kolejnymi ekstremami lokalnymi.
- 2) Wielkość obwodów trójkątów związanych z kolejnymi ekstremami lokalnymi.
- 3) Pola trójkątów związanych z kolejnymi ekstremami lokalnymi, obliczane w razie przypisania więcej niż jednego punktu do danego poziomu hierarchii obliczonego na podstawie atrybutów 1 i 2.

Tak więc miejsce danego punktu w hierarchii wszystkich punktów łamanej obliczać się będzie przy pomocy algebraicznego sumowania wartości tych trzech atrybutów.

5.2.2. Wpływ hierarchii punktów na rozwiązanie konfliktów

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że rozwiązywanie konfliktów powinno odbywać się w kolejności od punktów stojących w hierarchii najwyżej – w dół. Takie podejście ma na celu zagwarantowanie powstania poprawnego i nie nazbyt uproszczonego rysunku łamanych wyjściowych.



Rys. 5.4. Wpływ hierarchii i kolejności eliminacji konfliktów. Liczby na tym rysunku odpowiadają wartościom poziomów hierarchii punktów (symboliczny, jednocyfrowy zapis proponowanego algebraicznego sumowania wartości atrybutów)

Za przykład niech posłuży rysunek 5.4, na którym znajduje się fragment łamanej. Liczby opisujące punkty na tym rysunku symbolizują wartości poziomów hierarchii tych punktów, przy czym wartość niższa oznacza wyższy poziom hierarchii. Jednocześnie (dla potrzeb przykładu) zakłada się, iż jedyny dopuszczalny sposób rozwiązania konfliktu polega na eliminacji jednego ze skonfliktowanych elementów. Jeśli wykryty został konflikt punktów o poziomach hierarchii 2 i 4, oraz punktów o wartościach poziomów hierarchii 4 i 6, przy czym punkty o wartościach poziomów 2 i 6 nie są skonfliktowane (rys. 5.4a), to:

1. Wariant 1: Rozpoczynając eliminację konfliktów od punktu o wartości poziomu 2 (najwyższy w hierarchii) otrzymamy odrzucenie punktu o wartości poziomu 4. Ten krok eliminuje jednocześnie konflikt między punktami o wartościach poziomów 4 i 6 przy czym punkt o wartości poziomu 6 nie zostanie odrzucony, a więc rysunek wyjściowy będzie bliższy wariantowi powstałemu w procesie upraszczania opartym tylko o ekstrema lokalne (klasyczny przebieg procedury Chrobaka 1999).
2. Wariant 2: Jeśli natomiast w pierwszej kolejności rozpatrywane byłyby konflikty związane z punktem o wartości poziomu 4, to usunięty zostałby punkt o wartości poziomu 6, a w dalszej kolejności również punkt o wartości poziomu 4, jako skonfliktowany z punktem

o wartości poziomu 2. A więc powstały rysunek byłby bardziej uproszczony niż wcześniej wspomniany wariant 1.

Wariant 1 zapewnia wystarczającą rozpoznawalność rysunku wyjściowego (rys. 5.4b), a więc aż takie uproszczenie, jakim skutkowałoby zastosowanie wariantu 2, nie jest pod względem wymogów wizualizacji wymagane.

Myśląc o wpływie rozwiązywania konfliktów na rysunek linii należy pamiętać, że powinien on oddziaływać tylko na lepszą ich wizualizację. Oznacza to, że rysunek wolny od konfliktów, przygotowany do prezentacji w danej skali wyjściowej, nie może być rozpatrywany jako wyjściowy do dalszego upraszczania. Upraszczać powinno się zawsze dane źródłowe, które w procesie rozwiązywania konfliktów nie zostaną w żaden sposób zmienione.

5.3. Topologia

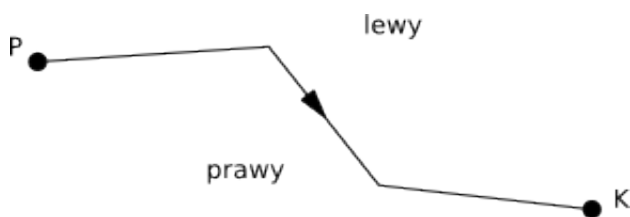
Słowem topologia (gr. *tópos* – miejsce, okolica; *lógos* – słowo, nauka) określa się zarówno pewien obszar badań matematycznych, jak również rodzinę zbiorów spełniającą określone warunki. Topologia jako dziedzina matematyki zajmuje się badaniem położenia oraz naturą przestrzeni (poprzez badanie jej struktury). Jest więc pewnym rozszerzeniem geometrii. Tak więc **topologia** *badania własności zbiorów punktów nie ulegających zmianom w przekształceniach będących homeomorfizmami, tj. funkcjami ciągłymi i różnowartościowymi takimi, że funkcje odwrotne do nich też są ciągłe* (np. dwa zbiory *A*, *B* są homeomorficzne, jeśli istnieje homeomorfizm przekształcający *A* na *B*).

Przykładem topologii jest topologia sieci. Odpowiada ona badaniu ułożenia elementów sieci, a więc jej węzłów i krawędzi, w szczególności wzajemnych powiązań węzłów. Topologia sieci determinowana jest graficznym odwzorowaniem konfiguracji połączeń węzłów. Technicznie jest więc częścią teorii grafów.

Topologii sieci bliskie jest pojęcie topologii stosowane w praktyce kartograficznej oraz środowiskach GIS. W tym przypadku przez topologię rozumie się *stosunki przestrzenne sąsiadujących obiektów* (np. zorientowanych linii, węzłów, wielokątów, punktów). Przykładowo topologia zorientowanej linii obejmuje jej węzeł początkowy i końcowy oraz obszary znajdujące się po jej lewej i prawej stronie (rys. 5.5). Relacje topologiczne buduje się

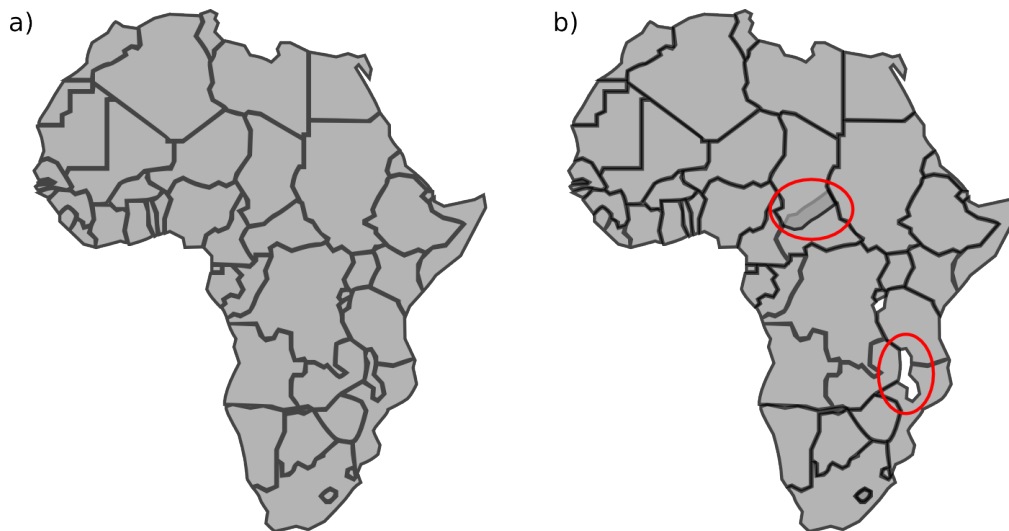
od elementów najprostszych (0-wymiarowych; punktów) do bardziej skomplikowanych (np. 2-wymiarowych; obszarów). Przy czym modelem matematycznym topologii obiektów mapy czy też bazy danych, podobnie jak w przypadku topologii sieci, jest graf planarny¹⁰.

Ważną cechą topologii jest jej niezmiennosc (izomorfizm położenia) podczas transformacji, np. do innego odwzorowania kartograficznego.



Rys. 5.5. Topologia zorientowanej linii łamanej

Niekiedy przez topologię w GIS rozumie się raczej zbiór zasad regulujących wzajemne relacje zachodzące między obiektami. Przykładowa reguła może brzmieć następująco: granice państw muszą całkowicie pokrywać kontynent i dzielić granice między sobą oraz granicami kontynentu. Oznacza to ciągłość powierzchni, eliminującą występowanie jakichkolwiek „dziur” oraz nakładania się obszarów (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Topologia obszarów: poprawna (a) oraz błędna (b)

¹⁰ Graf planarny – graf G taki, że istnieje jego geometryczna reprezentacja, którą można tak narysować na płaszczyźnie, iż żadne dwie z jego krawędzi nie przecinają się. Graf, którego nie można narysować na płaszczyźnie bez przecinania się jego krawędzi nazywa się nieplanarnym (Deo 1980).

5.3.1. Model danych topologicznych

W GIS topologia implementowana jest poprzez odpowiedni model i struktury danych. Powszechnie uznawane postulaty modelu topologicznego koncentrują się na charakterystykach linii i obejmują takie właściwości, jak:

- łączenie się linii w węzłach,
- łączenie linii powodujące powstanie obszarów zamkniętych,
- kierunek oraz prawe i lewe sąsiedztwo linii.

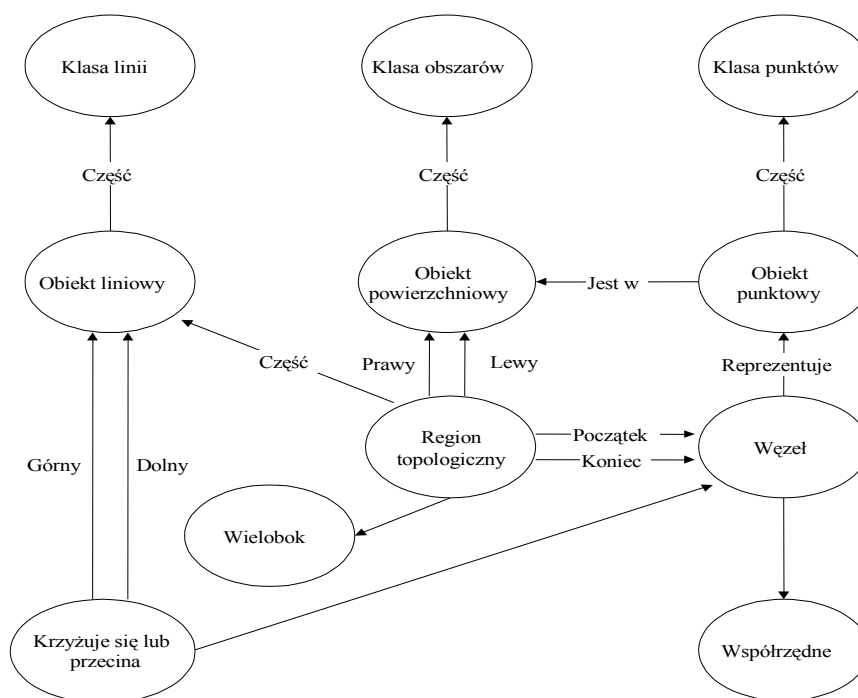
Tak więc np. obiekty powierzchniowe bezpośrednio do siebie przylegające powinny posiadać wspólny fragment granicy zapisany przy pomocy tej samej linii. Unika się w ten sposób redundancji danych w bazie oraz znacząco ułatwia np. aktualizację geometrii.

Wybór odpowiedniego modelu danych warunkuje również spełnianie przez niego dodatkowych wymagań, które w założeniu mają wspierać generalizację. Taki model powinien umożliwiać (Chrobak i in. 2007):

- przekształcenie danych w struktury logiczne umożliwiające dokonanie wielorakich interpretacji,
- stosowanie różnego poziomu interpretacji, w zależności od różnych wymagań związanych z generalizacją (np. wynikających z aplikacji czy skali),
- generalizację i specjalizację obiektów wewnątrz hierarchii klasyfikacji oraz dostosowanie połączenia między różnymi klasami obiektów (np. rzekami i jeziorami),
- przetwarzanie danych graficznych i tematycznych w sposób niezależny lub zintegrowany, w zależności od przeznaczenia mapy.

Model danych spełniający te wymogi oraz oparty na teorii grafów i regułach bazuje na formalnej strukturze danych FDS (ang. *Formal Data Structure*) dla jednowartościowych map wektorowych (Molenaar 1989, 1990, 1991 i 1996). Model ten zarządza zarówno aspektami geometrycznymi jak i tematycznymi danych, używając elementarnych typów danych (punkty, linie, obszary) oraz zbiorów powiązań geometrycznych między tymi typami danych i obiektami, w celu zapewnienia struktury danych zorientowanej obiektowo. Równocześnie zapewnia zapisanie związków topologicznych między elementami geometrycznymi a obiektami oraz ułatwia przeprowadzenie ich analiz.

Podstawową strukturę modelu stanowi połączenie danych geometrycznych i tematycznych przy pomocy identyfikatorów obiektów. Z kolei szczegółowy model koncepcyjny połączony z hierarchią ważności łuków i węzłów w strukturze globalnej przedstawia rys. 5.7.

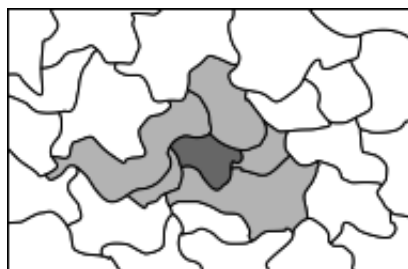


Rys. 5.7. FDS jednowartościowych map wektorowych w przestrzeni dwuwymiarowej
(Źródło: (Richardson 1993))

5.3.2. Modele i algorytmy umożliwiające zdefiniowanie sąsiedztwa (bliskości)

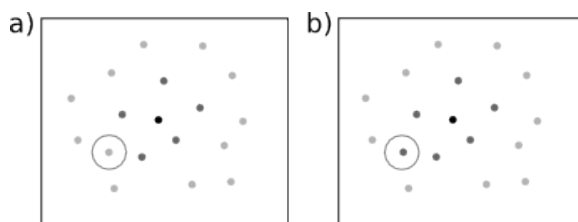
Identyfikacja konfliktów graficznych wymaga szczególnego wykorzystania topologii danych zawartych w bazie danych mapy cyfrowej. Mianowicie chodzi o wyszukiwanie obiektów sąsiadujących z określonym obiektem. Posiadając ściśle zdefiniowane pojęcie konfliktu (co to jest konflikt, w jakiej sytuacji występuje) wymagana jest w dalszej kolejności jego identyfikacja (wskazanie konkretnych instancji konfliktów) i eliminacja (czyli rozwiązanie zaistniałych konfliktów). Myśląc o „obiekcie” oraz „obiekcie z nim sąsiadujących” należy pamiętać, że w przypadku konfliktów wewnętrznych rozumiane przez nie będą poszczególne wierzchołki łamanych (stanowiących np. granice obiektów

powierzchniowych lub osie obiektów liniowych). Należy zauważyć, że dla danego pojedynczego wierzchołka należącego do danej łamanej, przynależność innych wierzchołków do tej samej łamanej nie stanowi warunku koniecznego zaistnienia relacji sąsiedztwa.



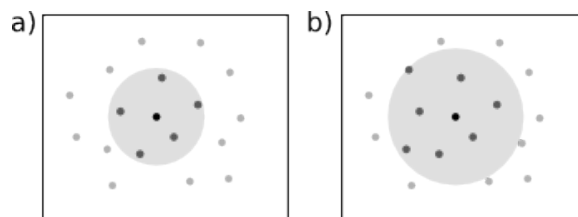
Rys. 5.8. Bezwzględne sąsiedztwo dla obiektów powierzchniowych

Definiując sąsiedztwo obiektów mapy należy pamiętać, że jest ono uzależnione od zadanej arbitralnie wartości odległości. To znaczy, że można mówić o najbliższym, *bezwzględnym sąsiedztwie* danego elementu, jak również o *sąsiedztwie względnym*, uzależnionym od zadanej wielkości. Co więcej, o ile dla obiektów powierzchniowych (wypełniających całą przestrzeń mapy) wskazanie takich sąsiadów bezwzględnych jest stosunkowo łatwe (będą to obiekty mające z danymi wspólną granicę, rys. 5.8), to dla obiektów np. punktowych taka relacja nie jest już tak prosta do zdefiniowania, ani też intuicyjna.



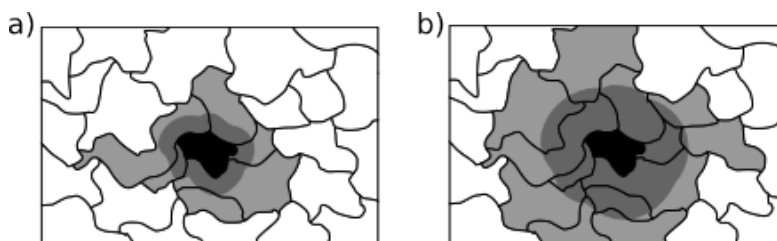
Rys. 5.9. Bezpośrednie sąsiedztwo punktów

Za przykład niech posłuży sytuacja z rysunku 5.9: czy punkt wyróżniony okręgiem znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie punktu centralnego (oznaczonego kolorem czarnym, rys. 5.9b), czy też może nie (rys. 5.9a)? W tym przypadku wyraźniej widać, że może zaistnieć potrzeba zdefiniowania sąsiedztwa względnego, czyli uzależnionego od pewnej wartości odległości. Wtedy sąsiadami punktu p będą te punkty, które znajdują się od niego w odległości co najwyżej równej wartości s , czyli znajdują się wewnątrz koła o promieniu s i środku p (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Sasiędzstwo punktów uzależnione od zadanej odległości

Jeśli dla każdego z punktów tworzących granicę obszarów powierzchniowych lub liniowych wyrysuje się takie koło, powstanie bufor definiujący takie względne sasiędzstwo (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Sasiędzstwo obszarów względne, zależne od zadanej odległości

Tak więc ogólnie sasiędzstwo względne można zdefiniować jako relację sasiędzstwa R_s (określoną na zbiorze badanych obiektów X), tj. zbiór wszystkich obiektów (x, y) takich, że odległość x i y jest mniejsza bądź równa zadanej wielkości s :

$$R_s \subseteq X \times X \quad (5.2)$$

$$xR_s y \Leftrightarrow \{(x, y): x, y \in X \wedge d(x, y) \leq s\} \quad (5.3)$$

Zakłada się przy tym, że dwa obiekty x i y znajdują się w odległości $d(x, y) \leq s$ wtedy, gdy przynajmniej jeden punkt (p_x) należący do x oraz przynajmniej jeden punkt (p_y) należący do y znajdują się w odległości euklidesowej mniejszej bądź równiej s :

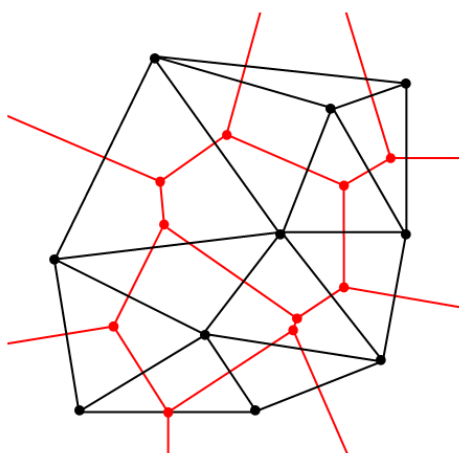
$$d(x, y) \leq s \Leftrightarrow \exists p_x \in x \wedge \exists p_y \in y: d_e(p_x, p_y) \leq s \quad (5.4)$$

5.3.2.1. Graf planarny jako model topologii

Jak już wspomniano, modelem matematycznych reprezentującym topologię jest graf planarny, którego węzły reprezentują poszczególne obiekty mapy, zaś krawędzie – zachodzące między nimi związki bliskości (sasiędzstwa).

Intuicję, która służyła do wskazania bezwzględnych sąsiadów obiektów powierzchniowych w przypadku obiektów punktowych można zastąpić pewną ściśle zdefiniowaną strukturą, tzn. diagramami Voronoi (inaczej nazywanymi poligonami Thiessena). Jest to struktura dobrze znana i szeroko wykorzystywana w geometrii obliczeniowej¹¹, m. in. właśnie do definiowania sąsiedztwa. Stanowi ona też podstawę innych struktur służących do określania sąsiedztwa.

Diagramy Voronoi stanowią w istocie graf planarny. Oprócz nich do reprezentacji topologii wykorzystuje się również ich graf dualny¹², jakim jest triangulację Delaunaya.



Rys. 5.12. Diagramy Voronoi (oznaczone kolorem czarnym) oraz triangulacja Delaunaya (oznaczona kolorem czerwonym) zbioru punktów
(Źródło: <http://pl.wikipedia.org>)

W przypadku przestrzeni dwuwymiarowej, dla danego zbioru n punktów, graf Voronoi dzieli płaszczyznę na n obszarów, w taki sposób, że każdy punkt w dowolnym obszarze znajduje się bliżej określonego punktu ze zbioru n punktów niż od pozostałych $n - 1$ punktów. Tak więc wielokąt Voronoi, czyli miejsce punktów bliższych punktowi p_i niż

¹¹ Geometria obliczeniowa – dziedzina zajmująca się tworzeniem wydajnych algorytmów rozwiązujących problemy geometryczne. Jedną z jej podstawowych cech jest stwierdzenie, że tradycyjne pojmowanie obiektów geometrycznych niejednokrotnie nie nadaje się do projektowania optymalnych algorytmów. Uniknięcie tego problemu wiąże się ze zdefiniowaniem nowych pojęć przydatnych w obliczeniach, a więc pewnym przekształceniem klasycznej dziedziny wiedzy (geometrii) w jej postać obliczeniową (Preparata, Shamos 1985).

¹² Graf dualny do grafu planarnego G – graf planarny G^* , zbudowany na następującej zasadzie: dla każdego regionu (obszary zamknięte krawędziami grafu, włącznie z obszarem zewnętrznym) grafu G tworzy się wierzchołek. Jeśli dwa regiony są przyległe rysuje się krawędź G^* , która przecina wspólną krawędź regionów dokładnie jeden raz. Jeśli wspólnych krawędzi jest więcej niż jedna – nową krawędź G^* rysuje się dla każdej z nich, odpowiednio. Dla krawędzi leżącej całkowicie w jednym regionie kreśli się pętlę własną w odpowiadającym jej punkcie (Deo 1980).

dowolnemu innemu punktowi, które oznacza się przez $V(i)$, jest przecięciem $n - 1$ półpłaszczyzn (Preparata, Shamos 1985). Jest więc komórką w kształcie wielokąta wypukłego mającego nie więcej niż $n - 1$ boków, czyli:

$$V(i) = \bigcap_{i \neq j} H(p_i, p_j) \quad (5.5)$$

gdzie: $H(p_i, p_j)$ – półpłaszczyzna zawierająca p_i oraz wszystkie punkty płaszczyzny bliższe p_i niż p_j .

Sieć takich wielokątów wypukłych związanych z poszczególnymi punktami zbioru nazywa się **diagramem Voronoi** (rys. 5.12) i oznacza zwykle przez $\text{Vor}(S)$.

Graf planarny uzyskany przez dodanie odcinka między każdą parą punktów zbioru S , których wielokąty Voronoi mają wspólną krawędź jest grafem dualnym do diagramów Voronoi. Jest on równocześnie triangulacją początkowego zbioru S punktów (rys. 5.12), na mocy twierdzenia Delaunaya (1934, za Preparata, Shamos 1985): prosta dualna diagramu Voronoi jest triangulacją S .

Przy pomocy triangulacji zbioru punktów można określić zarówno sąsiedztwo bezwzględne, jak i względne. Tak więc punkty bezpośrednio połączone w triangulacji krawędziami grafu znajdować się będą w sąsiedztwie bezpośrednim. Z kolei te punkty, które znajdują się wewnątrz okręgu o zadanym promieniu s znajdować się będą w sąsiedztwie względnym, bez względu na krawędzie łączące reprezentujące je węzły grafu.

Triangulacja Delaunaya (DT) jest pierwszą ze struktur stosowanych do badania sąsiedztwa obiektów. Jednak oprócz niej istnieją również inne, stanowiące jej podgrafy, takie jak minimalne drzewo rozpinające (MST) oraz graf względnego sąsiedztwa (RNG) czy graf Gabriela (GG). Istnieje między nimi poniższa zależność:

$$MST \subseteq RNG \subseteq GG \subseteq DT \quad (5.6)$$

Poniżej zostaną krótko przedstawione definicje oraz algorytmy umożliwiające zbudowanie tych struktur. Na koniec zostanie dokonana ocena przydatności tych struktur dla potrzeb rozpoznawania i rozwiązywania konfliktów graficznych.

5.3.2.2. Triangulacja Delaunaya

Algorytmy realizujące triangulację podzielić można na dwie grupy: przyrostowe (ang. *incremental*) oraz typu „dziel i rządź”. Wszystkie jednak korzystają z testu służącego zbadaniu, czy punkt D znajduje się wewnątrz okręgu opisanego na trójkącie utworzonym przez trzy inne punkty (A , B , C) oraz efektywnych struktur przechowujących już utworzone krawędzie. Na płaszczyźnie wspomniany test realizuje się przez badanie wyznacznika macierzy:

$$\begin{vmatrix} A_x & A_y & A_x^2 + A_y^2 & 1 \\ B_x & B_y & B_x^2 + B_y^2 & 1 \\ C_x & C_y & C_x^2 + C_y^2 & 1 \\ D_x & D_y & D_x^2 + D_y^2 & 1 \end{vmatrix} > 0 \quad (5.7)$$

Zakładając, że kolejność punktów A , B , C jest przeciwna do ruchu wskazówek zegara, dodatnia wartość wyznacznika tej macierzy oznacza, iż punkt D znajduje się wewnątrz okręgu wyznaczonego przez punkty A , B , C . W takim przypadku wymagane jest dodanie nowych krawędzi Delaunay.

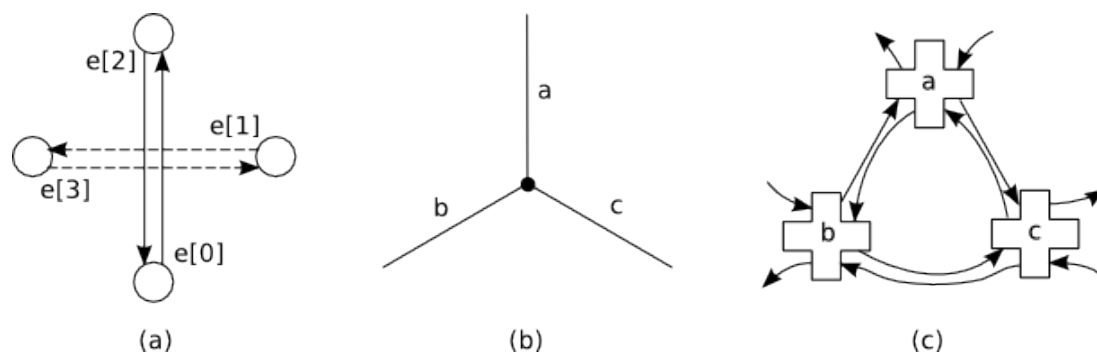
Algorytmy przyrostowe polegają na dodawaniu do już istniejącej triangulacji kolejnych punktów. Przykładem takiego algorytmu może być procedura *sweep*line, która przyspiesza działanie ogólnej metody przyrostowej poprzez sortowanie punktów względem jednej ze współrzędnych i dodawanie ich w tak określonej kolejności. Wtedy trzeba jedynie śledzić okręgi zawierające punkty o odpowiednio dużej wartości wybranej współrzędnej. Inny algorytm przyrostowy polega na przechowywaniu całej historii triangulacji w formie drzewa, ułatwiając wybór krawędzi usuwanych w danym momencie.

Algorytmy typu dziel i rządź są algorytmami rekurencyjnymi. W każdym kroku dzieli się zbiór punktów na dwa podzbiory, dla których oblicza się triangulację. Kolejno następuje łączenie dwóch uzyskanych triangulacji wzdłuż linii ich podziału.

Oprócz efektywnego algorytmu triangulacji potrzebna jest również struktura danych, która z jednej strony będzie wspierać procedurę triangulacji, z drugiej zaś posłuży do zapisu jej wyników. Przykładem może być opisana w (Guibas, Stolfi 1985) czterokrawędziowa struktura danych (ang. *quad-edge data structure*, QEDS). Została ona zaprojektowana dla

celów ogólnych podpodziałów orientowalnej rozmaitości¹³. QEDS umożliwia jednocześnie zapisanie zarówno danego podpodziału, jak i jego grafu dualnego. Przy jej pomocy możliwe jest więc zapisanie zarówno diagramów Voronoi, jak i triangulacji Delaunaya. Każdy pojedynczy czterokrawędziowy element struktury grupuje cztery skierowane krawędzie odpowiadające pojedynczej nieskierowanej krawędzi podpodziału oraz jej krawędzi dualnej (rys. 5.13a). Każda krawędź skierowana posiada wskaźnik na krawędź następną (w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara wokół punktu wyjściowego) oraz drugi, wskazujący na zewnętrzną strukturę przechowującą dane geometryczne oraz ewentualnie inne dane nietopologiczne.

Rysunki 5.13b i 5.13c ilustrują jak trzy krawędzie incydentne do jednego punktu są reprezentowane przy użyciu QEDS. Mianowicie sam punkt (węzeł) odpowiada wewnętrznemu cyklowi wskaźników (rys. 5.13c). Pozostałe cykle odpowiadają trzem ścianom spotykającym się w węźle.



Rys. 5.13. Czterokrawędziowa struktura danych
(Źródło: (Lischinski 1993))

Podstawową operacją topologiczną działającą na tej strukturze danych jest *sklejenie* (ang. *splice*), które służy zarówno połączeniu krawędzi w węźle, jak również ich rozbiciu (por. Guibas, Stolfi 1985). Procedura ta jest więc równocześnie swoją odwrotnością, w zależności od aktualnego stanu struktury.

¹³ Rozmaitość topologiczna – przestrzeń Hausdorffa mająca przeliczalną bazę i w każdym punkcie lokalnie homeomorficzna z \mathbb{R}^n . Inaczej mówiąc to przestrzenie topologiczne, które "lokalnie" wyglądają tak jak przestrzenie euklidesowe. Por. (Duda 1986, Mioduszewski 2003).

5.3.2.3. Graf Gabriela

Graf Gabriela (ang. *Gabriel Graph*, GG), jak wspomniano, jest podgrafem triangulacji Delaunaya. Graf Gabriela zbioru S definiuje się następująco (Gabriel, Sokal 1969, za Preparata Shamos 1985): niech $disk(p_i, p_j)$ będzie kołem mającym za średnicę odcinek $p_i p_j$; GG zbioru S ma krawędź między p_i i p_j wtedy i tylko wtedy, gdy $disk(p_i, p_j)$ nie zawiera we wnętrzu żadnego punktu S . W praktyce jest to DT pomniejszone o te krawędzie, które nie przecinają się ze swoimi krawędziami dualnymi (krawędziami Voronoi, por. rys. 5.14). Tak więc najprostszy sposób generowania GG polega na:

1. Znalezieniu DT oraz $Vor(S)$.
2. Dla każdej z krawędzi DT: sprawdzeniu czy przecina odpowiadającą jej dualną krawędź Voronoi, a następnie dodaniu jej (bądź nie) do wynikowego GG.

5.3.2.4. Graf względnego sąsiedztwa

Graf względnego sąsiedztwa (ang. *relative neighbourhood graph*, RNG) jest kolejnym podgrafem DT oraz równocześnie podgrafem GG. Definiuje się go następująco (Toussaint 1980, za Preparata, Shamos 1985): między p_i i p_j krawędź istnieje wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$d(p_i, p_j) \leq \min_{k \neq i, j} \max(d(p_i, p_k), d(p_j, p_k)) \quad (5.8)$$

Definicja ta w praktyce oznacza, iż krawędź (p_i, p_j) istnieje wtedy i tylko wtedy, gdy półksiężyc (p_i, p_j) otrzymany przez przecięcie kół o promieniach równych odcinkowi $p_i p_j$ i środkach odpowiednio w p_i i p_j nie zawiera we wnętrzu żadnych punktów S . Tworzenie RNG jest znacząco bardziej złożone niż GG.

5.3.2.5. Minimalne drzewo rozpinające

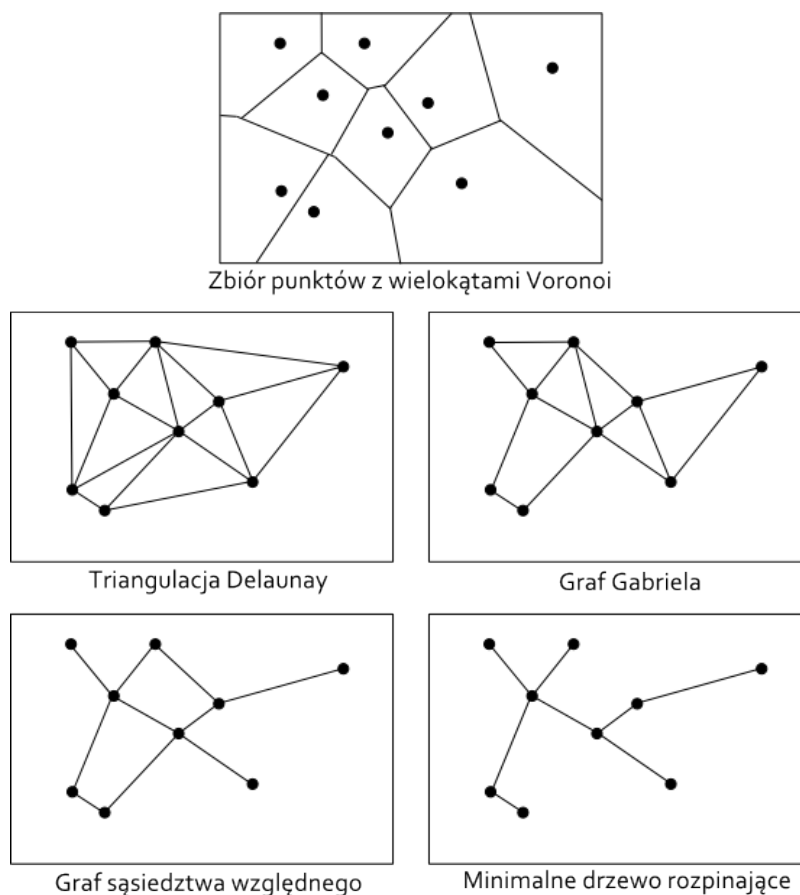
Minimalne drzewo rozpinające (ang. *minimum spanning tree*, MST) jest to z definicji drzewo o najmniejszej całkowitej długości, rozpięte na danym zbiorze punktów S . Jest więc podgrafem dowolnego grafu nieskierowanego. Przy czym MST poszukuje się także dla grafów, których krawędzie wagowane są innymi wartościami niż euklidesowa odległość wierzchołków do nich przyległych. MST jest jednocześnie najmniejszym (w sensie liczności krawędzi) z rozpatrywanej rodziny grafów.

Istnieje szereg algorytmów realizujących problem MST. Są to na przykład algorytmy Boruvki (Sollina), Prima czy też algorytm Kruskala (Cormen i in. 2001, Aho i in. 2003).

5.3.2.6. Grafy bliskości a konflikty graficzne

Identyfikacja konfliktów graficznych wymaga znajomości topologii badanych obiektów. W przypadku konfliktów wewnętrznych chodzi o wewnętrzną topologię łamanej reprezentującej obiekt, a więc sąsiedztwo wierzchołków łamanej. Wraz ze zmianą skali docelowej zmianie ulega również wielkość względnego sąsiedztwa badanego przy testowaniu istnienia konfliktów. Konieczne jest więc zbudowanie struktury umożliwiającej badanie sąsiedztwa nie tylko bezwzględnego, ale także względnego obiektów (oraz ich części składowych). Dodatkowo struktura ta powinna wspomagać dynamiczną aktualizację topologii, zmieniającej się wraz ze zmianą położenia obiektów bądź ich całkowitym usunięciem z rysunku mapy.

Rysunek 5.14 prezentuje opisane wcześniej grafy bliskości dla pewnego zbioru punktów. Zgodnie z (5.6) kolejne grafy (rozpoczynając od DT, a na MST kończąc) posiadają coraz mniej krawędzi, a więc reprezentują coraz silniejsze relacje sąsiedztwa zachodzące między punktami zbioru. Jednak wymóg wsparcia dla wyszukiwania sąsiedztwa względnego oraz dynamicznej aktualizacji był powodem odrzucenia grafów Gabriela, względnego sąsiedztwa oraz minimalnego drzewa rozpinającego jako nieodpowiednich dla celów rozpoznawania konfliktów graficznych – przeszukiwanie już dla stosunkowo niewielkich wielkości sąsiedztwa względnego wymagało uruchomienia odpowiednich procedur zamiast dostępu bezpośredniego. Aktualizacja struktury po zmianie topologii w niektórych przypadkach oznaczała zbudowanie jej od nowa, dla nowego zbioru danych.

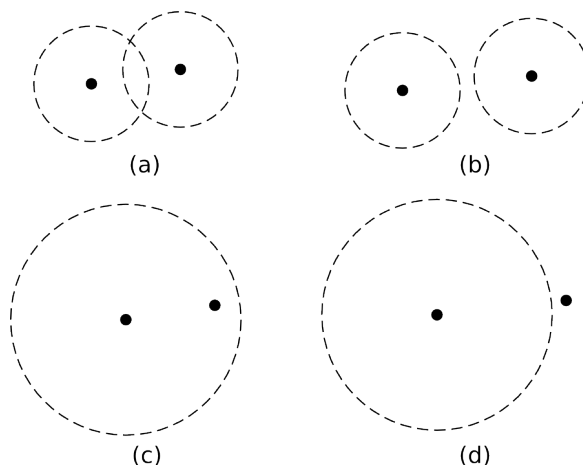


Rys. 5.14. Porównanie grafów bliskości

W pracy wykorzystano triangulację Delaunaya, jako dobrze opisaną w literaturze, posiadającą sprawdzone implementacje i zapewniającą obsługę największej ilości wymaganych przypadków. Mimo większego niż inne omawiane grafy bliskości obciążenia pamięci, umożliwia dynamiczną aktualizację struktury (np. wstawianie nowego punktu – algorytm przyrostowy Guibasa i Stolfiego (1978) ze zmianami Lischinskiego (1993), usuwanie punktu – algorytm opisany w (Mostafavi i in. 2003), ze zmianami Autorki). Ze względu na dualność DT do diagramów Voronoi struktura ta zawiera krawędzie odpowiadające wszystkim sąsiadom bezwzględnym, co ułatwia również wyszukiwanie sąsiadów względnych.

6. ZASTOSOWANIE TEORII OBIEKTYWNEJ GENERALIZACJI PERKALA

Perkal (1958) w swojej próbie obiektywnej generalizacji zastosował koło jako element definiujący widoczność punktu na mapie w nowej skali (por. rozdz. 1.4). Koło o zadanym promieniu R może więc zostać użyte jako **bufor rozpoznawalności** punktu na mapie w nowej skali: wszystkie punkty danego koła będą wzajemnie nierozróżnialne w skali docelowej. Umiejętność jednoznacznego określenia promienia R bufora rozpoznawalności punktu dla każdej ze skal wyjściowych implikuje możliwość obiektywnego badania, czy dwa punkty mapy będą w nowej skali mapy wzajemnie rozpoznawalne. Mianowicie *dwa punkty będą wzajemnie rozpoznawalne, gdy ich bufory rozpoznawalności nie przetną się* (rys. 6.1a, 6.1b). Ten sam warunek można zamienić na równoważny, przy zastosowaniu buforowania kołem o promieniu równym $2R$: *dwa punkty będą wzajemnie rozpoznawalne, jeśli żaden z nich nie znajdzie się wewnątrz bufora rozpoznawalności drugiego* (rys. 6.1c, 6.1d).

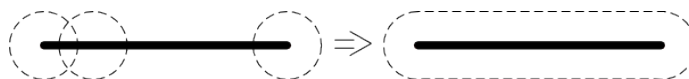


Rys. 6.1. Wzajemna rozpoznawalność punktów

Chrobak (1999) stwierdził, iż rozpoznawalność punktów na mapie w skali, dla której przeprowadzane jest uproszczenie kształtu łamanej, zależy od najkrótszej długości boku trójkąta elementarnego oraz mianownika skali docelowej. Wielkość e_f , odpowiadającą wzajemnej rozpoznawalności obiektów na mapie w skali docelowej oblicza się więc ze wzoru (1.1).

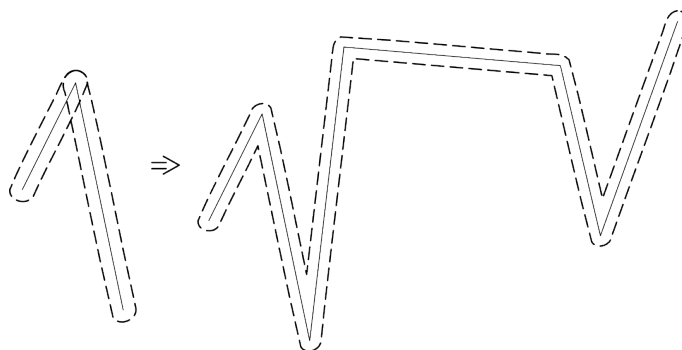
Łącząc powyższe obserwacje można przy pomocy miary rozpoznawalności e_f (Chrobak 1999) jednoznacznie dla danej skali docelowej zdefiniować wielkość bufora zakreślonego dla linii pierwotnej, umożliwiającego wskazanie obszarów, które wymagają uproszczenia. Jednocześnie, przy pomocy tego bufora, można wskazać obszary, dla których wystąpią bądź to bezpośrednie niespójności topologiczne (takie, jak przecięcia różnych krzywych), bądź też konflikty względne (por. rozdz. 1.2.2). Tak więc *bufor rozpoznawalności punktu stanowi będzie koło Perkala, o średnicy równej wielkości e_f* , ponieważ wszystkie punkty takiego koła, zgodnie z definicją miary rozpoznawalności Chrobaka, nie będą wzajemnie rozróżnialne na zgeneralizowanej mapie. Ze względów obliczeniowych można też zdefiniować równoważny bufor rozpoznawalności o podwójnej wielkości, tzn. o promieniu równym e_f . Różnica między buforami o promieniach wielkości $e_f / 2$ oraz e_f jest w rzeczywistości niewielka, wymaga tylko, tak jak wspomniano, innego potraktowania takich buforów w konkretnych zastosowaniach (por. rys. 6.1).

Bufor rozpoznawalności łamanej powstanie przez zakreślenie wokół każdego jej punktu odpowiadających im buforów rozpoznawalności. Rysunek 6.2 przedstawia sposób konstrukcji bufora dla pojedynczego odcinka.



Rys. 6.2. Bufor odcinka

Dla linii łamanej, przez ekstrapolację, bufor ten będzie składać się z sumy buforów utworzonych dla każdego z jej odcinków (rys. 6.3).



Rys. 6.3. Bufor łamanej

Bufor odcinka, bądź łamanej, utworzony z okręgów o zadanym promieniu R , można nazwać *buforem o wielkości R* .

Przecinanie się buforów rozpoznawalności wielkości $e_f / 2$ oznacza brak wzajemnej rozpoznawalności buforowanych elementów. Zastosowanie dla badanej łamanej bufora zbudowanego z kół Perkala o średnicy równej e_f dla badania występowania konfliktów graficznych podyktowane jest względami wizualizacji danych na mapie w skali docelowej. Można więc założyć, zgodnie z definicją rozpoznawalności Chrobaka (1999), iż zmiana położenia punktu w granicach jego buforu (koła Perkala) nie wpłynie na dokładność danych wizualizowanych w skali docelowej (z dokładnością wielkości e_f), ponieważ punkty znajdujące się w odległości mniejszej niż wielkość e_f nie będą rozróżnialne. Co za tym idzie, usuwanie konfliktów dla skali docelowej można przeprowadzić za pomocą ekscentru wierzchołka badanej krzywej, gdzie wielkość przesunięcia określać będzie zależność:

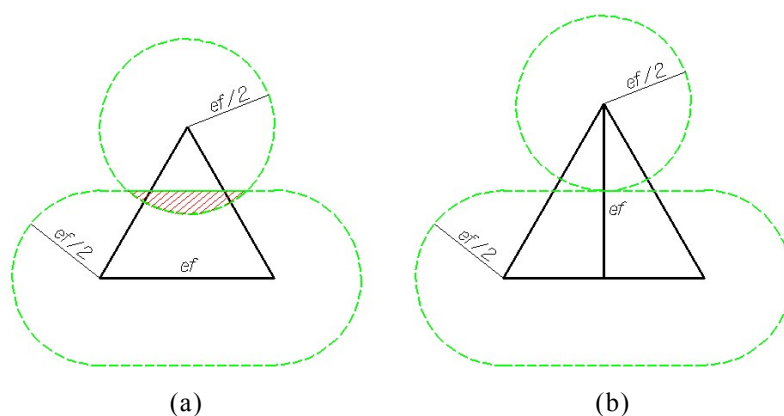
$$eks_i \leq e_f \quad (6.1)$$

Sposób ten wykorzystać można, co ważne, nie tylko dla lokalizacji i usuwania konfliktów pomiędzy segmentami tej samej linii, ale także takich, które wystąpić mogą pomiędzy oddzielnymi krzywymi, znajdującymi się często na innych warstwach tematycznych (np. pomiędzy drogami a rzekami). Zaznaczyć należy, że taka zmiana położenia ma miejsce jedynie dla mapy w skali docelowej, gdyż podyktowana jest ona względami zachowania czytelności rysunku. Nie zmniejsza ona w żaden sposób dokładności danych w skali wejściowej, a więc danych źródłowych zapisanych w bazie danych referencyjnych. Aby poznać dokładne położenie danego punktu czy też linii zawsze można sięgnąć do danych źródłowych.

6.1. Modyfikacja kryterium rozpoznawalności rysunku dla potrzeb rozwiązywania konfliktów

Badając zależność pomiędzy kołem Perkala a trójkątem elementarnym Chrobaka stwierdzono, iż równoczesne zastosowanie obu warunków rozpoznawalności powoduje powstanie konfliktu: bufor o promieniu $e_f / 2$, zbudowany dla dowolnego z boków trójkąta

elementarnego (zbudowanego z boków o minimalnej rozpoznawalnej w skali docelowej długości), przecina się z analogicznym buforem przeciwległego wierzchołka trójkąta (rys. 6.4a). Pociąga to za sobą sprzeczność pomiędzy rozpoznawalnością zdefiniowaną przez wielkość e_f stanowiącą długość boku trójkąta elementarnego oraz jednocześnie przez średnicę wyżej opisanego bufora.



Rys. 6.4. Modyfikacja wielkości trójkąta elementarnego

Celem usunięcia powyższej niejednoznaczności, dla celów badania konfliktów graficznych, w trójkącie elementarnym proponuje się badać dwa warunki:

1. Konieczny (wynikający z teorii Chrobaka (1999)) – długości wszystkich boków trójkąta winny być większe lub równe wielkość e_f .
2. Wystarczający – wysokość trójkąta elementarnego powinna być większa lub równa wielkości e_f (rys. 6.4b).

Zastosowanie dodatkowego warunku nie zmienia warunku koniecznego długości boków trójkąta elementarnego. Boki najmniejszego trójkąta spełniającego warunek dodatkowy (będącego trójkątem równobocznym) będą oczywiście spełniać warunek konieczny Chrobaka, ponieważ będą mieć długość d_{tr} wynoszącą:

$$d_{tr} = \frac{2 \cdot e_f}{\sqrt{3}} \quad (6.2)$$

Zastosowanie dla potrzeb rozwiązywania konfliktów obu warunków, koniecznego i wystarczającego, zapewnia nie tylko wzajemną rozpoznawalność wierzchołków

i incydentnych z nim odcinków łamanej, co miało miejsce również w przypadku pierwotnej definicji Chrobaka (1999), ale równocześnie zapewnia wzajemną rozpoznawalność wierzchołków i przeciwległych boków trójkąta elementarnego (a więc odpowiadających im odcinków łamanej), co jest zgodne z rozpoznawalnością wynikającą z teorii Perkala.

Kolejnym zagadnieniem, które może wpływać na rozpoznawalność treści mapy, a co za tym idzie na wielkość parametru e_f , jest przyjęta dla wynikowego rysunku grubość linii. Mianowicie wzór (1.1) opisujący wielkość parametru e_f został opracowany dla minimalnej rozpoznawalnej szerokości linii, czemu odpowiadają przyjęte wartości dla stałej s (0,5 mm dla wydruku/wyplotu bądź 0,6 mm dla rysunku mapy wyświetlanego na monitorze komputera, por. (Chrobak 1999)). Wielkość parametru e_f , a co za tym idzie również wielkość bufora rozpoznawalności, można oczywiście zmodyfikować, uzależniając je wprost od przyjętej dla wynikowego rysunku szerokości linii, której zmiana powinna pociągać za sobą odpowiednią zmianę wielkości parametru s .

7. METODA IDENTYFIKOWANIA I ELIMINACJI KONFLIKTÓW GRAFICZNYCH

Pojawianie się konfliktów graficznych w procesie generalizacji kartograficznej jest nieuniknione. Ich zaistnienie ma charakter unikalny, to znaczy silnie zależy od konkretnego kształtu generalizowanych obiektów mapy. Nie jest więc możliwe stwierdzenie *a priori*, czy jakiegokolwiek konflikty będą miały miejsce, ani też jakiego będą one typu.

Jak stwierdzono (por. rozdz. 3.2) metoda identyfikowania oraz usuwania konfliktów nie może działać na zasadzie pełnego *post-processingu*, ale raczej powinno ją charakteryzować podejście bardziej całościowe. Powinna ona również, w idealnym przypadku, cechować się obiektywnością oraz możliwością jej adaptacji dla różnych algorytmów upraszczania, przewiększania czy łączenia obiektów. Cech tych brakuje stosowanym dotychczas metodom (por. rozdz. 3), które tworzone były raczej dla potrzeb konkretnych algorytmów.

Identyfikacja konfliktów wymaga przede wszystkim zdefiniowania miary określającej zaistnienie takich niezgodności, zaś rozpoznanie konfliktu powinno powodować uruchomienie mechanizmów jego rozwiązania. W ogólności mechanizmy te opierają się na przesunięciu pewnych elementów (a więc zmianę ich położenia) bądź też na eliminacji obiektów lub ich części. Skutkiem obu tych działań jest lokalna zmiana topologii obiektów. Tak więc metoda rozwiązywania konfliktów powinna spełniać następujące warunki:

- oparcie się na jednoznacznej, obiektywnej mierze pojawienia się konfliktu,
- wsparcie dla szczegółowych metod rozwiązania konfliktu, zależnych od topologii oraz typu konfliktów i miary ich występowania,
- oparcie się na strukturze wspierającej dynamiczne zmiany topologii,
- brak generowania na wyjściu nowych konfliktów.

7.1. Identyfikacja konfliktów

Metoda identyfikacji konfliktów graficznych powinna opierać się o jednoznacznie zdefiniowaną wielkość, przy pomocy której można badać istnienie konfliktów. Proponuje się, aby stanowiła ją zdefiniowana przez Chrobaka (1999) wielkość charakteryzująca

rozpoznawalność rysunku, powiązana z kołem, jako podstawową figurą stanowiącą bufor punktu, zgodnie z teorią obiektywnej generalizacji Perkala (1958).

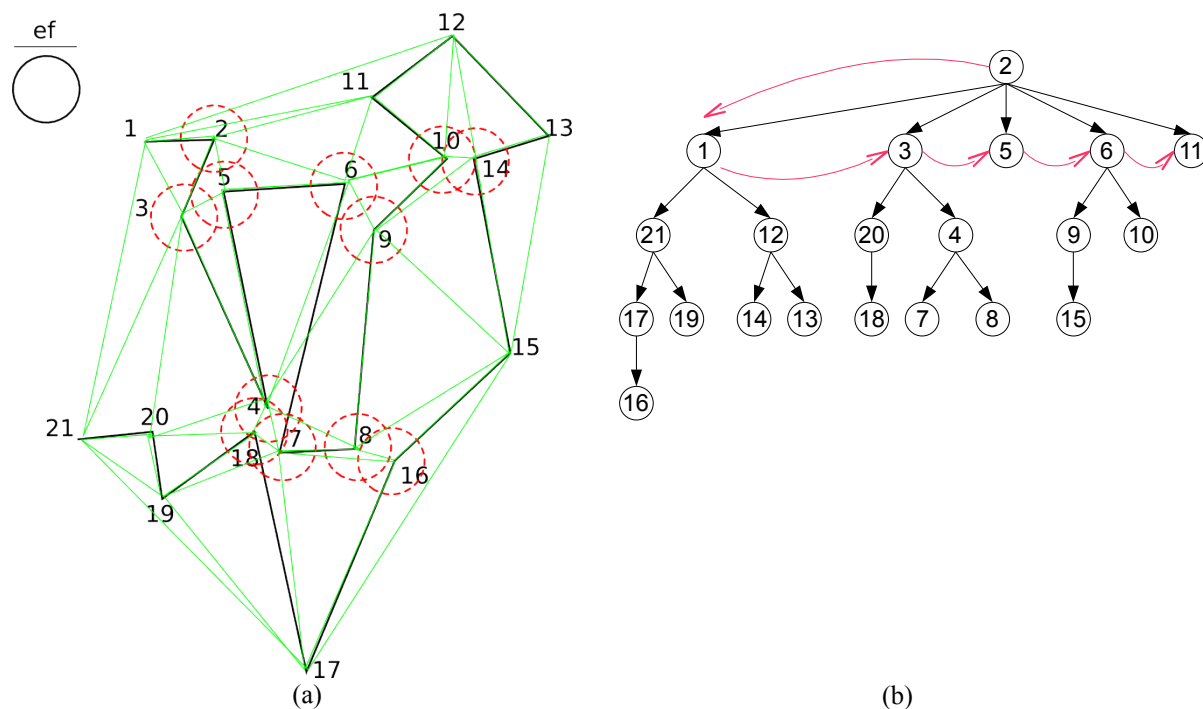
Tak więc w badaniach przyjęto, iż podstawową figurą stosowaną przy badaniu występowania konfliktów będzie koło o promieniu $R = e_f / 2$. Koło to stanowi bufor rozpoznawalności punktu (por. rozdz. 6). Analogicznie można budować bufory rozpoznawalności odcinków oraz łamanych, jako zbiorów punktów (por. rys. 6.2 i 6.3). W konsekwencji istnienie konfliktu określać można poprzez badanie przecięć buforów rozpoznawalności obiektów (bądź ich części). Jednocześnie, ze względów obliczeniowych w niektórych przypadkach można stosować bufory o podwójnej wielkości, przy czym warunek istnienia konfliktów w takim przypadku również ulega modyfikacji: o zaistnieniu konfliktu świadczy wtedy zawieranie się obiektu (bądź jego części) w buforze rozpoznawalności innego.

Mając zdefiniowany bufor rozpoznawania konfliktów można przystąpić do ich identyfikacji. Przykładowo identyfikacja konfliktów wewnętrznych łamanej przebiegać powinna na zasadzie przeszukiwania wszerz² grafu triangulacji Delaunaya (reprezentującej topologię wewnętrzną wierzchołków łamanej, por. rozdz. 5.3.2.6), przy czym dla aktualnie przetwarzanego punktu powinno badać się zarówno potencjalne konflikty *punkt – punkt*, jak również *punkt – odcinek* (gdzie odcinki definiowane są przez kolejność wierzchołków łamanej).

W przypadku konfliktów zewnętrznych badać należy relacje między kolejnymi wierzchołkami łamanej reprezentującej obiekt a sąsiadującymi z nimi wierzchołkami innego obiektu. Równocześnie badać należy konflikty *punkt – odcinek* oraz *odcinek – odcinek* (ten ostatni na zasadach określonych przez Saalfelda (1999)).

Badaniu potencjalnych konfliktów powinny podlegać wierzchołki i odcinki znajdujące się w sąsiedztwie względnym o wielkości zdefiniowanej przez bufor rozpoznawalności aktualnie przetwarzanego punktu (bądź odcinka, por. rozdz. 5.3.2).

² Przeszukiwanie grafu wszerz – algorytm przeszukiwania grafu. Rozpoczyna od korzenia (wybranego punktu) i odwiedza wszystkie połączone z nim węzły. Następnie odwiedza węzły połączone z tymi węzłami i tak dalej, aż do odnalezienia celu. Inny algorytm przeszukiwania grafu to przeszukiwanie w głąb, które zaczyna się od korzenia (wybranego punktu), następnie przechodzi do jednego z połączonych z nim węzłów i tak dalej, dopóki istnieją połączenia, po czym wraca o jeden poziom i próbuje kolejną gałąź, do skutku (por. Cormen 2001).



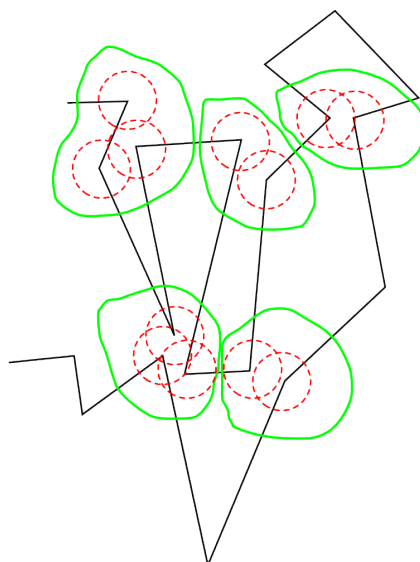
Rys. 7.1. Identyfikacja konfliktów na zasadzie przeszukiwania grafu: triangulacja (a) oraz drzewo przeszukiwania wszerz (b)

Przykładowa łamana wraz z triangulacją oraz buforami rozpoznawalności jej wierzchołków znajduje się na rysunku 7.1a. Przeszukiwanie wszerz wszystkich wierzchołków grafu, rozpoczynane od punktu nr 2, reprezentuje drzewo (rys. 7.1b). Kolorem czerwonym oznaczono kolejność przechodzenia do kolejnych wierzchołków – bezpośrednich sąsiadów punktu nr 2. Dla aktualnie przetwarzanego punktu badać należy jego potencjalne konflikty z sąsiednimi punktami oraz odcinkami. Należy zaznaczyć, że algorytm wyszukiwania konfliktów powinien być zbudowany w sposób nie powodujący testowania już sprawdzonych związków (np. jeśli sprawdzona jest już odległość punktów 2 – 3, to relacja odwrotna, czyli odległość punktów 3 – 2, jako identyczna z poprzednią, nie powinna już być sprawdzana).

7.2. Grupy konfliktów

Występowanie konfliktów graficznych wynikających z procesu generalizacji jest zjawiskiem ulotnym i unikalnym. Oznacza to, iż nie istnieją żadne ogólne reguły mówiące, czy i jakiego typu konflikty wystąpią w wyniku przeprowadzanego procesu np. upraszczania. *A priori* nie znana jest więc ani liczba konfliktów, ani ich wzajemne powiązania. Przy czym

przez powiązania konfliktów rozumieć należy fakt, iż często pojedynczy element znajduje się w więcej niż jednym konflikcie z innymi. Można więc mówić o **grupie konfliktów**, jako o *zbiorze powiązanych ze sobą przestrzennie pojedynczych, prostych konfliktów między obiektami, bądź ich elementami wewnętrznymi* (rys. 7.2).



Rys. 7.2. Grupy konfliktów

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że dokonując wstępnej identyfikacji konfliktów dowolnych typów należy więc pamiętać o ich ewentualnych powiązaniach, a więc zapisywać je raczej w grupach niż jako pojedyncze wystąpienia. Analogicznie należy więc postępować w przypadku eliminacji – *rozwiązywać powinno się grupy, a nie pojedyncze konflikty*. Takie podejście ma na celu swoistą optymalizację procesu, gdzie za cel stawia się *rozwiązanie konfliktów przy jednoczesnym zachowaniu maksymalnego podobieństwa do wyników wstępnego upraszczania*. Oznacza to takie przeprowadzenie procesu, aby minimalizować konieczność usuwania obiektu (lub jego części).

Powyższe podejście do rozwiązywania konfliktów jest silnie związane z hierarchizacją obiektów, lub (analogicznie) wierzchołków łamanej (por. rozdz. 5.2.2). Mianowicie, jak już wspomniano, w zależności od kierunku przeprowadzania usuwania konfliktów (w górę lub w dół hierarchii) otrzymać można różne wyniki. Jednocześnie stwierdzono, iż przyjęcie kierunku w dół hierarchii spełnia wspomniany warunek minimalizacji usuwania

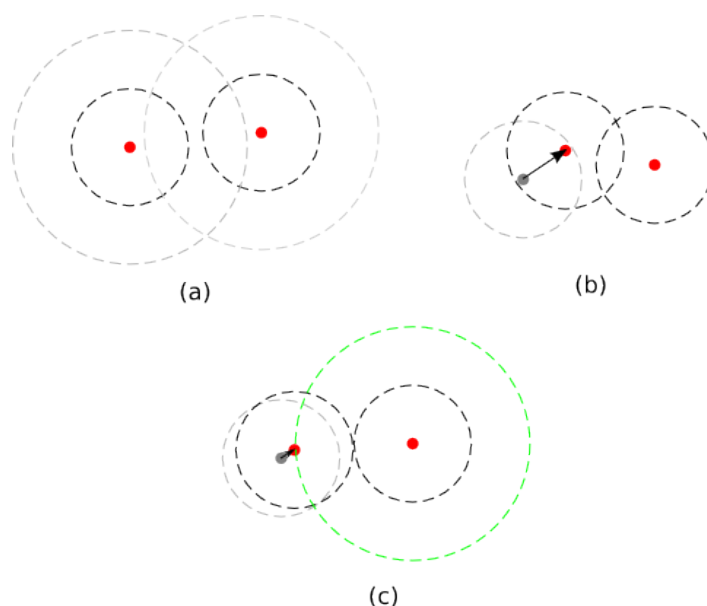
wierzchołków łamanej, zapewniając jednocześnie rysunek wyjściowy wolny od konfliktów graficznych.

Rozwiązywanie grup, a nie pojedynczych konfliktów, jest więc podejściem bardziej optymalnym. Przed przystąpieniem do eliminacji konfliktów należy jednak gruntownie zbadać naturę grup konfliktów, to znaczy rozpoznać jakie dokładnie elementy wchodzą w grupę konfliktów i jaką pełnią w niej rolę.

Grupa konfliktów, oprócz elementów bezpośrednio skonfliktowanych ze sobą, powinna zawierać również elementy dodatkowe. Spowodowane jest to, podobnie jak samo występowanie konfliktów, relacjami przestrzennymi zachodzącymi między obiektami (lub ich częściami). Chodzi mianowicie o uwzględnienie tych relacji, które co prawda w danej sytuacji nie stanowią o zaistnieniu konfliktu, jednak w momencie zmiany topologii mogłyby do ich powstania doprowadzić.

Tak więc oprócz elementów skonfliktowanych w grupie konfliktów powinny znaleźć się elementy **ograniczające**, służące zagwarantowaniu takiego rozwiązania danych konfliktów, aby nie powodowało ono powstania nowych, co w skrajnych przypadkach mogłoby prowadzić do nieskończonej pętli rozwiązującej konflikty przy jednoczesnym generowaniu kolejnych.

Ograniczenia powinny stanowić te punkty i odcinki, które znajdują się w stosunku do elementów skonfliktowanych w odległości nie powodującej co prawda przecinania się bufora rozpoznawalności o wielkości $e_f / 2$, ale jednocześnie powodującej przecięcie się buforów rozpoznawalności podwójnej wielkości (rys. 7.3a). Jest to związane z faktem, iż przesunięcie elementu skonfliktowanego o maksymalną dopuszczalną wielkość, czyli $e_f / 2$, powoduje również przesunięcie jego bufora rozpoznawalności. W tym momencie mógłby powstać nowy konflikt (rys. 7.3b). Jednak zastosowanie ograniczenia dopuszczalnego przesunięcia przez podwójny bufor punktu ograniczającego umożliwia znalezienie maksymalnego przesunięcia, które jednocześnie nie generuje nowych konfliktów.



Rys. 7.3. Ograniczenie przesunięcia punktu

Podsumowując, grupa konfliktów powinna składać się z:

1. Elementów skonfliktowanych, czyli znajdujących się w swoim względnym sąsiedztwie o wielkości mniejszej niż e_f , których konflikty są ze sobą powiązane przestrzennie.
2. Elementów ograniczających, czyli znajdujących się względem elementów skonfliktowanych w odległościach większych niż e_f , ale mniejszych niż $2e_f$.
3. Połączeń między wszystkimi elementami grupy, umożliwiających stwierdzenie jakie konflikty zachodzą oraz które ograniczenia wiążą się z poszczególnymi elementami skonfliktowanymi.

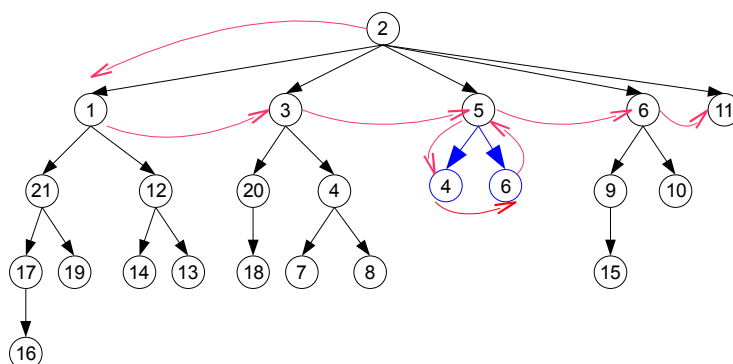
7.2.1. Identyfikacja grup konfliktów

W przypadku grup konfliktów proces ich wykrywania oparty jest na identyfikacji pojedynczych konfliktów, a więc na przeszukiwaniu wszczegółu grafu reprezentującego topologię (por. rozdz. 7.1). Należy jednak pamiętać, iż rozwiązywane powinny być nie pojedyncze konflikty, a całe ich grupy. Tworząc algorytm wykrywania konfliktów wewnętrznych zastosowano więc pewną modyfikację. Mianowicie w przypadku stwierdzenia konfliktu następuje lokalne przejście na swoiste przeszukiwanie w głąb, z korzeniem ustalonym

w aktualnie przetwarzanym punkcie, celem lepszego grupowania wykrywanych konfliktów. Głębokość tego przeszukiwania ogranicza bufor rozpoznawalności punktu, którego konflikty się bada. W przypadku znalezienia wszystkich konfliktów danego punktu (całej grupy, bądź podgrupy konfliktów, związanej z przetwarzanym punktem), powinien nastąpić powrót do przeszukiwania wszerez.

W przypadku wyszukiwania całych grup konfliktów należy również pamiętać o równoległej identyfikacji ograniczeń dla zlokalizowanych konfliktów. Przeszukiwanie to przebiegać będzie analogicznie, z zastosowaniem podwójnych wartości charakteryzujących wystąpienie konfliktu.

Przebieg takiego wyszukiwania grup konfliktów wraz z ograniczeniami rozpoczynając od punktu nr 2 łamanej z rys. 7.1a (por. rozdz. 7.1) reprezentuje rys. 7.4.



Rys. 7.4. Wyszukiwanie grupy konfliktów

Czerwonym kolorem oznaczono przechodzenie do kolejnych wierzchołków testowanych na konflikty bądź ograniczenia punktu nr 2. W punkcie nr 5, jako punkcie skonfliktowanym z punktem nr 2 (por. rys. 7.1a), następuje lokalne przejście na przeszukiwanie triangulacji w głąb z ograniczeniem głębokości szukania do wielkości bufora rozpoznawalności punktu 2 (gałęzie oznaczone na niebiesko). W każdym wierzchołku drzewa testuje się potencjalne konflikty i ograniczenia punktu nr 2 (w ogólności korzenia lokalnego drzewa przeszukiwania wszerez) w odniesieniu do aktualnego punktu oraz odcinków z nim incydentnych. W momencie zakończenia przetwarzania punktu nr 2 należy przejść do kolejnego, nie badanego punktu z grupy konfliktów, czyli punktu nr 5. Dla tego punktu rozpoczyna się kolejne przeszukiwanie wszerez (i ewentualnie w głąb), a więc *de facto* tworzenie nowego drzewa, analogicznie jak dla punktu nr 2. W przypadku zakończenia testów związanych

z daną grupą konfliktów dalsze przeszukiwanie należy rozpocząć od pierwszego nie testowanego punktu.

7.3. Rozwiązywanie grup konfliktów

Konflikty należy rozwiązywać wewnątrz zidentyfikowanych grup. Sam proces rozwiązywania może przebiegać różnie, w zależności od liczby oraz rodzajów konfliktów zawartych w grupie. Jednak równie ważne, jak ustalenie sposobu rozwiązania danej grupy konfliktów, jest kolejność ich przetwarzania. Podobnie jak w przypadku obiektów oraz wierzchołków łamanych należy ustalić hierarchię grup konfliktów, a następnie rozwiązywać grupy w kolejności wynikającej z ich hierarchii.

Spostrzeżenie to jest o tyle ważne, że może zdarzyć się, iż np. jeden z wierzchołków łamanej, który znajduje się w konflikcie, jest punktem ograniczającym innego skonfliktowanego wierzchołka. Jednak lokalna zmiana topologii wewnętrznej łamanej może zaburzyć tę relację: wierzchołki mogą znaleźć się w konflikcie lub też znaleźć się w odległości większej, nie powodującej powstania zależności ograniczającej.

Jako rozwiązanie tego problemu przyjęto dodatkowe warunki testujące aktywność ograniczeń. Ograniczenie będzie aktywne (a więc będzie brane pod uwagę w procesie rozwiązania konfliktów) jedynie w przypadku, gdy element ograniczający będzie stał wyżej w hierarchii niż element ograniczany oraz nie będą się one znajdować w tej samej grupie konfliktów. Ograniczenia stanowione przez elementy nieskonfliktowane przyjęto jako zawsze aktywne.

Ostatecznie przyjęta hierarchia grup konfliktów wynika z hierarchii elementów skonfliktowanych. To znaczy, że najwyżej w hierarchii znajduje się ta grupa, w której zawiera się obiekt skonfliktowany znajdujący się na najwyższym poziomie hierarchii obiektów. W efekcie proces rozwiązywania grup konfliktów ma charakter sekwencyjny, rozpoczynając od grupy znajdującej się najwyżej w hierarchii.

7.3.1. Typy grup konfliktów

Jak już wspomniano, sposób rozwiązania grupy konfliktów zależeć będzie od jej wewnętrznej struktury, a więc liczby i typów konfliktów, liczby ograniczeń oraz komplikacji

związków zachodzących między tymi elementami. Na tej podstawie grupy konfliktów można sklasyfikować jako:

- proste grupy konfliktów – grupy zawierające konflikty jednakowych typów (*punkt – punkt* lub *punkt – linia*), bez ograniczeń,
- złożone grupy konfliktów – grupy zawierające różne typy konfliktów lub oprócz konfliktów zawierające także ograniczenia.

Założono, iż *samoprzecięcia* linii rozwiązywane będą zgodnie ze sposobem zaproponowanym przez Wu i Marquez (2003), a więc przez wstępny podział upraszczanej łamanej na fragmenty gwiazdoksztaltne (por rozdz. 3.3).

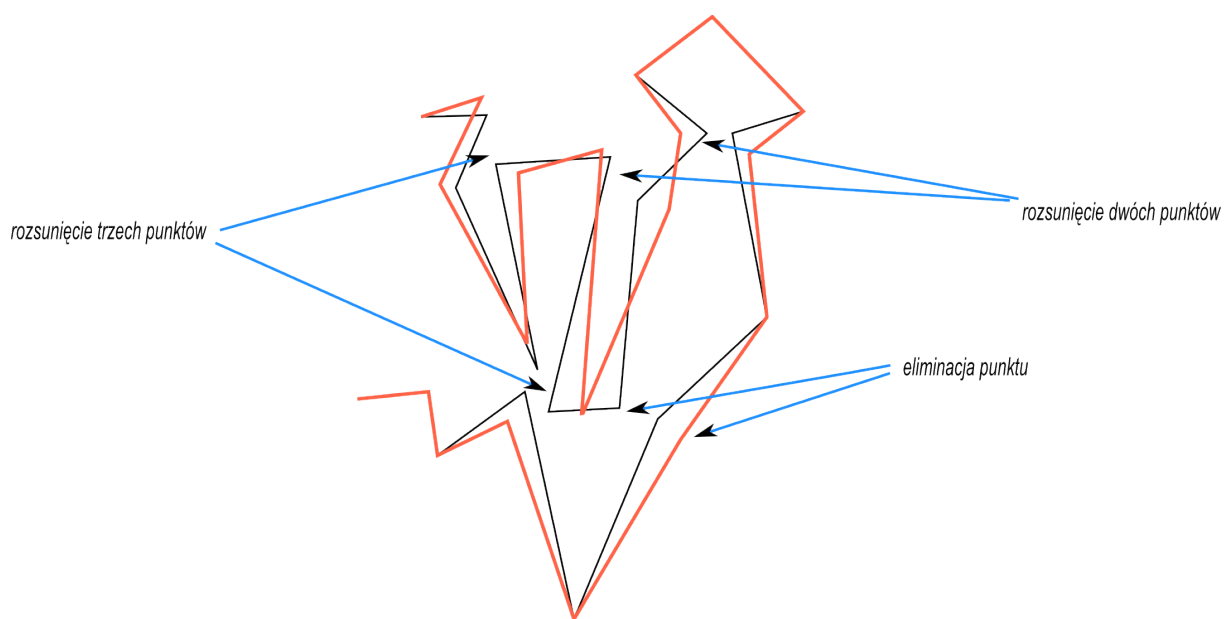
Szczegółowe algorytmy rozwiązywania każdego z typów grup konfliktów mogą się różnić. Jednak istnieją ogólne zasady, którymi należy się kierować. Po pierwsze, należy sprawdzić, czy możliwe jest rozwiązanie wszystkich konfliktów grupy na drodze zmiany położenia skonfliktowanych elementów. Jeśli nie, należy zdecydować, które konflikty należy rozwiązać przez usunięcie z rysunku mapy jednego z elementów. Pamiętać tutaj należy o usuwaniu elementów zgodnie z ich hierarchią w kierunku ku jej dołowi (por. rozdz. 5.2.2 oraz 7.2). W ogólności etap ten można określić jako badanie istnienia dopuszczalnych położenia poszczególnych elementów grupy konfliktów.

W momencie kiedy w grupie konfliktów pozostają już tylko te konflikty, dla których stwierdzono istnienie rozwiązania przez zmianę położenia ich elementów, można przystąpić do określenia warunków, które należy spełnić, aby rozwiązanie konfliktów było prawidłowe. Zmiana położenia każdego ze skonfliktowanych elementów jest uwarunkowana topologią oraz wielkością bufora rozpoznawalności dla skali docelowej. W szczególności:

- Po usunięciu konfliktu nie może pojawić się niespójność topologiczna, a więc nie wolno dopuścić do zmiany kolejności łączenia wierzchołków łamanej, do powstania przecięć między odcinkami łamanej, do zmiany wzajemnego położenia wierzchołków, ich sąsiedztwa itp.
- Przesuwać punkt można tylko wewnątrz jego bufora rozpoznawalności, a więc wewnątrz koła o promieniu $e_f / 2$. Punkty wewnątrz tego koła są wzajemnie nierozpoznawalne, a więc taka zmiana położenia nie będzie znacząca ze względu na wizualizację danych w zadanej skali.

- Odległości między wszystkimi obiektami (w przypadku łamanej – punktami oraz między punktami a odcinkami) muszą być większe bądź równe wartości e_f . Jest to warunek wystarczający, aby konflikt między tymi elementami nie został stwierdzony.

Rysunek 7.5 przedstawia łamaną z rys. 7.1a po rozwiązaniu grup konfliktów (zaznaczonych na rys. 7.2). Kolorem czarnym oznaczono łamaną sprzed, a pomarańczowym po rozwiązaniu grup konfliktów.

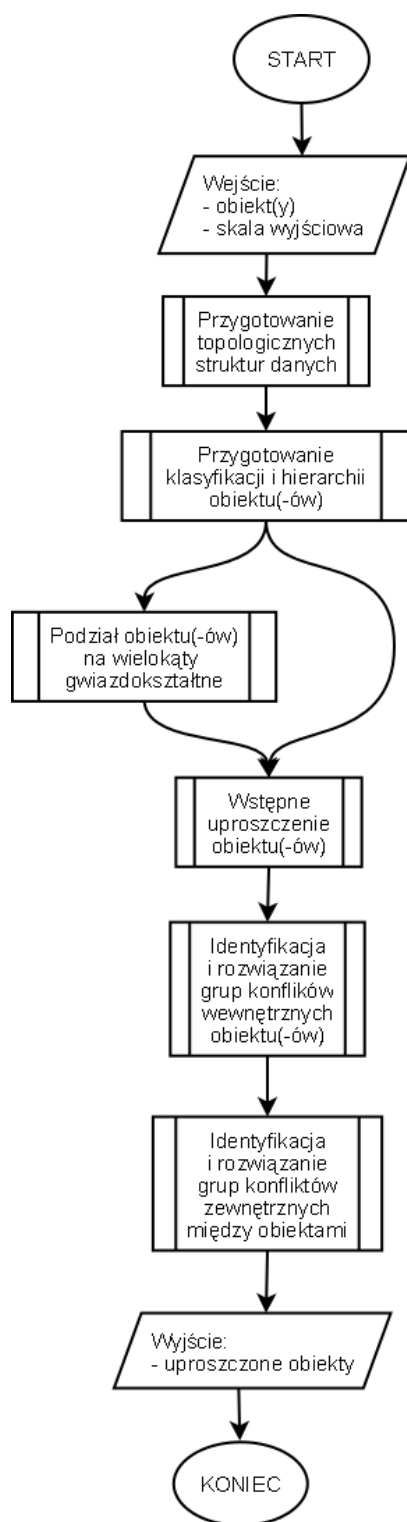


Rys. 7.5. Rozwiązanie grup konfliktów

7.4. Ogólny algorytm rozwiązywania konfliktów graficznych

W wyniku przeprowadzonych badań oraz na podstawie wyżej przedstawionych założeń i warunków zbudowano ogólny algorytm rozwiązywania konfliktów graficznych. Wiele elementów szczegółowych rozwiązań wynikać będzie z przyjętego sposobu cyfrowego zapisu obiektów mapy oraz stosowanych algorytmów upraszczania kształtu. W badaniach założono i testowano zapis w formie wektorowego, topologicznego modelu danych, w którym linie prezentowane są jako łamane, których kształt upraszczany będzie przy pomocy metody Chrobaka.

Ogólną sekwencję kroków związanych z procesem upraszczania powiązany z rozwiązywaniem wewnętrznych i zewnętrznych konfliktów graficznych przedstawia rys. 7.6.



Rys. 7.6. Ogólny schemat algorytmu upraszczania kształtu obiektów

Pierwszym problemem związanym z procesem generalizacji kartograficznej jest przyjęcie odpowiedniego, topologicznego modelu danych, a w konsekwencji odpowiednich struktur danych wraz z mechanizmami obsługującymi topologię obiektów (por. rozdz. 5.3). Struktury danych powinny również zapewniać możliwość zapisania stworzonej klasyfikacji oraz hierarchii obiektów (oraz ich elementów składowych, por. rozdz. 5.1 i 5.2).

Mając odpowiednio zapisane dane wejściowe można przystąpić do przeprowadzania procesu generalizacji do określonej skali docelowej. W szczególności będzie to upraszczanie kształtu obiektów mapy. Po wstępnym uproszczeniu – przefiltrowaniu obiektów oraz ich części ze względu na ich rozpoznawalność w skali docelowej (np. przy pomocy metody Chrobaka, por. rozdz. 1.1.4.1 oraz 6.1) – przystąpić można do testów związanych z badaniem występowania konfliktów graficznych oraz, w przypadku ich wystąpienia, do rozwiązania stwierdzonych niespójności.

Proponowane techniki rozwiązania konfliktów związane z jednoznacznym określeniem bufora rozpoznawalności dla danej skali docelowej (por. rozdz. 6) służą rozwiązaniu konfliktów typu *punkt – punkt* oraz *punkt – linia*. Założono, iż przypadek *samoprzecięć* uproszczonych linii rozwiązywany będzie w drodze podziału łamanej na fragmenty gwiazdkształtne, które dalej będą upraszczane oddzielnie.

Tak więc po wstępnym uproszczeniu kształtu obiektu można przystąpić do identyfikacji oraz rozwiązania rozpoznanych grup konfliktów. Proces ten przeprowadzić należy dla każdego z obiektów oddzielnie. W przypadku bardziej skomplikowanych grup konfliktów może okazać się konieczne zastosowanie więcej niż jednej iteracji tego procesu, aż do chwili uzyskania wyniku wolnego od konfliktów.

Dopiero po wyczyszczeniu konfliktów wewnętrznych można przystąpić do badania i usuwania konfliktów zewnętrznych, które mogą pojawić się w relacjach niezależnych obiektów, należących do tych samych, bądź oddzielnych warstw tematycznych. Mechanizmy związane z konfliktami zewnętrznymi są analogiczne do odnoszących się do konfliktów wewnętrznych. W przypadku konfliktów zewnętrznych należy jednak dodatkowo zapewnić takie ich przetwarzanie, aby nie powodować powstania nowych konfliktów wewnętrznych. Konieczne jest również zapewnienie możliwości interakcji z redaktorem, aby zapewnić rozwiązanie problemów, których automatyzacja nie jest możliwa (np. nierozwiązywalnych

konfliktów między obiektami należącymi do różnych klas obiektów, w przypadku których należy podjąć decyzję co do ich ważności, związaną z przeznaczeniem mapy, por. rozdz. 5.1.1).

7.4.1. Analiza dokładności metody

W procesie upraszczania linii miarą dokładności jest rozpoznawalność rysunku na opracowywanej mapie, określona przez jej średni błąd długości. W metodzie Chrobaka (1999) stwierdzono, iż linię po upraszczaniu określają punkty linii pierwotnej o znanej dokładności. Na mapie o treści powstałej z danych po generalizacji prezentowane punkty stałe (pozostające) obiektów mają średnie błędy obiektów odpowiadające nowej, a nie źródłowej mapie. Błędy te określają miarę dopuszczalnego przybliżenia prezentowanych na mapie obiektów po uproszczeniu. Znając dokładność linii przed upraszczaniem i najkrótsze odległości do punktów odrzucanych (przy odwzorowaniu jednoznaczny) od pozostających, można obliczyć błędy pozorne procesu. Średni błąd procesu upraszczania linii m_{0u} ma postać (Chrobak 1999):

$$m_{0u} = \pm \sqrt{\frac{\sum ss}{n_u - 1}} \quad (7.1)$$

gdzie: s – błąd pozorny, tj. najkrótsza możliwa długość między punktem pozostającym a odrzucanym,
 n_u – liczba punktów odrzuconych w procesie.

Obliczając dokładność danych na mapie, której rysunek powstaje w wyniku upraszczania połączonego z rozwiązywaniem konfliktów graficznych, należy również uwzględnić wpływ przesunięcia punktów z położenia źródłowego (co jest jednym ze sposobów rozwiązywania konfliktów). Powstały w ten sposób średni błąd wynikający ze zmiany położenia punktów na mapie m_{0p} obliczyć można ze wzoru:

$$m_{0p} = \pm \sqrt{\frac{\sum dd}{n_p - 1}} \quad (7.2)$$

gdzie: d – wartość odsunięcia punktu pozostałego w procesie od położenia źródłowego,

n_p – liczba punktów pozostałych w procesie.

Uwzględniając powyższe, błąd długości linii na mapie opracowywanej, znany z metody Chrobaka (1999), wyliczyć można ze wzoru:

$$m_l^2 = m_{0l}^2 + m_{0u}^2 + m_{0p}^2 \quad (7.3)$$

gdzie: m_{0l} – błąd długości danych źródłowych, określony w instrukcji K-2 GUGiK.

7.4.2. Ogólna charakterystyka metody

Proponowana metoda wykrywania i rozwiązywania konfliktów graficznych jest metodą deterministyczną, pod warunkiem zastosowania jednoznacznych, nie randomizowanych procedur szczegółowego przetwarzania poszczególnych typów grup konfliktów. W praktycznej implementacji algorytmów rozwiązujących problem konfliktów wewnętrznych łamanej (por. rozdz. 8.1) zastosowano np. zestaw reguł typu „JEŚLI – TO”, dla każdego ze zdefiniowanych typów grup konfliktów. Podejście takie oznacza pełną powtarzalność wyników, zależną jedynie od skali mapy, dla której przeprowadzana jest generalizacja.

Jest to również metoda obiektywna, ponieważ jej podstawowy parametr – wielkość bufora rozpoznawalności – zdefiniowany jest jednoznacznie i zależy jedynie od przyjętej skali mapy wynikowej oraz grubości linii rysunku mapy (por. rozdz. 6.1). Podejście to jest rozszerzeniem znanego z obiektywnej metody upraszczania Chrobaka pojęcia rozpoznawalności rysunku mapy.

Omawiana metoda w dużej mierze automatyzuje proces rozwiązywania konfliktów graficznych, nie pozbawiając jednak redaktora kontroli nad jego przebiegiem, zwłaszcza w aspekcie jakościowego rozróżnienia ważności elementów treści mapy. Mianowicie decyzja związana z przeznaczeniem mapy a dotycząca problemów pojawiających się na styku rozłącznych klas obiektów (relacji między nimi) powinna pozostać w gestii redaktora czuwającego nad przebiegiem generalizacji, nie naruszając w ten sposób unikalnego, artystycznego charakteru procesu. Metoda ta ma na celu jedynie usprawnienie mechanicznych działań, związanych z ilościowym charakterem informacji znajdującej się na mapie.

Chociaż proponowana metoda oparta jest po części na konkretnej metodzie upraszczania (obiektywnej metodzie Chrobaka), to jej założenia oraz planowana sekwencja koniecznych procedur czy też reguł są na tyle uniwersalne, że możliwe jest jej adaptowanie również dla innych szczegółowych algorytmów stosowanych w automatyzacji procesu generalizacji kartograficznej.

Tak jak inne procedury związane z problemem generalizacji kartograficznej, metoda ta wymaga zaprojektowania odpowiedniego modelu danych, który w szczególności byłby modelem topologicznym oraz wspierającym klasyfikację i hierarchizację obiektów mapy oraz elementów budujących te obiekty (jak np. wierzchołków tworzących łamane, stanowiące granice obiektów).

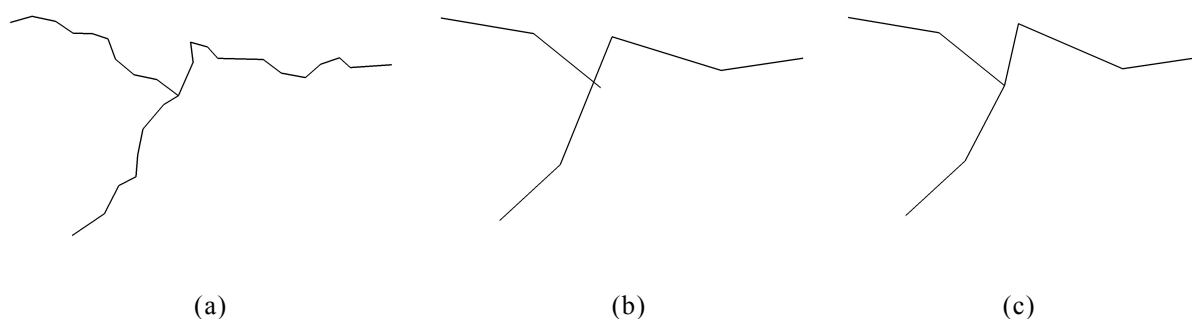
Należy również zaznaczyć, iż przeznaczeniem metody identyfikacji i usuwania konfliktów graficznych jest generowanie chwilowego rysunku mapy (dla potrzeb wizualizacji) w skali docelowej. Metoda ta w żaden sposób nie ingeruje w dane źródłowe, zapisane w referencyjnej bazie danych. Podstawowym celem metody jest czytelność opracowywanej mapy, definiowana przez wzajemną rozpoznawalność jej obiektów.

7.5. Wpływ wyboru punktów stałych procesu upraszczania na rozwiązywanie konfliktów

Niezmiennikami przekształcenia nazywa się cechy, które w wyniku przeprowadzenia tego przekształcenia nie ulegają zmianie. W przypadku przekształcenia, jakim jest upraszczanie kształtu łamanej związane ze zmianą skali jej prezentacji, niezmiennikami mogą być wierzchołki łamanej (punkty), które w wyniku uproszczenia nie zmieniają swojego położenia. Tak rozumiane niezmienniki upraszczania można nazwać *punktami stałymi procesu*.

Proces rozwiązywania konfliktów graficznych wymaga określenia hierarchii elementów mapy oraz części tych elementów, np. punktów wierzchołkowych łamanych. Niezmienniki procesu upraszczania powinny znaleźć się na jak najwyższej pozycji w hierarchii. Ponieważ nie zmieniają one w wyniku przeprowadzenia procesu swojego położenia, powinny stanowić odniesienie dla innych punktów, a tym samym stanowić zasadnicze ograniczenie dla rozwiązania konfliktów.

Im mniejsza jest liczba punktów stałych procesu, tym mniej ograniczeń nałożonych zostaje na pozostałe punkty wierzchołkowe łamanej. Co za tym idzie większe są możliwości rozwiązania konfliktów. Z kolei określenie odpowiedniej liczby punktów stałych jest kluczowe dla zachowania spójności topologicznej rysunku mapy. Na przykład zezwolenie procesowi rozwiązywania konfliktów na zmianę położenia punktów węzłowych sieci cieków wodnych może skutkować powstaniem niespójności topologicznych tej sieci (rys. 7.7b). Ustalenie położenia takich węzłów wpłynie na topologiczną poprawność uzyskanych wyników (rys. 7.7c).



Rys. 7.7. Wpływ ustalania niezmienników na proces upraszczania i rozwiązywania konfliktów

Niezmienniki przekształcenia mogą więc pełnić rolę elementów łączących niezależne przekształcenia poszczególnych elementów w jeden spójny proces.

Mając zadane skale wyjściowe procesu upraszczania można zidentyfikować klasy i superklasy obiektów, które znajdują się na mapie w danej skali wyjściowej. Ustalając żądane skale wyjściowe w porządku malejącym można więc, idąc od skali największej do wejściowej, odnaleźć te obiekty, które będą znajdować się na każdej z map danego przedziału skal. Można również wyróżnić te obiekty (bądź ich części), które powinny zostać punktami stałymi mapy w danej skali, ale nie znajdują się już na mapach w skalach mniejszych bądź większych. W ten sposób niezmienniki procesu można podzielić na dwie grupy: stale niezmiennie w zadanym przedziale skal oraz niezmiennie „ulotnie”. Taki podział może ułatwić rozwiązywanie ewentualnych konfliktów powstałych między niezmiennikami należącymi do takich dwóch zbiorów.

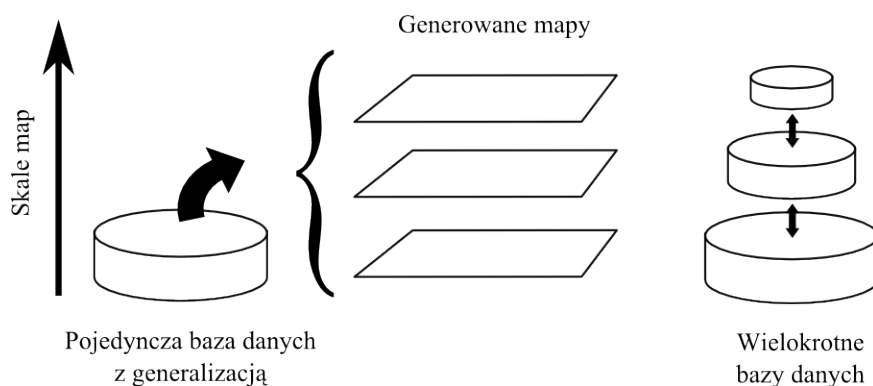
7.6. Miejsce algorytmów i reguł odpowiedzialnych za wykrywanie konfliktów w systemach GIS

Systemy Informacji Geograficznej (GIS) są narzędziami, które służą pozyskiwaniu i przetwarzaniu danych dla celów redakcji map. Mają one równocześnie wiele innych zadań, takich jak zapewnienie narzędzi do analiz przestrzennych oraz symulacji, szeroko wykorzystywanych m. in. w administracji publicznej, w przedsiębiorstwach zarządzających transportem i innych. Na system GIS składają się dane (zapisane w odpowiednio zaprojektowanej bazie danych) oraz mechanizmy odpowiedzialne za ich manipulację.

7.6.1. Bazy danych typu MRDB

W związku z ciągle rosnącą ilością danych przestrzennych, jednym z głównych zadań stawianych przed systemami GIS, jak twierdzą Rigaux i in. (2002), jest efektywne zarządzanie olbrzymimi bazami danych, w których zapisane są specyficzne, złożone dane. Tradycyjne relacyjne systemy zarządzania bazami danych (DBMS – ang. *Data Base Management System*), zarządzają dużymi, ale prostymi zbiorami danych, co okazuje się być niewystarczające w przypadku danych geograficznych, w szczególności z powodu ich przestrzennego charakteru.

Bazodanowe reprezentacje rzeczywistych obiektów często muszą być wykorzystywane i przetwarzane na różnych poziomach dokładności i uogólnienia. Może być to spowodowane różnicami w pobieraniu danych, definicjach semantycznych, czy też różnymi celami opracowywania danych (np. przygotowanie map tematycznych w różnych skalach). Istnieją dwa główne podejścia do rozwiązania tego problemu: przechowywanie danych w jednej bazie danych, na najniższym poziomie szczegółowości, bądź przechowywanie ich w kilku różnych bazach, z których każda przygotowana jest dla innego poziomu szczegółowości danych (rys. 7.8). Pierwszy przypadek jest znacznie bardziej ekonomiczny i zakłada istnienie mechanizmów generalizacji umożliwiających przetworzenie danych zapisanych w bazie do wszystkich innych poziomów szczegółowości.



Rys. 7.8. Generowanie map w różnych skalach z pojedynczej oraz z wielu baz danych

Typem baz danych wywodzącym się właśnie z potrzeby przechowywania danych geograficznych o różnym stopniu szczegółowości w jednej bazie są Wielorozdzielcze/Wieloreprezentacyjne Bazy Danych (ang. *Multiresolution/Multirepresentation Data Base*, MRDB). Przyjęcie takiej koncepcji wymaga dookreślenia kilku zagadnień, m. in. (Żukowska 2007a):

- wybranie modelu danych (wspierającego spójność, aktualizacje i odpowiednie przetwarzanie danych),
- określenie klas obiektów,
- określenie związków między klasami obiektów,
- określenie logiki przechowywania danych na różnych poziomach szczegółowości (wszystkie poziomy w jednym obiekcie vs obiekty na pojedynczych, powiązanych poziomach),
- określenie wymaganej „odległości” poziomów szczegółowości danych w bazie,
- określenie skal map, które mogą być generowane z bazy danych,
- ustalenie mechanizmów generalizacji danych w bazie oraz generalizacji kartograficznej do wszystkich wymaganych skal map wynikowych.

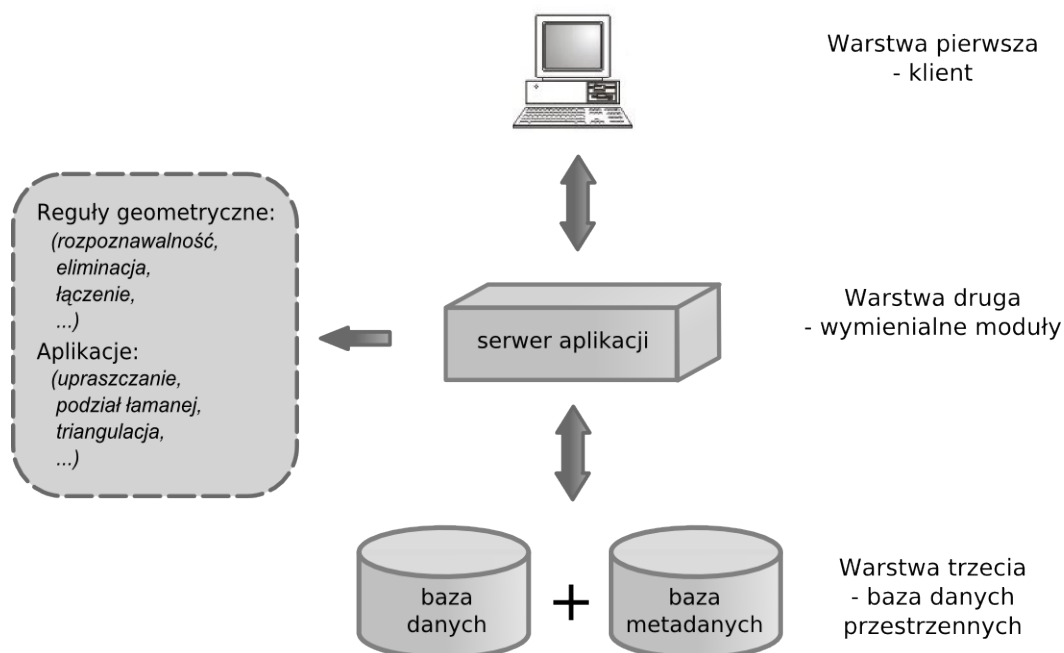
Ostatni punkt ściśle wiąże się z problemem konfliktów powstających w procesie generalizacji, w tym generalizacji kartograficznej. Mianowicie, jak już wspomniano, wybór bazy danych typu MRDB dla systemów GIS wiąże się ściśle z istnieniem mechanizmów umożliwiających generowanie danych na wszystkich wymaganych poziomach szczegółowości (uogólnienia i dokładności przestrzennej). To z kolei pociąga za sobą konieczność automatyzacji procedur związanych z wykrywaniem, a następnie rozwiązaniem

konfliktów, które mogą pojawić się w trakcie generowania danych na żądanym poziomie uogólnienia.

W przypadku automatycznej generalizacji kartograficznej, w szczególności uogólnienia kształtu obiektów zapisanych w bazie danych, możliwe jest zastosowanie rozwiązań proponowanych w niniejszej pracy. Są to procedury deterministyczne oraz obiektywne, w dużej mierze rozwiązujące problem konfliktów graficznych w sposób automatyczny. Wymagają one jednak implementacji odpowiedniego, topologicznego modelu danych oraz zapewnienia pełnej klasyfikacji i hierarchizacji obiektów w bazie danych.

7.6.2. Trójwarstwowa architektura systemu GIS

Powszechnie przyjmuje się (Chrobak i in. 2007, Luaces i in. 2004b, Rigaux i in. 2002), iż architektura systemu informatycznego, w ogólnym przypadku, powinna składać się z trzech rozdzielnych warstw (rys. 7.9): warstwy do wizualizacji, warstwy aplikacyjnej, oraz warstwy danych.



Rys. 7.9. Trójwarstwowa architektura GIS
(Źródło: (Żukowska 2007b))

Zaletą tego podejścia jest rozdzielenie funkcjonalności systemu na trzy niezależne moduły, odpowiedzialne za odrębne grupy zadań. Umożliwia to modyfikowanie każdej

z warstw oddzielnie, z niewielkim tylko wpływem na funkcjonowanie pozostałych. Warstwy pierwsza i druga powinny mieć charakter bezkontekstowy, zaś warstwa środkowa (aplikacyjna) powinna zawierać reguły przetwarzania danych.

Analogicznie tworzone są systemy GIS. Jednak specjalny charakter przechowywanych danych geograficznych narzuca na tę podstawową architekturę specjalne wymagania funkcjonalne, w szczególności na koncepcyjne i logiczne modele danych, struktury danych, metody dostępu, techniki analiz oraz procedury wizualizacyjne (Luaces i in. 2004b). Architektura ta może również sprostać wymaganiom stawianym systemowi umożliwiającemu generowanie z bazy danych geograficznych map w dowolnym przedziale skalowym, pod pewnymi jednak warunkami (Żukowska 2007b):

1. Pierwsza warstwa systemu (prezentacyjna) powinna umożliwiać określenie zakresu tematycznego prezentowanych danych, jak również zasięgu opracowywanego obszaru i skali mapy wyjściowej.
2. Warstwa druga (aplikacyjna) odpowiada za implementację reguł i algorytmów umożliwiających przeprowadzenie generalizacji, w szczególności generalizacji kartograficznej wolnej od konfliktów graficznych.
3. Trzecia warstwa to baza danych geograficznych, np. o charakterze źródłowej bazy typu MRDB. Baza ta powinna zawierać podstawowe elementy umożliwiające np. zbudowanie topologii obiektów geograficznych czy też ich klasyfikacji i hierarchizacji w ramach klas.

Tabela 4.1 prezentuje listę reguł oraz algorytmów, związanych z problemem konfliktów graficznych w kartograficznej generalizacji cyfrowej. Należy jednak pamiętać, iż wybór metod eliminacji konfliktów może się różnić, w zależności od wyboru modelu danych bądź też innych algorytmów: konkretny algorytm upraszczania kształtu (np. podstawowa dla niniejszej pracy obiektywna metoda Chrobaka) wymusza stosowanie pewnych rozwiązań, które w innym przypadku nie będą skuteczne. Lista zawarta w tabeli 4.1 została określona jako minimalna dla potrzeb upraszczania kształtów obiektów metodą Chrobaka (Żukowska 2005, Chrobak i in. 2007).

Tabela 7.1. Przykłady reguł i algorytmów związanych z konfliktami graficznymi

Reguła / algorytm	Opis
Reguła trójkąta elementarnego	Metoda Chrobaka; zastosowanie: rozpoznawalność elementów.
Reguła bufora rozpoznawalności	Okrąg o określonym promieniu; zastosowanie: wzajemna rozpoznawalność elementów, identyfikacja konfliktów.
Reguły eliminacji	Zastosowanie: identyfikacja i usunięcie konfliktów poprzez eliminację obiektów lub ich części.
Reguły ekscentru	Zastosowanie: identyfikacja i usunięcie konfliktów poprzez przesunięcie obiektów lub ich części.
Triangulacja Delaunay (lub inne grafy bliskości)	Zastosowanie: definiowanie bliskości obiektów.
Hierarchia wierzchołków łamanych, Hierarchia obiektów	Zastosowanie: umożliwiają określenie istotności obiektów lub ich części, konieczne dla reguł eliminacji.
Podział łamanej na segmenty gwiazdkształtne	Zastosowanie: eliminacja samoprzecięć łamanych.

8. ZASTOSOWANIE METODY IDENTYFIKACJI I ELIMINACJI KONFLIKTÓW GRAFICZNYCH W PROCESIE AUTOMATYCZNEGO UPRASZCZANIA OBIEKTÓW

Wykrywanie oraz usuwanie konfliktów graficznych wewnętrznych, powstających w procesie upraszczania geometrii pojedynczych obiektów mapy, stanowi pierwszy etap na drodze do całkowitego rozwiązania konfliktów graficznych generalizowanej treści mapy. W przypadku rozdzielenia rozwiązywania konfliktów wewnętrznych i zewnętrznych, proces przetwarzania konfliktów wewnętrznych powinien poprzedzać rozwiązywanie konfliktów powstałych pomiędzy niezależnymi obiektami, ponieważ takie podejście upraszcza przetwarzanie konfliktów zewnętrznych. Co więcej, dla procesu rozwiązywania konfliktów wewnętrznych, informacja dotycząca relacji danego obiektu z innymi jest niewykorzystywaną informacją nadmiarową. Można rozważyć rozwiązywanie obu typów konfliktów równocześnie, jednak ze względów praktycznych oraz metodycznych zastosowano rozdzielenie obu procesów.

Procesy rozwiązywania konfliktów wewnętrznych i zewnętrznych są w zasadzie do siebie zbliżone. Oba wymagają dostarczenia informacji na temat topologii obiektów (wewnętrznej bądź stanowiącej relacje między obiektami) jak również ich hierarchii (wewnętrznej hierarchii wierzchołków obiektu lub klasyfikacji i hierarchii obiektów). W rozdziale tym bardziej szczegółowo zostaną pokazane problemy związane z tworzeniem algorytmów związanych z przetwarzaniem konfliktów wewnętrznych, a następnie zarysowana zostanie możliwość zastosowania metod związanych z przetwarzaniem konfliktów zewnętrznych dla potrzeb innych niż sama generalizacja kartograficzna, tj. dla przetwarzania zdjęć teledetekcyjnych.

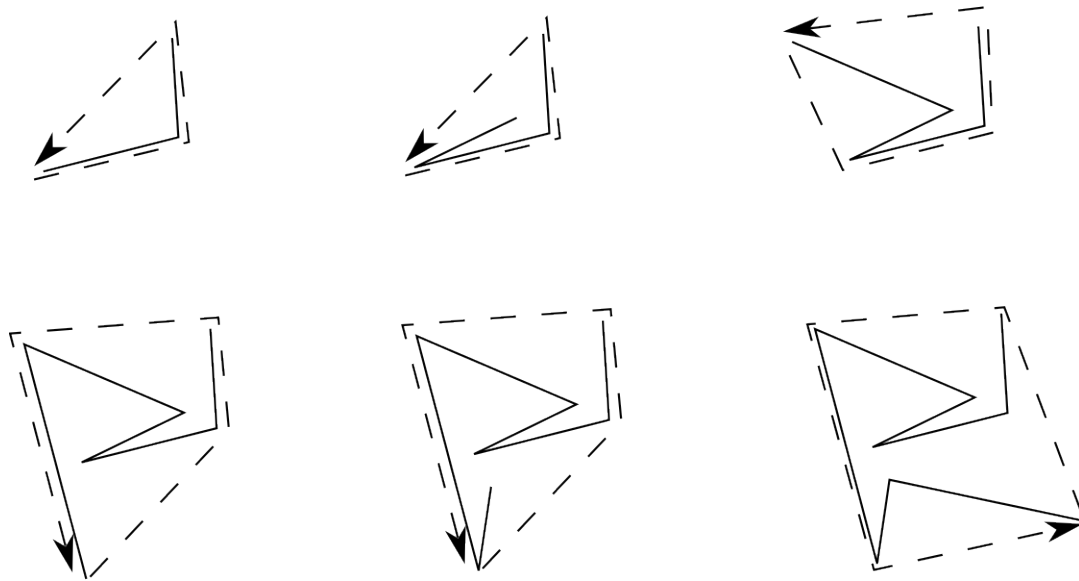
8.1. Wykrywanie i eliminacja konfliktów wewnętrznych powstałych w procesie upraszczania geometrii pojedynczych obiektów

W ramach dysertacji stworzono program testujący rozwiązywanie konfliktów wewnętrznych. Obiektową implementację (w języku C++, z arytmetyką zmiennoprzecinkową) metody identyfikacji i rozwiązywania konfliktów graficznych wewnętrznych oparto na rozwiązaniach (algorytmach i strukturach danych) autorskich bądź znanych z literatury, bez stosowania gotowych, zewnętrznych bibliotek. Podejście to pozwala utrzymać pełniejszą kontrolę nad działaniem procedur, bez uzależniania się od gotowych rozwiązań komercyjnych.

Algorytm rozwiązywania konfliktów graficznych, opracowany przez Autorkę, powstał na drodze stopniowego rozwiązywania („krok po kroku”) określonych problemów. Pierwszy z nich dotyczy zdefiniowania jednoznacznej i obiektywnej miary wystąpienia konfliktów. Jej konstrukcję oparto na pracach Chrobaka (1999) oraz Perkała (1958) i na ich podstawie zdefiniowano bufor rozpoznawalności punktu jako koło o promieniu równym mierze rozpoznawalności boku trójkąta, a więc wielkości e_f .

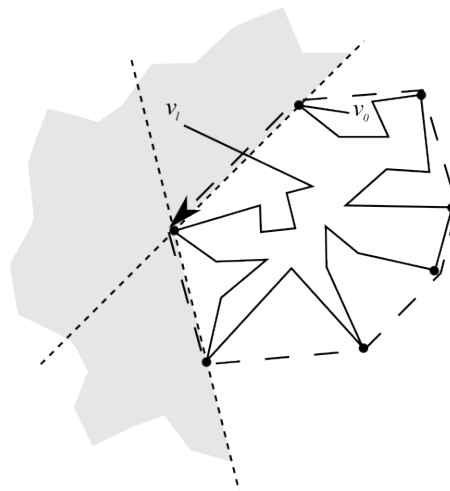
Po drugie, stwierdzono, iż globalna hierarchia wierzchołków łamanej, związana z metodą upraszczania Chrobaka (1999), jest niewystarczająca dla potrzeb rozwiązywania konfliktów wewnętrznych, ponieważ nie rozróżnia ważności wierzchołków w dostatecznym stopniu (por. rozdz. 5.2). Opracowano więc sposób dostarczenia dodatkowej, bardziej lokalnej informacji, którą niesie badanie otoczek wypukłych fragmentów łamanej oddzielanych kolejnymi ekstremami lokalnymi.

W geometrii obliczeniowej stosuje się wiele algorytmów obliczających otoczki wypukłe (ang. *convex hull*) dla zbioru punktów, takich, jak: skan Grahama, marsz Jarvisa czy techniki QUICKHULL (Cormen 2001, Preparata, Shamos 1985). W przypadku obliczania otoczki wypukłej linii łamanej można posłużyć się np. algorytmem Melkmana (1987, za Hershberger, Snoeyink 1992). Algorytm ten działa poprawnie jedynie w przypadku, gdy przetwarzana łamana nie posiada żadnych samoprzecięć, który to warunek jest spełniony przez obiekty kartograficzne.



Rys. 8.1. Sekwencyjne budowanie otoczki wypukłej łamanej

Działanie algorytmu polega na przyrostowym obliczaniu otoczki wypukłej dla wierzchołków V_m do V_j poprzez dodawanie kolejnych wierzchołków do podwójnie zakończonej kolejki (rys. 8.1). Początkowo kolejka zawiera (od końca do początku) V_{m+1} , V_m i V_{m+1} . Aby dodać wierzchołek V_l do kolejki przechowującej otoczkę $CH(V_m \dots V_{l-1})$ należy wykonać co następuje (rys. 8.2): dopóki V_l nie jest na prawo od brzegu otoczki zaczynającego się od początku kolejki, wyciągnąć początkowy wierzchołek z kolejki. I, dopóki V_l nie jest na prawo od brzegu otoczki kończącego się końcem kolejki, usunąć wierzchołek końcowy. Jeśli jakiegokolwiek wierzchołki zostały usunięte to wstawić V_l na początek i koniec kolejki.



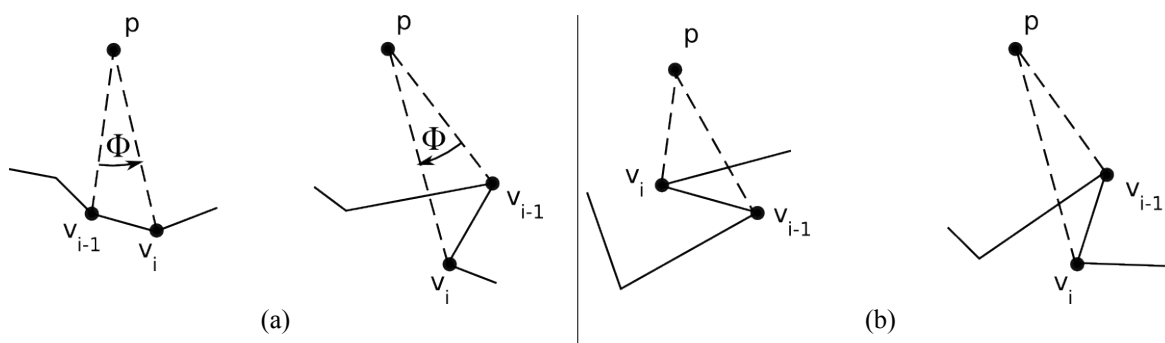
Rys. 8.2. Dodawanie kolejnego wierzchołka do otoczki wypukłej łamanej

W ten sposób algorytm Melkmana oblicza nie tylko żadaną otoczkę wypukłą, ale również wszystkie otoczki pośrednie. Stosując pewną modyfikację tego algorytmu (zapewnienie przechowywania sekwencji wstawień i usuwań wierzchołków z kolejki na stosie historii procesu) można otrzymać algorytm obliczający otoczkę łamanej w sposób przyrostowy.

Łącząc przyrostowy algorytm obliczania otoczek wypukłych łamanych z sekwencją obliczania ekstremów lokalnych kolejnych fragmentów łamanych, jak ma to miejsce w metodzie Chrobaka, można w prosty sposób dokonać rozróżnienia wierzchołków znajdujących się na kolejnych poziomach ich globalnej hierarchii ze względu na przynależność do kolejnych rzędów otoczek wypukłych (por. rozdz. 5.2).

Kolejny krok nad tworzeniem algorytmu rozwiązywania konfliktów wewnętrznych związany był z badaniem możliwości rozwiązania konfliktów różnych typów. Na podstawie literatury związanej z tematem (Wu, Marquez 2003, Saalfeld 1999) stwierdzono, iż problem samoprzecięć linii można rozwiązać na drodze wstępnego podziału uproszczonej łamanej na fragmenty gwiazdkształtne (por. rozdz. 3.3). Bezpośrednio związane z tym problemem jest badanie widoczności wierzchołków wielokąta z danego punktu, znane z literatury związanej z geometrią obliczeniową jako „problem galerii sztuki” (O'Rourke 1987). Wywodzi się on z zagadnienia ustawiania strażników (bądź kamer przemysłowych) pilnujących galerię sztuki tak, aby jak najmniejsza ich liczba zapewniła pokrycie całej obserwowanej powierzchni.

Wariacją tego problemu jest obliczanie, jaką część danego wielokąta widać z określonego punktu. Jednym z algorytmów realizujących tak postawione zadanie jest procedura (Hipke 1996). Polega ona na sekwencyjnym przetwarzaniu wszystkich wierzchołków wielokąta (w kolejności przeciwnej do kierunku ruchu wskazówek zegara) badając ich widoczność z zadanego punktu przy pomocy kilku podstawowych kroków i trybów postępowania. Wynikiem działania procedury jest lista V wierzchołków widocznych z danego punktu (wielokąta widoczności), która kurczy się bądź rozrasta w miarę przetwarzania kolejnych wierzchołków. Przy czym należy zaznaczyć, iż tak definiowany wielokąt widoczności spełnia warunki stawiane wielokątom gwiazdkształtnym (por. rozdz. 3.3).



Rys. 8.3. Ruchy do przodu i wstecz (a) oraz do środka i na zewnątrz (b)

Aktualny stan algorytmu można opisać przy pomocy trzech trybów: normalnego, omijania i zawijania. W trybie normalnym aktualnie przetwarzany wierzchołek p znajduje się wewnątrz uprzednio znalezionej wielokąta widoczności V . W trybach zawijania i omijania p nie jest widoczny i algorytm „przeczekuje”, aż znajdzie się z powrotem w trybie normalnym. Podstawowe obliczenia obejmują obliczanie kąta zakrętu (kąta między odcinkami pv_{i-1} , pv_i): jeśli jest on dodatni, to obecny ruch nazywany jest ruchem do przodu, w przeciwnym wypadku – wstecz (rys. 8.3a). Dodatkowo oblicza się kąt obiegu będący sumą kątów zakrętu. Kroki wstecz dzieli się dodatkowo na kroki do środka (kiedy odcinek $v_{i-1}v_i$ leży pomiędzy odcinkami $v_{i-1}v_{i-2}$ i p) i na zewnątrz (w przeciwnym wypadku, rys. 8.3b).

Badając analogicznie widoczność wierzchołków łamanej (lub jej fragmentów) i ustalając punkt, z którego bada się widoczność jako punkt środkowy odcinka łączącego początek i koniec łamanej (Wu, Marquez 2003) oraz stosując modyfikację opisanego algorytmu, polegającą na zapisywaniu (na stosie) wierzchołków, które nie należą do danego wielokąta widoczności V_i i traktując je jako wyjściowe dla obliczania kolejnych wielokątów widoczności, można uzyskać na wyjściu sekwencyjny podział łamanej w postaci fragmentów gwiazdkształtnych.

W rozwiązywaniu pozostałych typów konfliktów graficznych, a więc *punkt – punkt* oraz *punkt – linia* postanowiono oprzeć się na zmianie położenia lub (w razie braku takiej możliwości) usuwaniu wierzchołków upraszczanej łamanej. Każdy z takich kroków należy ograniczyć warunkiem, iż nie może on tworzyć nowych konfliktów. W przypadku braku możliwości rozwiązania konfliktu na innej drodze niż usuwanie wierzchołka, powodujące powstanie nowego konfliktu, należy zadbać o jego natychmiastowe rozwiązanie, np. przez

zastosowanie kolejnego przesunięcia lub wymuszenie usuwania kolejnych skonfliktowanych wierzchołków lub odcinków.

Następny etap tworzenia algorytmu rozwiązywania konfliktów wewnętrznych polegał na wybraniu struktury oraz algorytmów związanych z budową topologii wierzchołków łamanej. Rozwiązanie tego zagadnienia oparto na czterokrawędziowej strukturze danych QEDS oraz przyrostowym algorytmie triangulacji Delaunaya (Guibas, Stofli 1985, Lischinski 1993, Mostafavi i in. 2003, por. rozdz. 5.3.2.2).

Procedura identyfikacji konfliktów wewnętrznych zakłada wykorzystanie bufora rozpoznawalności o wielkości wynikającej z wybranej skali docelowej oraz przeszukiwanie grafu triangulacji Delaunaya (por. rozdz. 7.1 i 7.2.1). W toku działania procedury rozpoznane konflikty należy wraz z odpowiednimi ograniczeniami łączyć w grupy konfliktów, które w dalszej kolejności należy posortować zgodnie z hierarchią punktów będących w konfliktach (por. rozdz. 7.2).

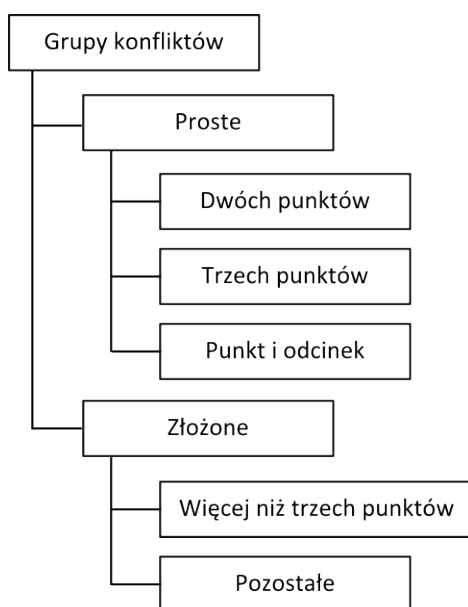
Kolejny etap algorytmu przetwarzającego konflikty wewnętrzne stanowią procedury odpowiedzialne za rozwiązywanie grup konfliktów. Stwierdzono, iż przetwarzanie aktualnej grupy powinno przebiegać w następujący sposób:

1. Uporządkowanie grupy konfliktów, obejmujące m.in. badanie aktywności punktów i odcinków skonfliktowanych lub stanowiących ograniczenia rozwiązywania konfliktów (por. rozdz. 7.3) oraz przypisanie typu grupy konfliktów (por. rozdz. 7.3.1).
2. Rozwiązanie grupy konfliktu zgodnie z procedurami i regułami odpowiednimi dla grupy danego typu.

Po zakończeniu rozwiązywania wszystkich grup konfliktów badano możliwość dodatkowego czyszczenia wynikowego rysunku łamanych z elementów niepożądanych, to znaczy pokrywających się fragmentów odcinków łamanej (mogących powstać przez dosunięcie punktu do odcinka łamanej) oraz uruchomienie drugiej iteracji wyszukiwania i rozwiązywania konfliktów. Zastosowanie drugiej iteracji ma na celu przetestowanie rozwiązania pierwotnego oraz rozwiązanie tych konfliktów, które mogły w pierwszym przebiegu nie zostać rozwiązane.

8.1.1. Reguły rozwiązywania dla poszczególnych typów grup konfliktów

Podstawowym podziałem grup konfliktów jest rozróżnienie typu prostego i złożonego (por. rozdz. 7.3.1). Ze względów praktycznych i obliczeniowych proste grupy konfliktów podzielono na konflikty powstałe przez kolizje dwóch i trzech punktów oraz konflikty typu *punkt – odcinek*, zaś grupy złożone – na konflikty powstałe przez kolizje więcej niż trzech punktów oraz pozostałe (rys. 8.4).



Rys. 8.4. Typu grup konfliktów

W ogólnym przypadku rozwiązanie konfliktu graficznego może nastąpić przez:

- rozsuniecie elementów skonfliktowanych,
- dosunięcie elementów skonfliktowanych,
- eliminację co najmniej jednego ze skonfliktowanych elementów.

Operacje te mogą być realizowane poprzez zastosowanie (lub odpowiednią modyfikację) warunków i równań (3.2) i (3.4), gdzie za wartość tolerancji T (Müller 1990) należy podstawić wielkość bufora rozpoznawalności e_f (Chrobak 1999).

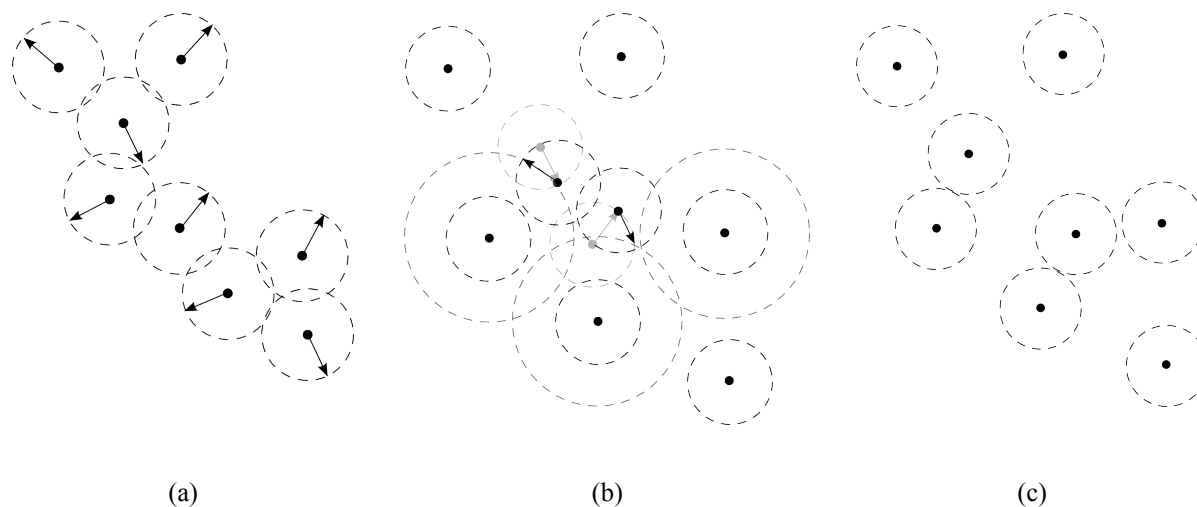
Podstawową regułą stosowaną podczas badania istnienia rozwiązywania konfliktów związane z odległością skonfliktowanych elementów: jeśli jest ona mniejsza niż połowa

wielkości rozpoznawalności dla danej skali docelowej ($e_f/2$), to takiego konfliktu nie można rozwiązać na drodze rozsunięcia jego elementów składowych.

Rozwiązanie prostej grupy konfliktu *punkt – punkt* wymaga zastosowania wyżej wspomnianej reguły istnienia rozwiązania oraz rozsunięcia dwóch punktów na odległość nie powodującą istnienia konfliktu (wielkość bufora rozpoznawalności).

Rozwiązanie prostej grupy konfliktów trzech punktów (przy czym nie jest ważne, czy skonfliktowane są wszystkie punkty ze sobą, czy też parami po dwa) również wymaga zastosowania rozsunięcia punktów. Zmiana położenia punktów polega na obliczeniu środka ich ciężkości i rozsunięciu punktów w kierunkach od środka ciężkości do poszczególnych punktów, z uwzględnieniem podstawowej reguły istnienia rozwiązania konfliktu.

Rozwiązanie złożonej grupy konfliktów więcej niż trzech punktów jest rozszerzeniem powyższej procedury. Mianowicie punkt odsuwa się od położenia pierwotnego na odległość wynikającą z bufora rozpoznawalności w kierunku określanym przez to położenie oraz środek ciężkości wszystkich punktów z nim skonfliktowanych (rys. 8.5a).



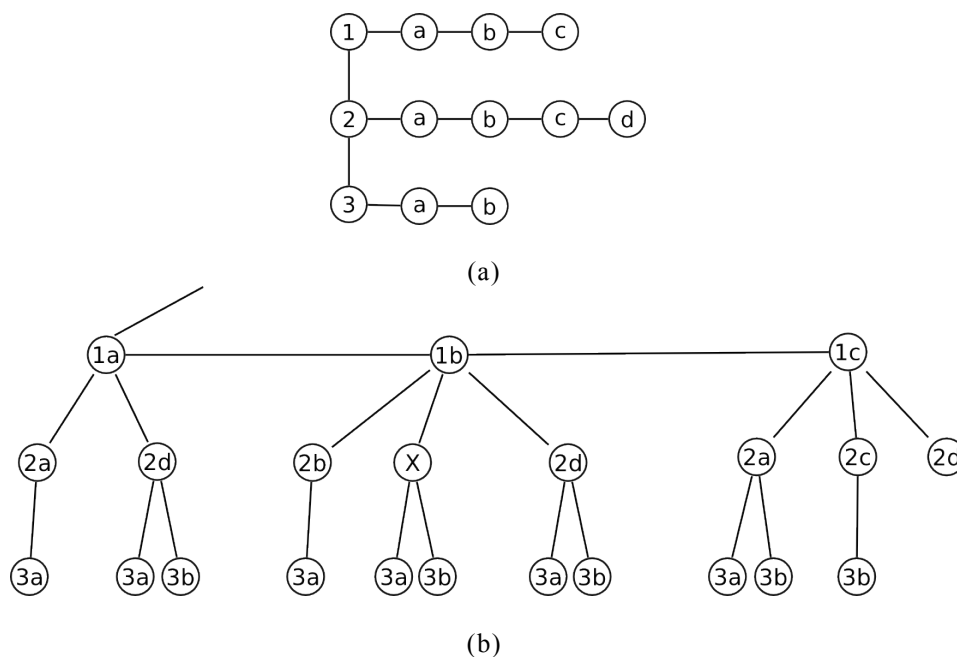
Rys. 8.5. Rozsuniecie wielu punktów

Następnie należy posortować punkty malejąco (pod względem ich poziomu hierarchii) i zbadać dopuszczalność rozwiązania. W przypadku stwierdzenia konfliktu danego punktu z innymi oblicza się jego nową pozycję, traktując punkty z nim skonfliktowane jako ograniczenia procesu (rys. 8.5b, 8.5c). W przypadku braku możliwości znalezienia takiego odsunięcia następuje eliminacja punktu. W ten sposób następuje stopniowe rozwiązanie wszystkich konfliktów grupy.

Rozwiązanie pozostałych złożonych grup konfliktów, a więc grup konfliktów z ograniczeniami lub zawierających więcej niż jeden typ konfliktu prostego, polega na:

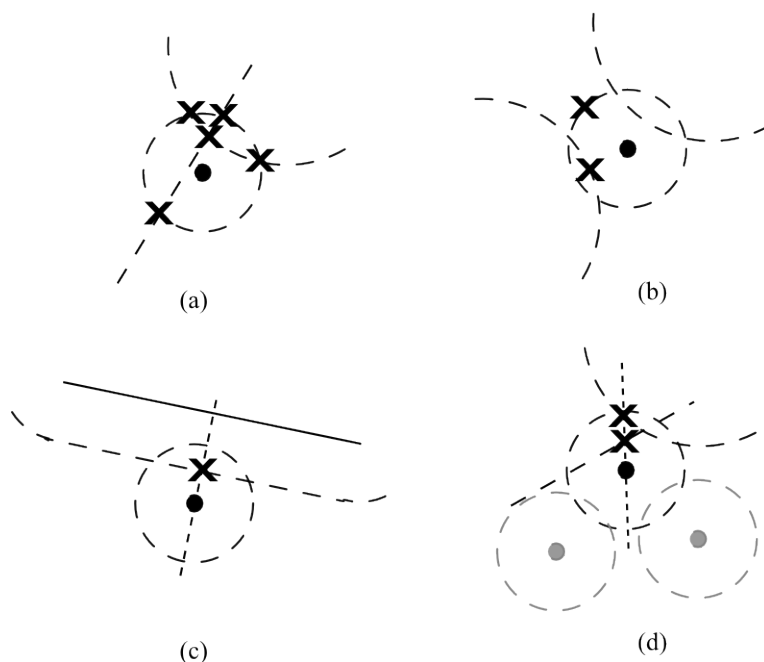
1. Rozdzieleniu punktów i odcinków aktywnych od nieaktywnych (por. rozdz. 7.3).
2. Badaniu przesunięć dopuszczalnych grupy punktów i odcinków aktywnych.
3. Dosuwaniu do odcinków lub usuwaniu z łamanej punktów dla których nie znaleziono dopuszczalnego przesunięcia.
4. Sprawdzeniu i ewentualnych rozwiązaniu konfliktów określonych w punkcie (1) jako nieaktywne, a więc wpasowanie ich w rozwiązanie elementów aktywnych.

Badanie istnienia dopuszczalnych przesunięć wierzchołków łamanej polega na obliczeniu możliwych przesunięć punktu (zapisanych w formie listy połączonej z danym punktem, rys. 8.6a) oraz sprawdzeniu relacji tych przesunięć do innych punktów łamanej (bądź ich możliwych przesunięć, o ile punktu te są elementami przetwarzanej grupy konfliktów). Następnie należy znaleźć najlepszy zbiór przesunięć punktów, a więc taki, który minimalizuje liczbę punktów usuwanych z łamanej. W przypadku istnienia więcej niż jednego rozwiązania o tej samej liczbie pozostawionych punktów, za lepsze przyjmuje się rozwiązanie uwzględniające punkty stojące wyżej w hierarchii. W przypadku braku możliwości takiego rozróżnienia – wybór rozwiązania jest dowolny.



Rys. 8.6. Badanie istnienia dopuszczalnych przesunięć punktów

Zastosowano tu rozwiązanie oparte o budowanie i przeszukiwanie swoistego drzewa rozwiązań dopuszczalnych, w którym każdy poziom gałęzi odpowiada kolejnemu punktowi grupy konfliktów (od punktu najwyższego w hierarchii do najniższego), a węzły danego poziomu zawierają możliwe przesunięcia tego punktu. Gałęzie drzewa sygnalizują zgodność rozwiązań między możliwymi położeniami punktu, idąc w górę drzewa (rys. 8.6b).



Rys. 8.7. Obliczanie możliwych przesunięć punktu

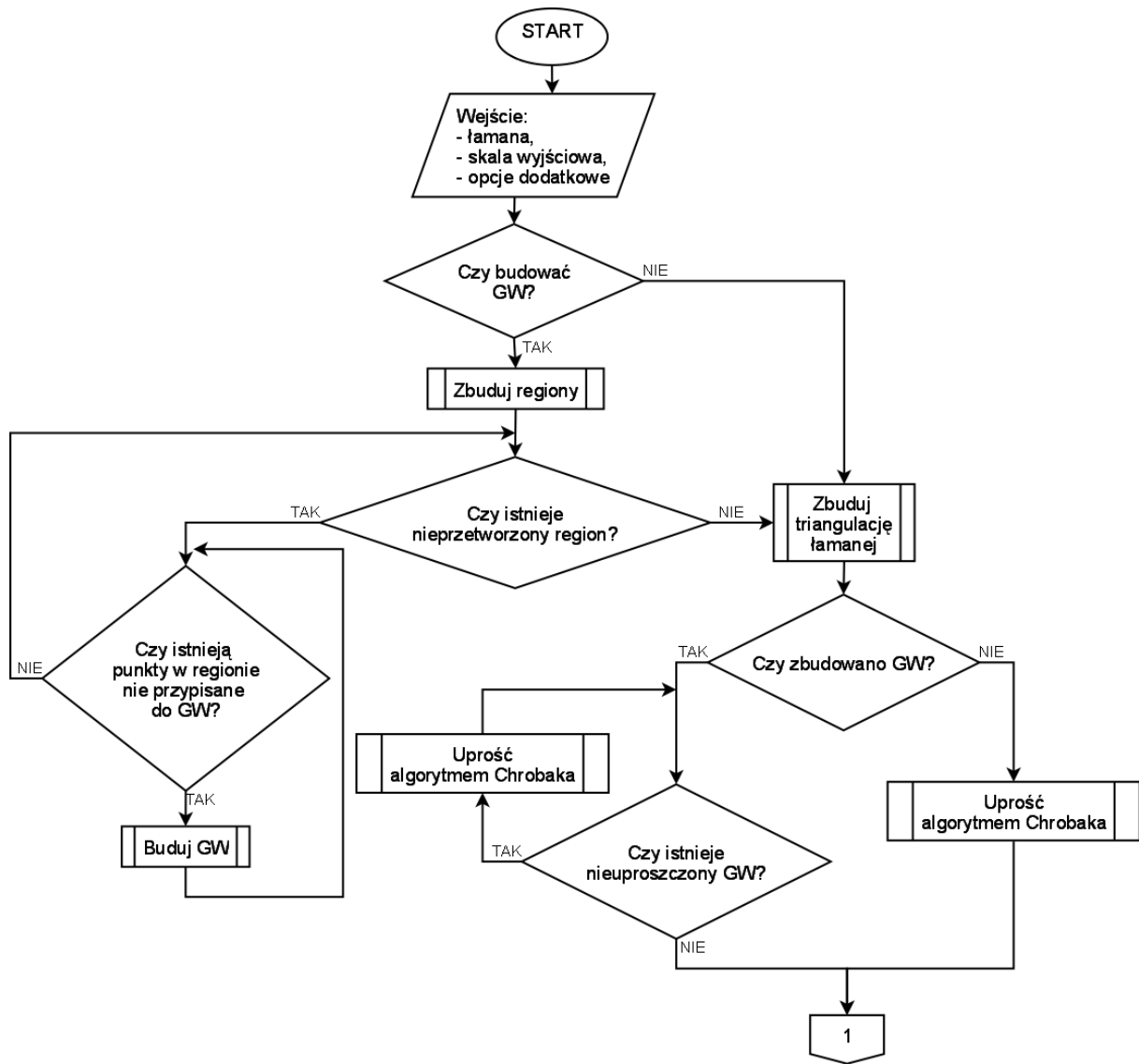
Ponieważ wszystkich możliwych przesunięć punktu wewnątrz jego bufora rozpoznawalności jest nieskończenie wiele, postanowiono ograniczyć ich liczbę do położen określonych przez (rys. 8.7):

- przecięcia bufora rozpoznawalności punktu z buforami rozpoznawalności (podwójnej wielkości) punktów i odcinków ograniczających rozwiązanie (rys. 8.7a),
- punkty przecięcia ograniczeń odcinkowych i punktowych, o ile znajdują się wewnątrz bufora rozpoznawalności punktu (rys. 8.7a),
- punkty znajdujące się na okręgu bufora rozpoznawalności punktu (oraz podwójnych buforów rozpoznawalności punktów ograniczających) pomiędzy punktami przecięć podwójnych buforów rozpoznawalności z buforem punktu (rys. 8.7b),

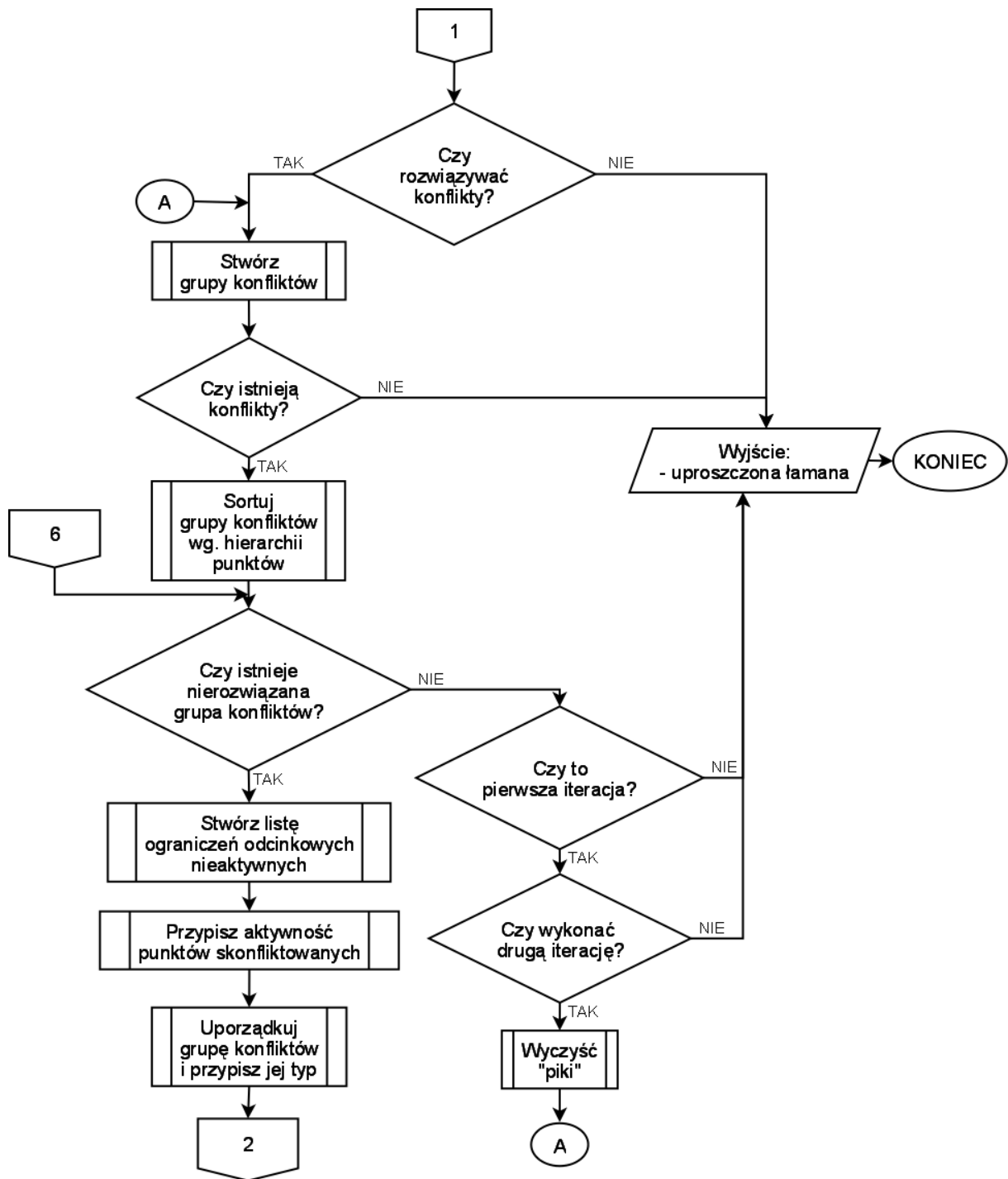
- punkty przecięcia prostych kierunkowych odsunięcia punktu od odcinków z buforem rozpoznawalności tego odcinka (rys. 8.7c),
- punkty przecięcia prostych kierunkowych przechodzących przez dany punkt i środek ciężkości punktów z nim skonfliktowanych z buforem rozpoznawalności punktu oraz buforami podwójnej wielkości elementów go ograniczających (rys. 8.7d).

8.1.2. Schemat blokowy algorytmu

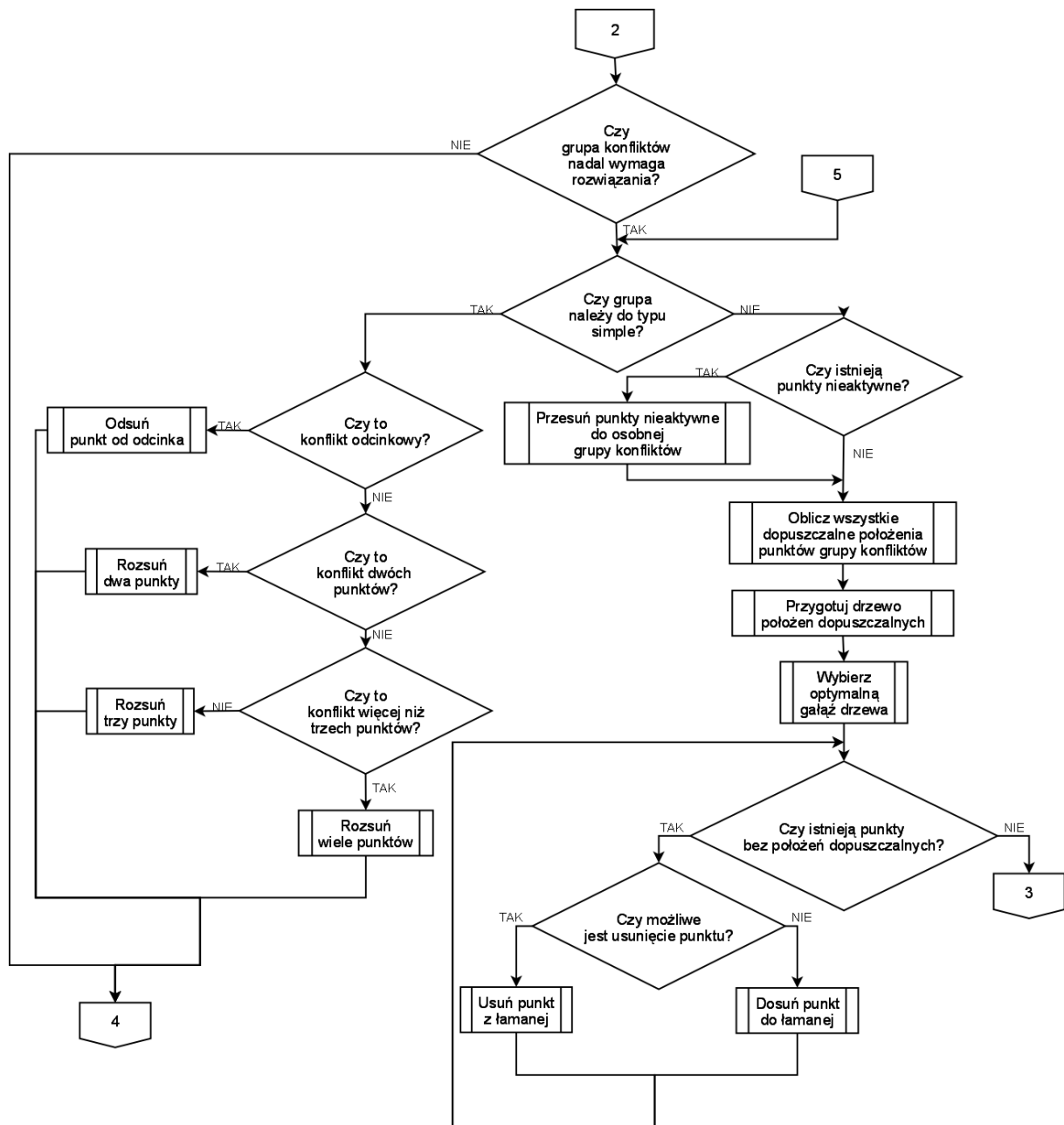
Uproszczony schemat blokowy całego algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów wewnętrznych przedstawiony jest na schematach 1a, 1b, 1c i 1d.



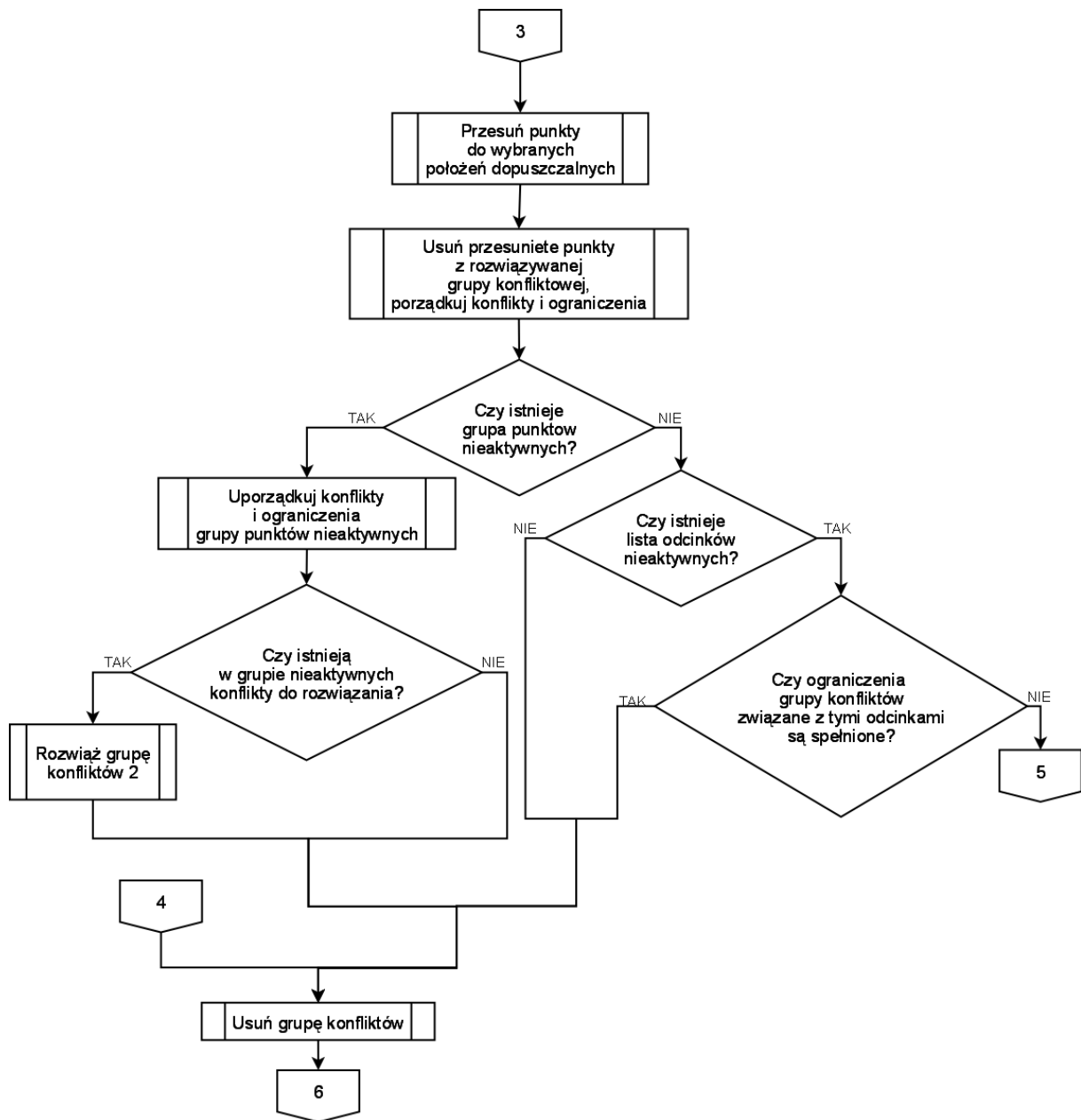
Schemat 1a. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 1



Schemat 1b. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 2



Schemat 1c. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 3



Schemat 1d. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 4

8.1.3. Przykład upraszczania z rozwiązywaniem konfliktów graficznych łamanych otwartych

Dla potrzeb zweryfikowania działania metody wybrano dane testowe, do uproszczenia (w kilku wariantach) opracowanym programem. W tym celu dokonano wektoryzacji mapy w skali 1: 4 000 000 przedstawiającej fragment linii brzegowej Morza Śródziemnego (wybrzeży Grecji, załącznik A-1). Wybór ten podyktowany był wysokim stopniem komplikacji łamanej, umożliwiającym przebadanie jak największej liczby warunków i reguł tworzących metodę.

Za średni błąd długości na mapie wejściowej przyjęto wielkość wynikającą ze średniego błędu położenia punktów sytuacyjnych należących do innej niż I grupy dokładnościowej (instrukcja O1), który wg instrukcji technicznej K-2 GUGiK nie powinien przekroczyć $\pm 1,0$ mm (w skali mapy). Wyliczony (na podstawie błędu położenia punktu, zgodnie z prawem przenoszenia błędów oraz po uwzględnieniu skali) średni błąd długości na mapie pierwotnej m_{0l} wynosił ± 5640 m.

Zgodnie z instrukcją techniczną K-2 GUGiK wyliczono również maksymalny dopuszczalny błąd położenia punktu na mapie docelowej, który nie powinien być większy niż $\pm 0,3$ mm (w skali mapy) od dokładności położenia punktu na mapie pierwotnej. Z prawa przenoszenia błędów dokonano *a priori* oszacowania średniego błędu długości na mapie docelowej (m_l'), który powinien wynosić nie więcej niż $\pm 1,47$ mm w skali mapy.

Korzystając ze wzoru (7.3) można, po przeprowadzeniu procesu generalizacji, oszacować średni błąd długości *a posteriori* (m_l'').

Wyniki eksperymentu polegającego na generalizacji danych testowych w wybranym przedziale skal docelowych, przy zastosowaniu czterech opcji generalizacji, prezentuje tabela 8.1. W tabeli tej wyróżniono cztery rodzaje uproszczenia, oznaczone następująco:

- (a) uproszczenie przy użyciu metody Chrobaka,
- (b) wstępny podział łamanej na fragmenty gwiazdkształtne i następnie uproszczenie ich przy użyciu metody Chrobaka,
- (c) uproszczenie przy użyciu metody Chrobaka połączonej z wykrywaniem i usuwaniem konfliktów wewnętrznych,

(d) wstępny podział łamanej na fragmenty gwiazdkształtne oraz ich uproszczenie przy użyciu metody Chrobaka połączonej z wykrywaniem i usuwaniem konfliktów wewnętrznych.

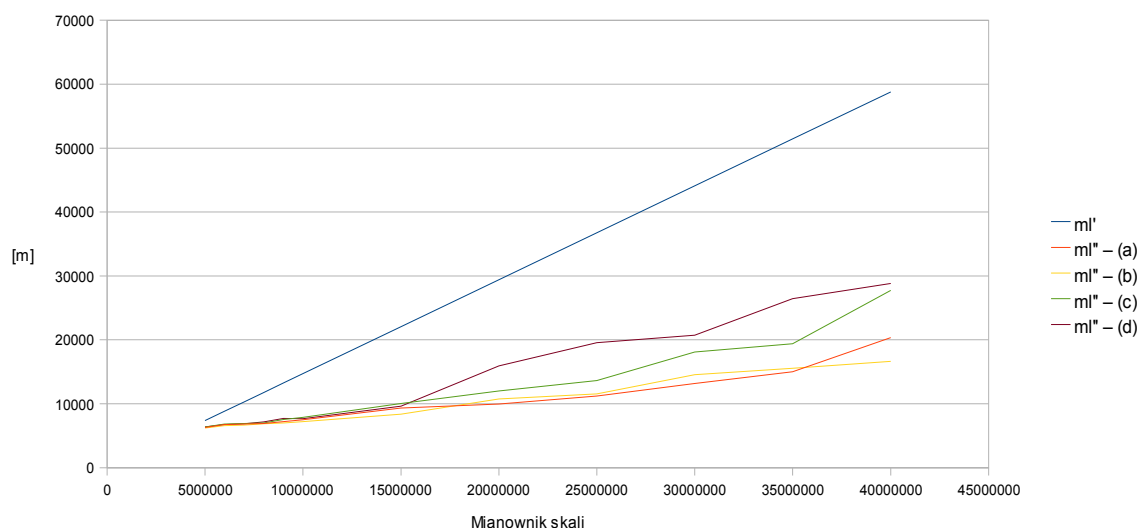
Rysunki łamanej wejściowej (w skali 1: 4 000 000) oraz uproszczonej do skal 1: 10 000 000, 1: 20 000 000 i 1: 50 000 000 (w wersji upraszczania (a), (c) i (d)) przedstawione są na załącznikach A-1 i A-2.

Tabela 8.1. Wyniki upraszczania łamanej otwartej w wybranym przedziale skal docelowych

Skala wejściowa	m_{01} [m]	Skala wyjściowa	e_r [m]	m_1' [m]	Rodzaj uproszczenia	Procent punktów pozostających w procesie upraszczania %	m_1'' [m]
1: 4 000 000	5640	1: 5 000 000	2500	7350	a	82	6290,49
					b	84	6201,51
					c	81	6372,52
					d	81	6348,96
		1: 6 000 000	3000	8820	a	70	6744,90
					b	72	6570,77
					c	68	6799,02
					d	68	6734,87
		1: 7 000 000	3500	10290	a	59	6817,34
					b	63	6639,57
					c	57	6887,94
					d	58	6856,88
		1: 8 000 000	4000	11760	a	53	6914,44
					b	56	6850,91
					c	51	6987,10
					d	50	7173,71
		1: 9 000 000	4500	13230	a	47	7201,27
					b	50	6987,83
					c	45	7527,34
					d	44	7677,19
1: 10 000 000	5000	14700	a	42	7486,32		
			b	45	7210,01		
			c	40	7848,70		
			d	40	7668,85		
1: 15 000 000	7500	22050	a	24	9328,81		
			b	29	8358,92		
			c	21	10013,30		
			d	23	9626,01		
1: 20 000 000	10000	29400	a	19	9965,59		
			b	20	10759,50		

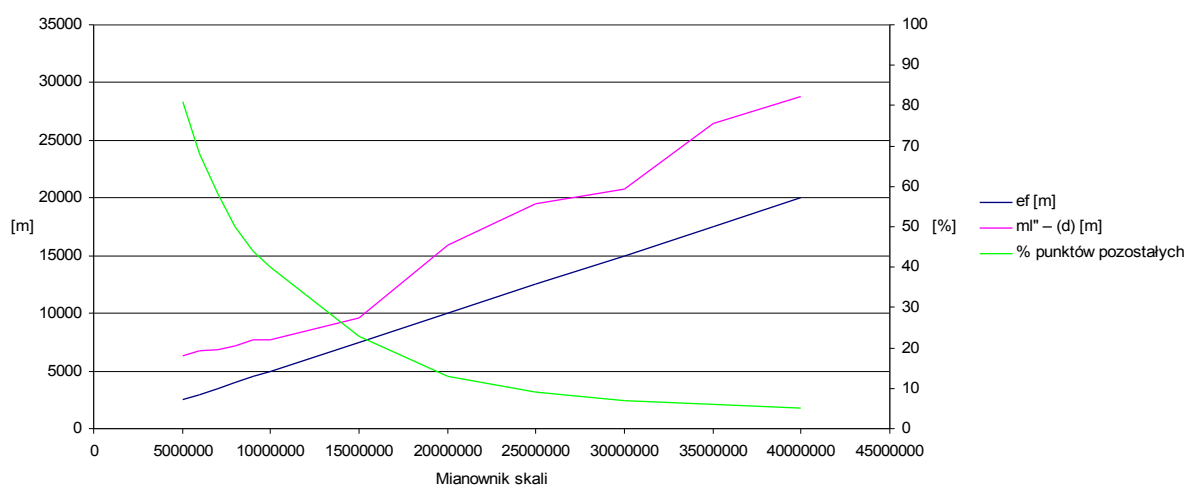
Skala wejściowa	m_{01} [m]	Skala wyjściowa	e_r [m]	m_1' [m]	Rodzaj uproszczenia	Procent punktów pozostających w procesie uproszczenia %	m_1'' [m]
		1: 25 000 000	12500	36750	c	16	12010,10
					d	13	15910,20
					a	15	11202,80
					b	16	11544,50
		1: 30 000 000	15000	44100	c	13	13605,80
					d	9	19532,60
					a	12	13151,90
					b	13	14548,50
		1: 35 000 000	17500	51450	c	9	18073,50
					d	7	20737,80
					a	10	15020,30
					b	11	15558,60
		1: 40 000 000	2000	58800	c	8	19399,60
					d	6	26453,50
					a	7	20332,60
					b	9	16622,10
					c	5	27726,50
					d	5	28815,70

Porównanie wielkości średnich błędów długości *a priori* oraz *a posteriori* dla czterech rodzajów uproszczenia znajduje się na wykresie 8.1.



Wykres 8.1. Średnie błędy długości *a priori* i *a posteriori* dla czterech rodzajów uproszczenia łamanej otwartej

Wykres 8.2 przedstawia zmianę wielkości średniego błędu długości *a posteriori* dla upraszczania w wersji (d), a więc upraszczania połączonego z usuwaniem konfliktów graficznych, w stosunku do zmiany wielkości najkrótszego boku trójkąta elementarnego w kolejnych skalach wynikowych (e_f) oraz do wielkości procentowego udziału liczby wierzchołków pozostałych w procesie upraszczania (w stosunku do liczby wszystkich wierzchołków rysunku wejściowego).



Wykres 8.2. Zmiana średniego błędu długości *a posteriori* dla czwartego rodzaju upraszczania, w porównaniu do wielkości najkrótszego boku trójkąta elementarnego w skalach wynikowych oraz do procentowej liczby punktów pozostałych w procesie

Na podstawie wykresu 8.1 można stwierdzić, iż średnie błędy długości w każdym z badanych przypadków (rodzajów zastosowanego upraszczania) są mniejsze od maksymalnego dopuszczalnego średniego błędu długości (m_1'), zgodnie z instrukcjami technicznymi GUGiK. Różnice pomiędzy błędami *a posteriori* rosną wraz ze zmniejszaniem skali mapy docelowej. Zanotowano większe wartości błędów dla przypadków upraszczania z wykorzystaniem metody wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych niż dla przypadku upraszczania jedynie z wykorzystaniem metody Chrobaka. Sytuację tę powodują zastosowane sposoby rozwiązania konfliktów, to znaczy zmiana położenia wierzchołka łamanej bądź jego eliminacja z wynikowego rysunku. Można również zaobserwować, że zastosowanie wstępnego podziału łamanej na fragmenty gwiazdkształtne, co jest związane z unikaniem powstania samoprzecięć łamanej, powoduje zwiększenie się

średniego błędu długości w stosunku do globalnego upraszczania łamanej (w przypadku stosowania eliminacji konfliktów).

Wykres 8.2 przedstawia porównanie wielkości średniego błędu długości *a posteriori*, wyliczonego dla upraszczania połączonego z rozwiązywaniem konfliktów ($m_l'' - (d)$), z wielkością miary rozpoznawalności dla skal docelowych (ef). Można zauważyć, że błąd ten przekracza wielkość e_f i rośnie wraz ze wzrostem liczby punktów usuniętych z rysunku wynikowego. Wynik ten zgodny jest z przewidywaniami i spowodowany faktem, iż na wielkość średniego błędu długości, charakteryzującego proces upraszczania, mają wpływ błędy pozorne wynikające z usuwania wierzchołków łamanej oraz błędy związane ze zmianą położenia wierzchołków (por. rozdz. 7.4.1).

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że rysunek łamanej przedstawiającej linię brzegową (szczegół sytuacyjny III grupy dokładnościowej, instrukcja techniczna O1) uproszczony przy pomocy metody Chrobaka połączonej z wykrywaniem i usuwaniem konfliktów wewnętrznych spełnia nie tylko warunek rozpoznawalności (co widoczne jest na załączniku nr 1), ale również warunki dokładnościowe stawiane mapom topograficznym opracowywanym na podstawie map w skalach większych.

8.1.4. Przykład upraszczania z rozwiązywaniem konfliktów graficznych łamanych zamkniętych

Dla potrzeb zweryfikowania działania metody w przypadku łamanych zamkniętych przygotowano dane testowe, które, podobnie jak w przypadku łamanej otwartej, uproszczono opracowanym programem. W tym celu dokonano digitalizacji linii brzegowej Zalewu Solińskiego w skali 1:50 000 (załącznik B-1). Wybór ten, analogicznie jak w przypadku łamanej otwartej, podyktowany był stopniem komplikacji linii brzegowej tego sztucznego zbiornika, który umożliwił przebadanie jak największej liczby warunków i reguł tworzących metodę.

Wyliczony za instrukcją techniczną K-2 GUGiK z błędu położenia punktu, na podstawie prawa przenoszenia błędów oraz po uwzględnieniu skali średni błąd długości na mapie pierwotnej m_{0l} wynosił $\pm 70,50$ m.

Analogicznie jak dla łamanej otwartej oszacowano również *a priori* średni błąd długości na mapie docelowej (m_l'), który powinien wynosić nie więcej niż $\pm 1,47$ mm w skali mapy, jak również (ze wzoru (7.3)), po przeprowadzeniu procesu generalizacji, średni błąd długości *a posteriori* (m_l'').

Zestawienie wyników eksperymentu prezentuje tabela 8.2. Dla porównania zastosowano również cztery rodzaje upraszczania:

- (a) uproszczenie przy użyciu metody Chrobaka,
- (b) wstępny podział łamanej na fragmenty gwiazdkształtne i następnie uproszczenie ich przy użyciu metody Chrobaka,
- (c) uproszczenie przy użyciu metody Chrobaka połączonej z wykrywaniem i usuwaniem konfliktów wewnętrznych,
- (d) wstępny podział łamanej na fragmenty gwiazdkształtne oraz ich uproszczenie przy użyciu metody Chrobaka połączonej z wykrywaniem i usuwaniem konfliktów wewnętrznych.

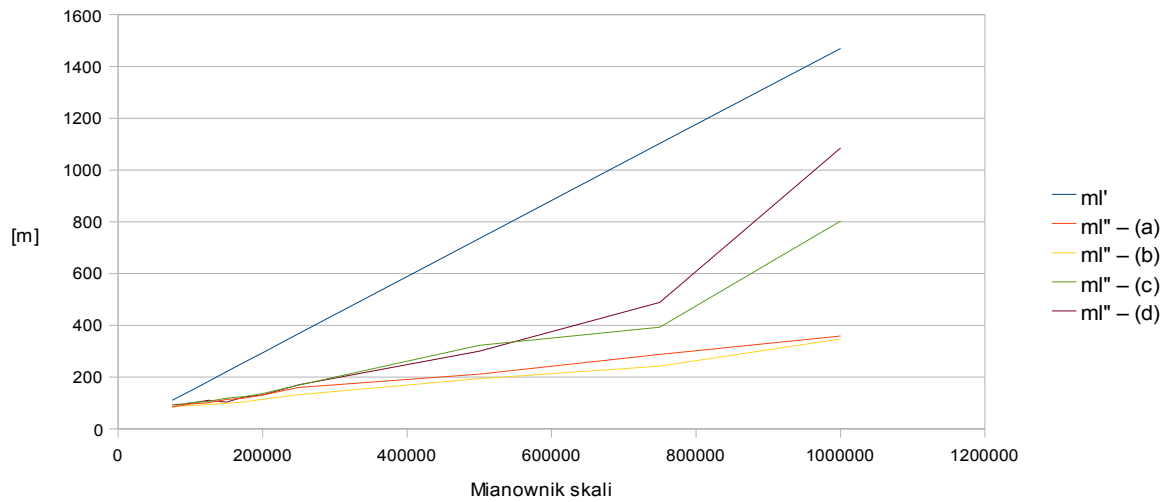
Rysunki łamanej wejściowej (w skali 1: 50 000) oraz uproszczonej do skal 1: 100 000, 1: 200 000 i 1: 500 000 (w wersjach upraszczania (a), (c) i (d)) przedstawione zostały na załącznikach B-1 i B-2.

Tabela 8.2. Wyniki upraszczania łamanej otwartej w wybranym przedziale skal docelowych

Skala wejściowa	m_{0l} [m]	Skala wyjściowa	e_r [m]	m_l' [m]	Rodzaj uproszczenia	Procent punktów pozostających w procesie upraszczania %	m_l'' [m]
1: 50 000	70,50	1: 75 000	37,50	110,25	a	95	83,91
					b	95	88,95
					c	94	86,58
					d	94	91,81
	1: 100 000	50,00	147,00	a	86	96,06	
				b	88	90,16	
				c	84	100,61	
				d	84	99,19	
	1: 125 000	62,50	183,75	a	75	100,82	
				b	79	94,00	
				c	71	106,13	
				d	70	110,06	
1: 150 000	75,00	220,50	a	63	113,68		

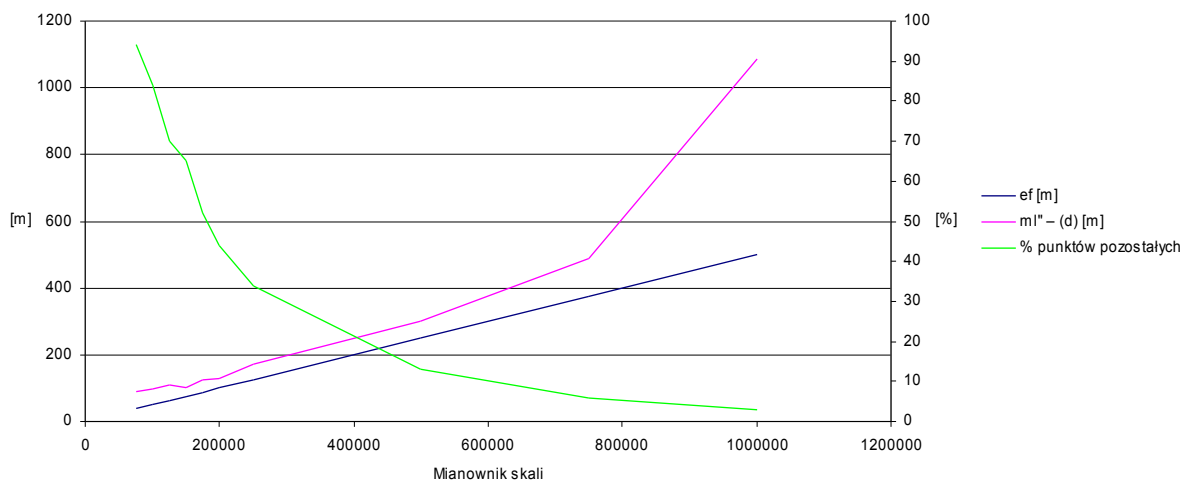
Skala wejściowa	m_0 [m]	Skala wyjściowa	e_r [m]	m_1' [m]	Rodzaj uproszczenia	Procent punktów pozostających w procesie upraszczania	m_1'' [m]			
						%				
					b	69	98,79			
					c	60	118,93			
					d	65	103,30			
					1: 175 000	87,50	257,25	a	53	118,73
								b	61	104,16
								c	51	124,61
								d	52	124,17
					1: 200 000	100,00	294,00	a	46	131,41
								b	53	114,47
								c	44	136,18
								d	44	130,94
					1: 250 000	125,00	367,50	a	37	159,34
								b	42	132,19
								c	35	169,11
								d	34	170,67
					1: 500 000	250	735	a	19	211,35
								b	20	194,32
								c	14	323,11
								d	13	299,63
					1: 750 000	375,00	1102,50	a	12	287,40
								b	13	242,41
								c	8	392,77
								d	6	488,62
					1: 1 000 000	500,00	1470,00	a	8	358,95
								b	9	347,80
								c	3	803,23
								d	3	1085,59

Zestawienie średnich błędów długości wyliczonych *a priori* i *a posteriori* dla czterech zastosowanych rodzajów upraszczania prezentuje wykres 8.3.



Wykres 8.3. Średnie błędy długości *a priori* i *a posteriori* dla czterech rodzajów upraszczania łamanej zamkniętej

Wykres 8.4 przedstawia zmianę wielkości średniego błędu długości *a posteriori* dla upraszczania w wersji (d) w stosunku do zmiany wielkości najkrótszego boku trójkąta elementarnego w kolejnych skalach wynikowych (e_f) oraz do wielkości procentowego udziału liczby wierzchołków pozostałych w procesie upraszczania (w stosunku do liczby wszystkich wierzchołków rysunku wejściowego).



Wykres 8.4. Zmiana średniego błędu długości *a posteriori* dla czwartego rodzaju upraszczania, w porównaniu do wielkości najkrótszego boku trójkąta elementarnego w skalach wynikowych oraz do procentowej liczby punktów pozostałych w procesie

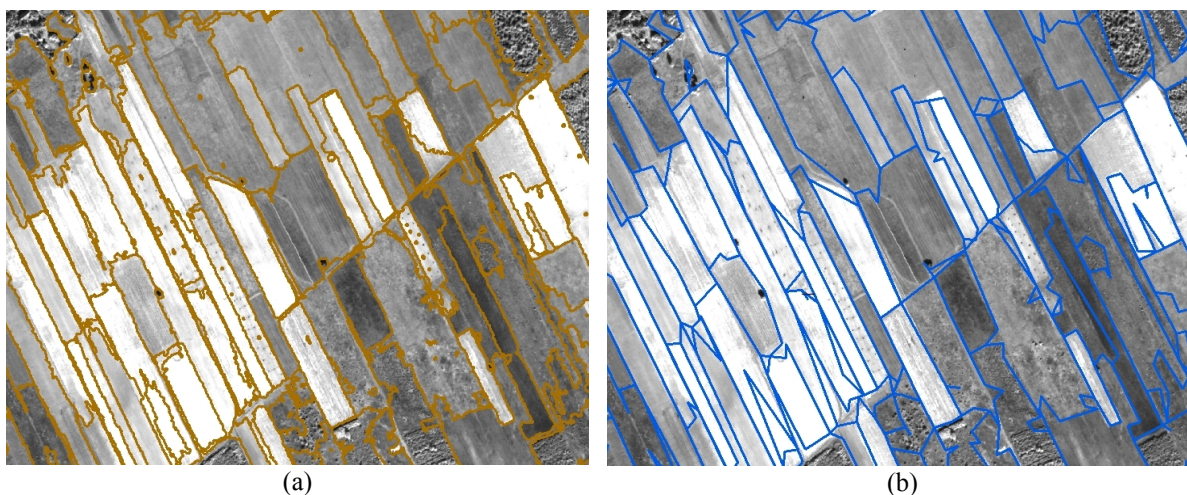
Na podstawie wykresu 8.3 można stwierdzić, iż średnie błędy długości w każdym z badanych przypadków (rodzajów zastosowanego upraszczania) są mniejsze od maksymalnego dopuszczalnego średniego błędu długości, który został wyliczony *a priori* zgodnie z instrukcjami technicznymi GUGiK. Różnice pomiędzy błędami *a posteriori* rosną wraz ze zmniejszaniem skali mapy docelowej. Zanotowano większe wartości błędów dla przypadków upraszczania z wykorzystaniem metody wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych niż dla przypadku upraszczania jedynie z wykorzystaniem metody Chrobaka. Spowodowane jest to zastosowanym sposobem rozwiązania konfliktów (zmiana położenia wierzchołka łamanej bądź jego eliminacja). Zastosowanie wstępnego podziału łamanej na fragmenty gwiazdkształtne powoduje zwiększenie się średniego błędu długości w stosunku do globalnego upraszczania łamanej zamkniętej, analogicznie jak miało to miejsce w przypadku łamanej otwartej.

Wykres 8.2 przedstawia porównanie wielkości średniego błędu długości *a posteriori*, wyliczonego dla upraszczania połączonego z rozwiązywaniem konfliktów ($m_l'' - (d)$), z wielkością miary rozpoznawalności dla skal docelowych e_f . Można zauważyć, że błąd ten przekracza wielkość e_f i rośnie wraz ze wzrostem liczby punktów usuniętych z rysunku wynikowego. Wynik ten zgodny jest z przewidywaniami i spowodowany faktem, iż na wielkość średniego błędu długości, charakteryzującego proces upraszczania, mają wpływ błędy pozorne wynikające z usuwania wierzchołków łamanej oraz błędy związane ze zmianą położenia wierzchołków (por. rozdz. 7.4.1).

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, że rysunek łamanej przedstawiającej linię brzegową (szczegół sytuacyjny III grupy dokładnościowej, instrukcja techniczna O1) uproszczony przy pomocy metody Chrobaka połączonej z wykrywaniem i usuwaniem konfliktów wewnętrznych spełnia nie tylko warunek rozpoznawalności (co widoczne jest na załączniku nr 2), ale również warunki dokładnościowe stawiane mapom topograficznym, opracowywanym na podstawie map w skalach większych.

8.2. Zastosowanie metody wykrywania i usuwania konfliktów graficznych w rastrowych technikach pozyskiwania danych

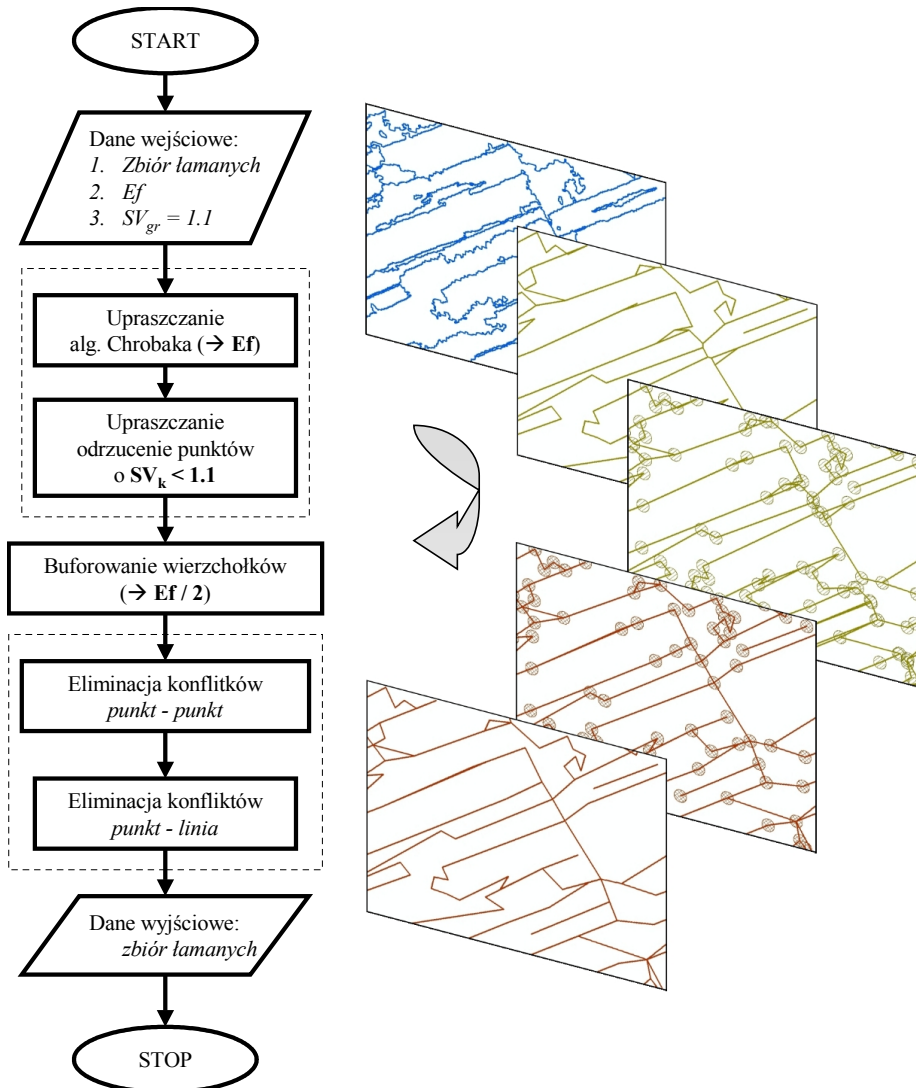
Znaczący postęp w zakresie pozyskiwania danych dla systemów GIS wiąże się z rozwojem technik teledetekcyjnych. Współczesna technologia obrazowania pozwala poprzez wysoką rozdzielczość przestrzenną na pozyskanie wysoko uszczegółowionych obiektów. Ponadto pozyskane na drodze automatycznej klasyfikacji użytków i wektoryzacji ich granic obiekty posiadają charakterystykę geometryczną ściśle związaną z budową modelu rastrowego (siatka kwadratów), co często nie odpowiada rzeczywistemu charakterowi rejestrowanych obiektów. Powoduje to konieczność stosowania odpowiednich technik generalizacji obiektów (rys. 8.8).



Rys. 8.8. Granice użytków przed (a) i po (b) zastosowaniu uproszczenia
(Źródło: (Kozioł, Żukowska 2007))

Technika upraszczania łamanej może zostać zaadaptowana dla wyżej wspomnianych potrzeb. Kozioł i Żukowska (2007) zaprezentowali algorytm umożliwiający zastosowanie upraszczania łamanych pozyskanych z obrazów teledetekcyjnych metodą Chrobaka, połączoną z elementami metody wykrywania i usuwania konfliktów graficznych. Celem działania algorytmu jest taka transformacja rysunku łamanych, aby przy maksymalnym uproszczeniu („wyprostowaniu”) zachować ich zgeneralizowany trend. Proponowana procedura ta składa się z trzech etapów (rys. 8.9):

1. Uproszczenie podstawowe, wykonane przy pomocy metody Chrobaka (1999).
2. Dalsze uproszczenie z wykorzystaniem współczynnika krętości liczonego dla poszczególnych wierzchołków łamanej (Dutton 1999).
3. Ostateczne czyszczenie rysunku, polegające na wykorzystaniu buforów wierzchołków łamanych.



Rys. 8.9. Schemat blokowy algorytmu
(Źródło: (Kozioł, Żukowska 2007))

Drugi etap związany jest ze wspomnianym jak największym „prostowaniem” łamanych, dla celów którego wykorzystano krętość linii (ang. *line sinuosity*), która jest statystyką estymowaną dla każdego wierzchołka elementu liniowego. Miarą krętości jest stosunek

długości mierzonej wzdłuż elementu liniowego do długości linii trendu (cięciwy) łączącej jego końcowe wierzchołki i może być obliczany dla różnych rozpiętości (Dutton 1999):

$$SV_k = \frac{\sum d_{i,j+1}}{d_{v-k,v+k}}, \quad (8.1)$$

gdzie: $k > 0, i \in \langle v-k, v+k-1 \rangle$;

$$SV_{m,n} = \frac{\sum SV_{k=m,n}}{n-m+1}. \quad (8.2)$$

Zmieniając wartości parametrów m i n można zdefiniować obszar (zakres wierzchołków krzywej), dla którego estymowana jest lokalna wartość krętości; n jest topologiczną odległością od danego wierzchołka do najbliższych sąsiadów, pomiędzy którymi konstruowana jest linia trendu, m zaś definiuje najdalszych sąsiadów, dla których dokonuje się analizy. Dla wartości minimalnych ($n = m = 1$), brany jest pod uwagę tylko sam wierzchołek oraz punkty bezpośrednio z nim sąsiadujące. Wartość krętości SV może wynosić od 1,0 (dla punktów kolinearnych) do ∞ (w patologicznych przypadkach).

Tak zdefiniowaną krętość, obliczaną dla wartości $n = m = 1$, a więc tylko dla sąsiednich punktów, Koziół i Żukowska (2007) zastosowali jako wartość progową dla drugiego etapu upraszczania badanych łamanych. Stwierdzili, że odrzucając wierzchołki, dla których $SV < 1,1$, stosunkowo łatwo uzyskuje się redukcję fragmentów łamanych, które wykazują silny trend do linii prostej, do odcinków.

Trzeci etap procedury zakładał usuwanie niezgodności, które mogły pojawić się wskutek błędów w interpretacji obrazów teledetekcyjnych na etapie ich automatycznej klasyfikacji, takich, jak bardzo strzeliste kąty pomiędzy dwoma liniami, gdzie wierzchołek tego kąta stanowi punkt węzłowy (to znaczy mają w nim swoje punkty końcowe dwie łamane), zaś ramiona stanowią odcinki tych łamanych. Uznano, iż z logicznego punktu widzenia stanowią one pewną płynną granicę pomiędzy dwoma użytkami, którą można ujednoclić.

W tym celu zastosowano buforowanie wierzchołków łamanej okręgami o średnicy równej wartości e_f , użytej do upraszczania metodą Chrobaka, analogicznie jak ma to miejsce w metodzie wykrywania i rozwiązywania konfliktów graficznych. Zastosowano dwa etapy takiego czyszczenia rysunku: (i) przesunięcie punktów, których bufory przecinają się, do

środka ciężkości tych punktów, oraz (ii) sprawdzenie przecinania się buforów wierzchołków z odcinkami łamanymi (różnymi od łamanej do której należy badany wierzchołek), które zaczynają się w węźle sąsiadującym z badanym wierzchołkiem. Jeśli takie przecięcie ma miejsce, następuje przesunięcie badanego wierzchołka do punktu wychwyconego odcinka znajdującego się w najmniejszej od niego odległości. Proces ten ma na celu zapewnienie większej spójności topologicznej przekształcanych łamanymi.

Stwierdzono, iż zastosowanie algorytmu pozwala na uproszczenie rysunków uzyskanych automatycznymi metodami wektoryzacji obrazów rastrowych (wejściowych dla procesu), co z kolei skutkuje znaczną oszczędnością przestrzeni dyskowej wymaganej do przechowywania danych wektorowych. Dla przykładu stwierdzono, że plik o wielkości 25,7 MB po uproszczeniu przy użyciu wartości $e_f = 12m$ zajmował już tylko 1,61 MB.

Zaproponowane rozwiązanie może być stosowne dla wszystkich typów danych, tak liniowych jak i poligonowych, niezależnie od źródła danych rastrowych (obraz satelitarny, zdjęcie fotogrametryczne, ortofotomapa). Algorytm został zaimplementowany w środowisku ArcGIS ArcView (ESRI). Została także zaprojektowana jego implementacja na oprogramowanie Microstation v8 (Bentley).

9. PODSUMOWANIE

Rozwój kartografii w dobie komputeryzacji jest powodem powstawania algorytmów, które mają na celu automatyzację procesu generalizacji kartograficznej, uwzględnianej w redakcji treści mapy cyfrowej. Jeden z elementów tej automatyzacji stanowią algorytmy upraszczania krzywych, a wśród nich również tzw. globalne algorytmy upraszczania (m. in. metoda Chrobaka). Istniejące algorytmy upraszczania krzywych (w tym algorytmy globalne) nie są wolne od generowania konfliktów graficznych w treści tworzonych map.

Cechą charakterystyczną istniejących metod rozwiązywania konfliktów jest ich przeznaczenie tylko dla jednego, konkretnego algorytmu upraszczania krzywych. Zauważyć można również brak obiektywnego kryterium identyfikacji, a następnie eliminacji konfliktów, które dodatkowo można zastosować dla różnych algorytmów upraszczania.

Powyższe przesłanki skłoniły Autorkę do znalezienia bardziej ogólnej i obiektywnej metody wyszukiwania i usuwania konfliktów graficznych. Przeprowadzone badania umożliwiły postawienie tezy (por. rozdz. 2), iż zastosowanie zmodyfikowanego kryterium rozpoznawalności rysunku mapy do buforowania obiektów umożliwia jednoznaczną identyfikację oraz eliminację konfliktów graficznych powstałych w procesie cyfrowej generalizacji kartograficznej.

W celu udowodnienia tej tezy utworzono i opisano metodę wykrywania i rozwiązywania konfliktów graficznych. Możliwość konstrukcji tej metody związana jest z istnieniem obiektywnego kryterium rozpoznawalności rysunku mapy (Chrobak 1999), które może zostać adaptowane do potrzeb identyfikacji, a następnie eliminacji konfliktów graficznych. Aby było to możliwe konieczne stało się zdefiniowanie bufora rozpoznawalności obiektu oraz zastosowanie topologicznego modelu danych. Wymagana jest również znajomość hierarchii uproszczanych obiektów.

W następnej kolejności Autorka zbadała naturę konfliktów pojawiających się w procesie upraszczania kształtu łamanej i określiła możliwości ich identyfikacji oraz rozwiązana w tzw. grupach konfliktów, które składają się nie tylko z elementów skonfliktowanych, ale również elementów ograniczających. Taka struktura grupy konfliktów ma na celu zoptymalizowanie podejścia do ich rozwiązania jak również ograniczenie możliwości wystąpienia nowych

konfliktów, mogących powstać przez nieodpowiednie rozwiązanie konfliktów już istniejących.

Mając tak zdefiniowane elementy niezbędne dla procesu rozwiązywania konfliktów graficznych Autorka przystąpiła do budowania algorytmu umożliwiającego rozpoznanie, a następnie rozwiązanie konfliktów graficznych.

Opisana metoda wykrywania i rozwiązywania konfliktów graficznych jest metodą deterministyczną (pod warunkiem zastosowania jednoznacznych, nie randomizowanych procedur szczegółowego przetwarzania poszczególnych typów grup konfliktów). W praktycznej implementacji algorytmów rozwiązujących problem konfliktów wewnętrznych łamanej zastosowano zestaw reguł typu „JEŚLI – TO”, odpowiednich dla poszczególnych typów grup konfliktów. Podejście takie oznacza pełną powtarzalność wyników, zależną jedynie od skali mapy, dla której przeprowadzana jest generalizacja.

Proponowana metoda jest obiektywna, ponieważ jej podstawowy parametr – wielkość bufora rozpoznawalności – zdefiniowany jest jednoznacznie i zależy jedynie od przyjętej skali mapy wynikowej oraz szerokości linii rysunku mapy. Podejście to jest rozszerzeniem znanego z obiektywnej metody upraszczania Chrobaka pojęcia rozpoznawalności rysunku mapy.

Omawiana metoda w dużej mierze automatyzuje proces rozwiązywania konfliktów graficznych, nie pozbawiając jednak kartografa kontroli nad jego przebiegiem, zwłaszcza w aspekcie jakościowego rozróżnienia ważności elementów treści mapy. Mianowicie decyzja związana z przeznaczeniem mapy, a dotycząca problemów pojawiających się na styku rozłącznych klas obiektów (relacji między nimi), powinna pozostać w gestii redaktora czuwającego nad przebiegiem generalizacji, nie naruszając autorskiego charakteru tego procesu. Metoda ta ma na celu jedynie usprawnienie mechanicznych działań, związanych z ilościowym charakterem informacji znajdującej się na mapie.

Chociaż proponowana metoda oparta jest po części na konkretnej metodzie upraszczania (obiektywnej metodzie Chrobaka), to jej założenia oraz planowana sekwencja koniecznych procedur i reguł są na tyle uniwersalne, że możliwe jest jej adaptowanie również dla innych szczegółowych algorytmów stosowanych w automatyzacji procesu generalizacji kartograficznej. Dodatkowo może ona znaleźć zastosowanie również na innych polach, np. w technikach akwizycji danych z obrazów teledetekcyjnych.

Tak jak inne procedury związane z problemem cyfrowej generalizacji kartograficznej, metoda ta wymaga zaprojektowania odpowiedniego modelu danych, który w szczególności byłby modelem topologicznym oraz wspierającym klasyfikację i hierarchizację obiektów stanowiących treść mapy, oraz elementów budujących te obiekty (jak np. wierzchołków tworzących łamane, stanowiące granice obiektów).

Należy również zaznaczyć, iż przeznaczeniem metody identyfikacji i usuwania konfliktów graficznych jest generowanie chwilowego rysunku mapy w skali docelowej. Metoda ta w żaden sposób nie ingeruje w dane źródłowe, zapisane w referencyjnej bazie danych. Podstawowym celem metody jest czytelność opracowywanej mapy, definiowana przez wzajemną rozpoznawalność jej obiektów. Jednak przeprowadzone praktyczne eksperymenty upraszczania łamanych otwartych i zamkniętych przy użyciu tej metody pokazały, że chociaż wielkość średnich błędów długości, charakteryzujących dokładność procesu, są większe niż odpowiadające im wartości błędów uzyskane w wyniku upraszczania metodą Chrobaka, to (przynajmniej dla III grupy szczegółów dokładnościowych) mieszczą się one w granicach błędów dopuszczanych przez obowiązujące w Polsce instrukcje techniczne dotyczące redakcji map ogólnogeograficznych.

Podsumowując, można stwierdzić, iż proponowana metoda rozwiązywania konfliktów graficznych stanowi kolejny krok na drodze automatyzacji cyfrowej generalizacji kartograficznej i otwiera możliwość zastosowania jej w procesie generowania map w różnych przedziałach skal ze źródłowej bazy danych typu MRDB.

LITERATURA

- Aho A.V., Hopcroft J.E., Ullman J.D. 2003. *Algorytmy i struktury danych*. Helion, Gliwice.
- Beard K. 1991. *Theory of the Cartographic Line Revisited / Implications For Automated Generalization*. Cartographica. Vol. 28, No.4, s. 32-58.
- Cormen T., Leiserson C.E., Rivest R., Stein C. 2001. *Wprowadzenie do algorytmów*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa.
- Christensen A. H. J. 1999. *Cartographic Line Generalization with Waterlines and Medial-Axes*, Cartography and Geographic Information Science, Vol. 26, No. 1, s. 19-32.
- Chrobak T. 1999. *Badanie przydatności trójkąta elementarnego w komputerowej generalizacji kartograficznej*. UWND AGH, Kraków.
- Chrobak T., Koziół K., Szostak M., Żukowska M. 2007. *Podstawy cyfrowej generalizacji kartograficznej*. UWND AGH, Kraków.
- Deo N. 1980. *Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce*. PWN, Warszawa.
- Dettoni G, Falcidideno B. 1982. *An Algorithm for Selecting Main Points on a Line*. Computers and Geoscience, Vol. 8, No.1, s. 3-10.
- Douglas D. H., Peucker T. K. 1973. *Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature*. The Canadian Cartographer, No. 10, Issue 2, s. 112-122.
- Duda R. 1986. *Wprowadzenie do topologii*. PWN, Warszawa.
- Dutton G. 1981. *Fractal enhancement of cartographic line detail*. The American Cartographer, No. 8, Issue 1, s. 23-40.
- ESRI 2004. *ArcGIS Geodatabase Topology Rules*. [w:] ArcGIS 9 Documentation.
- Fei L. 2002. *A Method of Automated Cartographic Displacement: on the Relationship Between Streets and Buildings*. Rozprawa doktorska, Leibniz Universität Hannover.
- Freeman H. 1978. *Shape Description Via the Use of Critical Points*. Pattern Recognition, Vol 10, s. 159-166.
- Gabriel K.R., Sokal R.R 1969. *A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis*. Systematic Zoology, Vol. 18, No.3, s. 259-278.

- Guibas L., Stolfi J. 1985. *Primitives for the Manipulation of General Subdivisions and the Computation of Voronoi Diagrams*. ACM Transactions on Graphics, Vol. 4, No. 2, s. 74-123.
- Hershberger J., Snoeyink J. 1992. *Speeding Up the Douglas – Peucker Line-Simplification Algorithm*. Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling, Charleston.
- Hipke C.A 1996. *Computing Visibility Polygons with LEDA*. Źródło: http://ad.informatik.uni-freiburg.de/mitarbeiter/hipke/_hipke.work.vis_polygon.ps.gz
- Instrukcja techniczna K-2. *Mapy topograficzne do celów gospodarczych*. GUGiK, Warszawa 1980.
- Instrukcja techniczna O-1. *Ogólne zasady wykonywania prac geodezyjnych*. GUGiK, Warszawa 1988.
- Jones, C.-B., Bundy G.-L., Ware J.-M. 1995. *Map Generalization with a Triangulated Data Structure*. Cartography and Geographic Information Systems, Vol. 22, No. 4, s. 317-331.
- Kazemi S., Lim S., Rizos C. 2004. *A Review of Map and Spatial Database Generalization for Developing a Generalization Framework*. XXth Congress of the Int. Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, s. 1221-1226.
- Kozioł K., Żukowska M. 2007. *Zastosowanie metody Chrobaka upraszczania linii w rastrowych technikach pozyskiwania danych*. Roczniki Geomatyki, t. V, z. 2, s. 85-93.
- Kraak M., Ormeling F. 1996. *Kartografia. Wizualizacja danych przestrzennych*. PWN, Warszawa.
- Lischinski D. 1993. *Incremental Delaunay Triangulation*. Graphics Gems IV, Academic Press Professional, Inc., San Diego.
- Luaces M. R. i in. 2004a. *A Generic Architecture for Geographic Information Systems*. Proc. 2nd International Symposium on Innovation in Information and Communication Technology, Amman.
- Luaces M. R. i in. 2004b. *A Generic Framework for GIS Applications*. Proc. of the 4th International Workshop on Web and Wireless Geographical Information Systems, Korea, s. 94–109.

- Marino J.S. 1979. *Identification of Characteristic Points Along Naturally Occurring Lines: An Empirical Study*. The Canadian Cartographer, No. 16, Issue 1, s. 70-80.
- McMaster R.-B., Comenetz J. 1996. *Procedure and Quality Assessment Measures for Cartographic Generalization*. GIS/LIS 1996, Proceedings, Denver, Colorado, USA, s. 775-785.
- Melkman A.A. 1987. *On-line Construction of the Convex Hull of a Simple Polyline*. Information Processing Letters, Vol. 25, No. 1, s. 11-12.
- Meng L. 1997. *Automatic Generalization of Geographic Data*. Technical Report, VBB Viak, Stockholm.
- Mioduszewski J. 2003. *Wykłady z topologii. Zbiory spójne i kontinua*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Molenaar M. 1989. *Single Valued Vector Vaps – a Concept in GIS*. Geo-Information Systems, Vol. 2, No. 1, s. 18-26.
- Molenaar M. 1990. *A Formal Data Structure for 3D Vector Maps*. Proceedings of EGIS'90, Vol. 2, Amsterdam, s. 770-781.
- Molenaar M. 1991. *Terrain Objects, Data Structures and Query Spaces*. [w:] Geo-Informatik, ed. Schilcher, M., Siemens-Nixdorf Informationssysteme A.G., Munchen, s. 53-70.
- Molenaar M. 1996. *Multi-Scale Approaches for Geo-Data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Vienna, s. 542-554.
- Mostafavi M. A., Gold C., Dakowicz M. 2003. *Delete and Insert Operations in Voronoi/Delaunay Methods and Applications*. Computers and Geosciences, Vol. 29, No. 4, s. 523–530.
- Muehrcke P. C. 1986. *Map Use: Reading Analysis and Interpretation*. JP Publications, Madison.
- Müller J. C. 1990. *The Removal of Spatial Conflicts in Line Generalization*. Cartography and Geographic Information Systems, Vol. 17, No. 2, s. 141 – 149.
- O'Rourke J. 1998. *Computational Geometry in C*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ostrowski W. 2001. *Semiotyczne podstawy uogólnienia kartograficznego*. Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.

- Pavlidis T. 1978. *A Review of Algorithms for Shape Analysis*. Computer Graphics and Image Processing, Vol. 7, s. 243-258.
- Pawlak W. 2001. *Od uproszczenia do syntezy kartograficznej*. Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Perkal J. 1958. *Próba obiektywnej generalizacji*. Geodezja i Kartografia, t. VII, z. 2, s. 130-142.
- Preparata F. P., Shamos M. I. 1985. *Geometria obliczeniowa. Wprowadzenie*. Helion, Gliwice.
- Ratajski L. 1973. *Metodyka kartografii społeczno – gospodarczej*. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa.
- Richardson D. E. 1993. *Automatic Spatial and Thematic Generalization Using a Context Transformation Model*. Rozprawa doktorska, Wageningen Agricultura University, R&B Publications, Ottawa.
- Rigaux P. i in. 2002. *Spatial Databases: With Application to GIS*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco.
- Robinson A., Sale R., Morrison J., 1978. *Podstawy kartografii*. PWN, Warszawa.
- Ruas A., Lagrange J. P. 1995. *Data and Knowledge Modelling for Generalization*. [w:] GIS and Generalization, ed. Müller J.C., Lagrange J.P and Weibel R., Taylor & Francis, London.
- Saalfeld A. 1999. *Topologically Consistent Line Simplification with the Douglas – Peucker Algorithm*. Cartography and Geographic Information Science, Vol. 26, No. 1, s. 7-19.
- Saliszczew K. A. 1976. *Kartografia ogólna*. PWN, Warszawa.
- Shea K. S., McMaster, R. B. 1989. *Cartographic Generalization in a Digital Environment: When and How to Generalize*. Proceedings Auto Carto 9. 9th International Symposium on Computer-Assisted Cartography, Baltimore.
- Thapa K. 1988. *Automatic Line Generalization Using Zero Crossings*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No.4, s. 511-517.
- Thompson P. J. 1989. *Data ith Semantics: Data Models and Data Management*. Van Nostrand Reinhold, New York.

- Tobler W. 1966. *Numerical Map Generalization*. [w:] Michigan Inter-University Community of Mathematical Geographers Discussion paper No. 8, ed. J. Nystuen, Ann Arbor, University of Michigan.
- Toussaint G. T. 1980. *The Relative Neighbourhood Graph of a Finite Planar Set*. Pattern Recognition, Vol. 12, No.4, s. 261-268.
- Weibel R., Jones C. B. 1998. *Computational Perspectives on Map Generalization*. GeoInformatica, Vol. 2, No.4, s. 307-314.
- Wu S. – T., Marquez M. R. G. 2003. *A Non-Selfintersection Douglas – Peucker Algorithm*. Computer Graphics and Image Processing, XVI Brazilian Symposium, s. 60-66.
- Wu S. – T., da Silva A. C. G., Marquez M. R. G. 2004. *The Douglas – Peucker Algorithm: Sufficiency Conditions for Non-Selfintersections*. Journal of the Brazilian Computer Society, Vol. 9, Fac. 3, s. 67-79.
- Yaolin L., Molenaar M., Tinghua A. 2001. *Frameworks for Generalization Constraints and Operations Based on Object-Oriented Data Structure in Database Generalization*. Proceeding of 20th International Cartographic Conference, Beijing.
- Żukowska M. 2005. *Obiektywna metoda upraszczania krzywych a niespójności topologiczne*. Geodezja, t. 11 z. 2, s. 365-372.
- Żukowska M. 2007a. *The MRDB Concept in the Context of Polish Georeference Databases, GIS and Automatic Cartographic Generalization*. Proceeding of Information Systems Architecture and Technology, Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 145-152.
- Żukowska M. 2007b. *Miejsce reguł i algorytmów usuwania konfliktów graficznych w trójwarstwowej architekturze systemów GIS*. Materiały Krakowskiej Konferencji Młodych Uczonych, UWND AGH, Kraków, s. 63-68.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Relacje między generalizacją modelu a generalizacją kartograficzną.....	9
Rys. 1.2. Algorytm Douglasa–Peuckera.....	15
Rys. 1.3. Metoda Chrobaka.....	16
Rys. 1.4. Przykłady konfliktów graficznych.....	19
Rys. 1.5. Systematyka konfliktów graficznych.....	20
Rys. 1.6. ϵ -generalizacja obszaru.....	21
Rys. 3.1. Konstrukcja okna poszukiwań.....	28
Rys. 3.2. Wielokąt gwiazdkształtny P i jego jądro J oraz wielokąt W zbudowany na podzbiorze wierzchołków P.....	30
Rys. 3.3. Łamana uproszczona bez (po lewej) oraz z wykorzystaniem wielokątów gwiazdkształtnych (po prawej) (Wu, Marquez 2003).....	31
Rys. 3.4. Podział łamanej na segmenty z wykorzystaniem jej otoczki wypukłej.....	31
Rys. 3.5. Niespójności topologiczne łamanej upraszczanej globalnie (a) oraz niespójności powstałe między upraszczanymi fragmentami gwiazdkształtnymi (b).....	32
Rys. 5.1. Hierarchia łączenia hydrografii (Źródło: Chrobak i in. 2007).....	41
Rys. 5.2. Hierarchia wynikająca z kolejnych ekstremów lokalnych.....	43
Rys. 5.3. Otoczki wypukłe kolejnych rzędów ((a) - otoczki rzędu 3-go) oraz rozbudowanie hierarchii o informacje z nimi związane (b).....	46
Rys. 5.4. Wpływ hierarchii i kolejności eliminacji konfliktów. Liczby na tym rysunku odpowiadają wartościom poziomów hierarchii punktów (symboliczny, jednocyfrowy zapis proponowanego algebraicznego sumowania wartości atrybutów).....	48
Rys. 5.5. Topologia zorientowanej linii łamanej.....	50
Rys. 5.6. Topologia obszarów: poprawna (a) oraz błędna (b).....	50
Rys. 5.7. FDS jednowartościowych map wektorowych w przestrzeni dwuwymiarowej (Źródło: (Richardson 1993)).....	52
Rys. 5.8. Bezwzględne sąsiedztwo dla obiektów powierzchniowych.....	53
Rys. 5.9. Bezpośrednie sąsiedztwo punktów.....	53
Rys. 5.10. Sąsiedztwo punktów uzależnione od zadanej odległości.....	54
Rys. 5.11. Sąsiedztwo obszarów względne, zależne od zadanej odległości.....	54
Rys. 5.12. Diagramy Voronoi (oznaczone kolorem czarnym) oraz triangulacja Delaunaya (oznaczona kolorem czerwonym) zbioru punktów (Źródło: http://pl.wikipedia.org).....	55
Rys. 5.13. Czterokrawędziowa struktura danych (Źródło: (Lischinski 1993)).....	58
Rys. 5.14. Porównanie grafów bliskości.....	61
Rys. 6.1. Wzajemna rozpoznawalność punktów.....	62
Rys. 6.2. Bufor odcinka.....	63
Rys. 6.3. Bufor łamanej.....	63
Rys. 6.4. Modyfikacja wielkości trójkąta elementarnego.....	65
Rys. 7.1. Identyfikacja konfliktów na zasadzie przeszukiwania grafu: triangulacja (a) oraz drzewo przeszukiwania wszerz (b).....	69
Rys. 7.2. Grupy konfliktów.....	70
Rys. 7.3. Ograniczenie przesunięcia punktu.....	72
Rys. 7.4. Wyszukiwanie grupy konfliktów.....	73
Rys. 7.5. Rozwiązanie grup konfliktów.....	76
Rys. 7.6. Ogólny schemat algorytmu upraszczania kształtu obiektów.....	77
Rys. 7.7. Wpływ ustlania niezmienników na proces upraszczania i rozwiązywania konfliktów.....	82
Rys. 7.8. Generowanie map w różnych skalach z pojedynczej oraz z wielu baz danych.....	84
Rys. 7.9. Trójwarstwowa architektura GIS (Źródło: (Żukowska 2007b)).....	85
Rys. 8.1. Sekwencyjne budowanie otoczki wypukłej łamanej.....	90
Rys. 8.2. Dodawanie kolejnego wierzchołka do otoczki wypukłej łamanej.....	90

Rys. 8.3. Ruchy do przodu i wstecz (a) oraz do środka i na zewnątrz (b).....	92
Rys. 8.4. Typu grup konfliktów.....	94
Rys. 8.5. Rozsuniecie wielu punktów.....	95
Rys. 8.6. Badanie istnienia dopuszczalnych przesunięć punktów.....	96
Rys. 8.7. Obliczanie możliwych przesunięć punktu.....	97
Schemat 1a. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 1.....	99
Schemat 1b. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 2.....	100
Schemat 1c. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 3.....	101
Schemat 1d. Uproszczony schemat blokowy algorytmu wykrywania i usuwania konfliktów graficznych wewnętrznych, część 4.....	102
Rys. 8.8. Granice użytków przed (a) i po (b) zastosowaniu uproszczenia (Źródło: (Kozioł, Żukowska 2007)).....	112
Rys. 8.9. Schemat blokowy algorytmu (Źródło: (Kozioł, Żukowska 2007)).....	113

SPIS TABEL

Tabela 7.1. Przykłady reguł i algorytmów związanych z konfliktami graficznymi	87
Tabela 8.1. Wyniki upraszczania łamanej otwartej w wybranym przedziale skal docelowych.....	104
Tabela 8.2. Wyniki upraszczania łamanej otwartej w wybranym przedziale skal docelowych.....	108

SPIS WYKRESÓW

Wykres 8.1. Średnie błędy długości a priori i a posteriori dla czterech rodzajów upraszczenia łamanej otwartej.....	105
Wykres 8.2. Zmiana średniego błędu długości a posteriori dla czwartego rodzaju upraszczenia, w porównaniu do wielkości najkrótszego boku trójkąta elementarnego w skalach wynikowych oraz do procentowej liczby punktów pozostałych w procesie.....	106
Wykres 8.3. Średnie błędy długości a priori i a posteriori dla czterech rodzajów upraszczenia łamanej zamkniętej.....	110
Wykres 8.4. Zmiana średniego błędu długości a posteriori dla czwartego rodzaju upraszczenia, w porównaniu do wielkości najkrótszego boku trójkąta elementarnego w skalach wynikowych oraz do procentowej liczby punktów pozostałych w procesie.....	110

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

A-1 – Wybrzeże Grecji, rysunek wejściowy, skala 1: 4 000 000.

A-2 – Wybrzeże Grecji, rysunki wyjściowe w skalach 1: 10 000 000, 1: 20 000 000 i 1: 50 000 000, w różnych wariantach upraszczania.

B-1 – Zalew Soliński, rysunek wejściowy, skala 1: 50 000.

B-2 – Zalew Soliński, rysunki wyjściowe w skalach 1: 100 000, 1: 200 000 i 1: 500 000, w różnych wariantach upraszczania.

C – Płyta CD – program testowy Upraszczenie v. 1.0.