VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS INSTITUTAS

Donatas SAULEVIČIUS

SAVAIMINGAI BESIFORMUOJANČIŲ PUSLAIDININKIŲ ELEMENTŲ ATPAŽINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
INFORMATIKOS INŽINERIJA (07T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2004 – 2008 metais Matematikos ir informatikos institute.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Laimutis TELKSNYS (Matematikos ir informatikos institutas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T).

http://leidykla.vgtu.lt
VGTU leidyklos TECHNIKA 1638-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-438-3

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2009
© Saulevičius, D., 2009
Autoriaus el.paštas *donatas@ktl.mii.lt*

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF MATHEMATICS AND INFORMATICS

Donatas SAULEVIČIUS

RECOGNITION OF SELF-FORMED SEMICONDUCTOR ELEMENTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
INFORMATICS ENGINEERING (07T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Institute of Mathematics and Informatics in 2004 – 2008.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Laimutis TELKSNYS (Institute of Mathematics and Informatics, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T).

Reziumė

Elektronikos pramonėje ir integruotų schemų gamyboje pastaruoju metu plinta naujos savaimingo formavimosi technologijos. Mikroelektronikos, nanotechnologijos, fotogalvanikos objektų topologinė analizė įgalina jų sintezę ir tyrimus. Masinės savaimingo formavimosi objektų gamybos atveju aktualia problema tampa jų struktūrų tinkamumo analizė. Disertacijoje pateikta savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų analizė. Pristatoma idėja, kaip naudoti kokybinės struktūros analizės teorijos formalizmus savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui.

Disertacijoje aprašomas sukurtas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas bei atpažinimo sistemos algoritmas. Sukurto atpažinimo sistemos metodo ir algoritmo pagrindu buvo sukurta kompiuterinė savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programa.

Darbe aprašoma sukurta savaimingai besiformuojančių puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo programinė įranga, taip pat aprašyti eksperimentiniai puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo tyrimai.

Sukurta programinė įranga yra lanksti ir tinkama bet kokiems savaimingai besiformuojantiems dvimačiams elementams atpažinti, jei elementų kokybę galima vertinti pagal jų struktūras sudarančias medžiagas ir tų medžiagų tarpusavio ryšius.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir literatūros sąrašas. Disertacijos skyriai: Analitinė vaizdų atpažinimo metodų apžvalga, Kokybinė struktūros analizė puslaidininkių elementų atpažinimui, Puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistema, Atpažinimo sistemos eksperimentiniai tyrimai.

Tyrimų rezultatai publikuoti dviejuose Lietuvos mokslo tarybos patvirtinto sąrašo tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose. Disertacijos tema atspausdinti 2 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, įtrauktuose į ISI sąrašą.

Abstract

The new sefl-formation simulation technologies for electron devices and integrated circuit manufacturing were developed. The topological approach allows analysis and synthesis of the real world structures, known in the areas of microelectronics, nanotechnology, photovoltaic and fuel cell technology. Self-formation simulation results are two-dimensional geometric figures from the Euclidean space.

The recognition system is necessary to reduce the volume of work and speed up the analysis in the decision making process for classifying self-formed artificial objects. The main task for a recognizer is to analyze the generated semiconductor elements by the proposed criteria, to classify them and output results. The proposed criteria for a qualitative evaluation of such results are based on the theory of Qualitative Spatial Reasoning.

The system of semiconductor elements recognition realized and discussed in this work, could be flexible for recognizing any self-formed two-dimensional structures, if the suitability of elements can be described by the participation of the substances within the structure and by the connections between substances.

The scientific work consists of four chapters, the list of publications and two appendixes. The total scope of dissertation is 116 pages, 42 pictures, 8 tables and 2 appendixes. The dissertation is written in Lithuanian.

The main results were published in two reviewed periodical publications from the list approved by the Science Council of Lithuania. The results were presented in one international conference and in seminars of the Institute of Mathematics and Informatics.

Savokos

Pagrindinės sąvokos

Savaimingai besiformuojantis puslaidininkis elementas – šiame darbe – automatiškai, imituojant savaimingo formavimosi (evoliucijos) procesus, generuojamas dvimatis geometrinis objektas.
Savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūra – šiame darbe – automatiškai generuojamo dvimačio geometrinio objekto sandara.
Savaimingas formavimasis – objekto evoliucijos topologinė aproksimacija.
Šablonas – pavyzdys, pagal kurį gaminami vienodi daiktai.

Pagrindinių terminų vertimai

Back-Propagation Neural Network – grįžtamasis neuroninis tinklas.
Boundary extraction – ribų (kontūrų) radimas.
Everyday intuition about space – įprastinis erdvės suvokimas.
Hough transform – Hough transformacija.
Learning similarity – panašumų nustatymas.
Qualitative reasoning – kokybinė samprata.
Qualitative spatial reasoning – kokybinė erdvinė samprata.
Random recurrent neural networks – atsitiktiniai rekursiniai neuroniniai tinklai.
Region of interest – nagrinėjama sritis.
Regional connection calculus – regionų – ryšių teorija.
Recognition by components – atpažinimas pagal komponentus.
Seed Filling – užpildymas sėklomis.
Self-formation – savaimingas formavimasis.
Support Vector Machine – atraminių vektorių klasifikatorius.

Žymėjimai

Santrumpos

AI – Artificial Intelligence (dirbtinis intelektas).
BPNN – Back-Propagation Neural Network (grįžtamasis neuroninis tinklas).
C-SAM – C-mode Scanning Acoustic Microscopy (C-modos skanavimo akustinis mikroskopas).
CAD – Computer-Aided Design (projektavimas kompiuteriu).
CORDIC – Coordinate Rotation Digital Computer (koordinačių pokyčių skaičiavimai).
DC – Disconnected (nesiliečia).
EC – Externally Connected (išoriškai liečiasi).
EQ – Identical (lygūs).
FD – Face detection (veido radimas).
GIS – Geographic Information system (geografinė informacinė sistema).
HSI – Hue, saturation, intensity (atspalvis, prisotinimas, intensyvumas).
HT – Hough Transform (Hough transformacija).
IR – Image retrieval (vaizdo paieška).
JEPD – Jointly Exhaustive and Pairwise Disjoint (bendrai išsamus ir dalinai išskirstytas).
KES – Kokybinė erdvinė samprata.
KS – Kokybinė samprata.
MOS – Metal Oxide Semiconductor (metalo oksido puslaidininkis).
MTM – Mathematical Transform to Munsell (Munsell matematinė transformacija)
NTPP – Nontangential Proper Part (netangentinė dalis).
O – Overlaps (persidengia).
P – Part (dalis).
PO – Partially Overlaps (dalinai persidengia).
PP – Proper Part (visiška dalis).
QSR – Qualitative spatial reasoning (kokybinė erdvinė samprata).
RBC – Recognition by components (atpažinimas pagal komponentus).
RCC – Regional connection calculus (regionų – ryšių teorija).
RGB – Red, Green, Blue (raudona, žalia, mėlyna).
RRNNs – Random recurrent neural networks (atsitiktiniai rekursiniai neuroniniai tinklai).
SVM – Support Vector Machine (atraminių vektorių klasifikatorius).
TPP – Tangential Proper Part (tangentinė dalis).
VLSI – Very Large Scale Integration (labai didelė integracija).

Turinys

ĮVADAS 1
Tiriamoji problema 1
Darbo aktualumas 2
Problemos formulavimas 2
Tyrimų objektas 2
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 3
Tyrimų metodika 3
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė 4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 4
Darbo rezultatų aprobavimas 5
Disertacijos struktūra 5

1. VAIZDŲ ATPAŽINIMO METODŲ ANALITINĖ APŽVALGA 7
1.1. Šablonų atpažinimo tyrimai 7
1.2. Regionų ir erdvinių ryšių tarp jų samprata. Regionų-ryšių teorija RCC 31
1.3. Pirmojo skyriaus išvados 39

2. KOKYBINĖ STRUKTŪROS ANALIZĖ SAVAIMINGAI BESIFORMUOJANČIŲ PUSLAIDININKIŲ ELEMENTŲ ATPAŽINIMUI 41
2.1. Atpažinimo uždavinio formulavimas 42
2.2. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų požymiai 47
2.3. RCC taikymas topologiniam šablonų atpažinimui 48
2.4. Antrojo skyriaus išvados 52

3. SAVAIMINGAI BESIFORMUOJANČIŲ PUSLAIDININKIŲ ELEMENTŲ STRUKTŪRŲ ATPAŽINIMO SISTEMA 53
3.1. Atpažinimo sistemos koncepcinis modelis 53
3.2. Atpažinimo sistemos algoritmas 60
3.3. Trečiojo skyriaus išvados 72

4. ATPAŽINIMO SISTEMOS EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI 73
4.1. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programinė įranga 74
4.2. Atpažinimo eksperimentai 78
4.3. Programinės įrangos savybių apibendrinimas 84
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados 85

BENDROSIOS IŠVADOS 87

LITERATŪROS SĄRAŠAS 89

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS 97

PRIEDAI 99
A priedas. Puslaidininkių elementų atpažinimo kompiuterinės programos „BMPRCCv1“ funkcijos 99
B priedas. Puslaidininkių elementų atpažinimo kompiuterinės programos „BMPRCCv1“ papildymas 105

Įvadas

Tiriamoji problema

Elektronikos pramonėje ir integruotų schemų gamyboje įsigali naujos savaimingo formavimosi technologijos. Savaimingo formavimosi objekto struktūra gali būti suvokiama kaip dvimatis vientisos sandaros molekulinio arba atominio lygmens objektas.

Objekto savaimingas formavimasis yra negrįžtamasis virsmas dėl savaimingo formavimosi metu didėjančio objekto kompleksiškumo. Savaimingas formavimas gali būti apibrėžtas kaip objekto evoliucijos dėsnių visuma, nepriklausomai nuo naudojamų medžiagų ir fizinių ar cheminių procesų. Savaimingo formavimosi teorija yra matematinė evoliucijos išraiška, t.y. objekto topologinė dinamika. Praktikoje savaimingas formavimasis gali būti suprantamas kaip teorinė gamybos technologija.

Dirbtinių objektų savaimingam formavimuisi naudojamos heterogeninės reakcijos: graviravimas, difuzija, implantavimas, oksidacija, pašalinimas, padengimas, apšvietimas (Nicolis *et al.* 1977; Haken 1978; Prigogine 1986; Rasmussen *et al.* 2003; Rasmussen *et al.* 2001; Wolfram 2002). Panašūs principai naudojami ir savaimingam puslaidininkių elementų formavimuisi.

Šio darbo tyrimų sritis – puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi procesas ir tiriamų rezultatų – puslaidininkių elementų struktūrų – analizė jų atpažinimo automatizavimui.

Darbo aktualumas

Naudojantis savaimingo formavimosi pagrindais buvo sukurtos naujos puslaidininkių prietaisų ir integruotų schemų gamybos technologijos. Savaimingo formavimosi dirbtinės plokščios sistemos imitacijos rezultatas yra atsitiktiniai spalvoti dvimačiai paveikslėliai – šablonai. Tokie šablonai galimi efektyvesnių puslaidininkių prietaisų ar integruotų schemų modeliai. Būtina pabrėžti, kad savaimingo formavimosi plokščių sistemų rezultatų automatinio atpažinimo procesai smarkiai sumažintų darbo sąnaudas ir pagreitintų tokių sistemų modeliavimo procesus.

Taip pat svarbu tai, kad tokie procesai suteikia naujų galimybių tobulinti plokščių sistemų atrankos kokybę. Inžinierius gali skirti daugiau dėmesio detalesnei savaimingo formavimosi sistemos savybių analizei.

Darbe sprendžiama problema – yra savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo automatizavimas.

Problemos formulavimas

Elektronikos pramonėje, integruotų schemų gamyboje pastaruoju metu plinta naujos savaimingo formavimosi technologijos. Realaus pasaulio, pavyzdžiui, mikroelektronikos, nanotechnologijos, fotogalvanikos objektų topologinė analizė sudaro sąlygas tokių objektų sintezei ir tyrimams. Masinės savaimingo formavimosi objektų gamybos atveju aktualia problema tampa jų struktūrų tinkamumo keliamiems reikalavimams analizė.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūros.

Mikroelektronikos technologijoje egzistuoja tam tikrų objektų (pavyzdžiui, puslaidininkių elementų) savaimingo formavimosi sistema, kurios rezultatas yra atsitiktiniai spalvoti dvimačiai paveikslėliai – šablonai, turintys tam tikrą struktūrą, sąlygotą tam tikrų įvesties parametrų ir savaimingo (evoliucinio)

formavimosi proceso rezultato. Inžinieriaus vertinimu vienas iš tokių šablonų gali būti tinkamas, o kitas netinkamas, t. y. gali atitikti arba ne tam tikras inžinieriaus nustatytas sąlygas. Darbe nagrinėjamos savaimingai besiformuojančių saulės elementų struktūros.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimas.

Darbo uždaviniai

Tam, kad būtų pasiektas tikslas, sprendžiami tokie uždaviniai:

1. Sukurti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodą ir algoritmą;
2. Sukurti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūras atpažįstančią programinę įrangą;
3. Eksperimentiškai patikrinti programinės įrangos tinkamumą.

Tyrimų metodika

Disertacijos teoriniams tyrimams atlikti naudojami lyginamosios analizės, indukcijos ir eksperimentinio tyrimo metodai. Lyginamosios analizės metodai naudojami specifinių savybių dvimačių vaizdų atpažinimo metodų įvairovei analizuoti. Tokiu būdu pasirinktas metodas pritaikomas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui panaudojant dedukcijos ir indukcijos metodus. Dedukcija naudojama metodui specializuoti, atsižvelgiant į savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų ypatumus, indukcija – konkretiems atpažinimo ir klasifikacijos metodams apibendrinti. Indukcijos metodas taip pat naudojamas ir autoriaus turimai bei literatūroje aprašytai konkrečių dvimačių vaizdų atpažinimo patirčiai apibendrinti.

Eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo naudojama paties sukurta tyrimams skirta programinė įranga BMPRCCv1. Programinė įranga realizuota C++ kalba, naudojant Visual Studio .NET 2003 aplinką.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

1. Sukurtas savaimingo formavimosi sistemos koncepcija paremtas puslaidininkių elementų atpažinimo metodas, grindžiamas regionų-ryšių teorija (RCC).
2. Naudojantis suformuluota požymių sistema bei atpažinimo metodu, sukurtas savaimingai besiformuojančių puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo sistemos algoritmas.
3. Sukurta savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programinė įranga, vertinanti puslaidininkių elementų struktūrų tinkamumą.
4. Eksperimentiškai patikrinta savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programinės įrangos praktinė nauda.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų analizės metodas leidžia formuluoti bet kokių savaimingai besiformuojančių dvimačių paveikslėlių atpažinimo uždavinį. Šis rezultatas ypač naudingas kuriant įvairių gamybai skirtų puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistemas. Automatizuotas puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimas gali padėti:

- pagreitinti kokybiškų puslaidininkinių elementų struktūrų atrinkimą;
- sumažinti inžinierių darbo sąnaudas;
- gauti aukštesnės kokybės atrankos rezultatus.

Šiame darbe aprašytas metodas nepriklausomas nuo generuojamojo elemento paskirties, todėl ateityje jis gali būti pritaikomas ir kitokių elementų struktūrų atpažinimo sistemų kūrimui.

Ginamieji teiginiai

1. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų požymių aibę sudaro tų elementų struktūrą sudarančios medžiagos (regionai) ir ryšiai tarp jų.
2. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų analizei vykdyti naudotinos ne tradiciškai paplitusios analizės iš taško

perspektyvos, bet elementų struktūrą sudarančių erdvinių primityvų – regionų kokybinė analizė.

3. Pasiūlyta kokybinės analizės teorija ir sukurtas atpažinimo sistemos metodas yra tinkamas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui.
4. Sukurta savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistema gali būti pritaikoma bet kokioms savaimingai besiformuojančioms dvimatėms struktūroms atpažinti, jei elementų kokybę galima vertinti pagal jų struktūras sudarančias medžiagas ir tų medžiagų tarpusavio ryšius.

Darbo rezultatų aprobavimas

Tyrimų rezultatai publikuoti dviejuose Lietuvos mokslo tarybos patvirtinto sąrašo tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose. Disertacijos tema atspausdinti 2 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, įtrauktuose į ISI sąrašą (Saulevičius *et al.* 2009a, Saulevičius *et al.* 2009b).

Tarpiniai disertacijos rezultatai pristatyti:

- Pranešimuose tarptautinėse konferencijose
  - Informatikų vasaros mokykla „Modernios duomenų gavybos ir analizės technologijos“. 2007 09 09 – 2007 09 15 d.d., Druskininkai, Lietuva
- Seminaruose Matematikos ir Informatikos Institute (MII);

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai ir literatūros sąrašas. Disertacijos skyriai: Analitinė vaizdų atpažinimo metodų apžvalga, Kokybinė struktūros analizė puslaidininkių elementų atpažinimui, Puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistema, Atpažinimo sistemos eksperimentiniai tyrimai, Bendrosios išvados, Rezultatų apibendrinimas.

Įvade išdėstytas disertacijos tyrimo objektas, temos aktualumas, suformuluotas darbo tikslas, aprašyti tyrimo metodai, mokslinis naujumas, praktinė reikšmė, darbo rezultatų aprobavimas, aprašyta darbo struktūra bei turinys.

Pirmajame skyriuje pateikiama dvimačių paveikslų (šablonų) apdorojimo metodų analitinė apžvalga, apžvelgiant vaizdų apdorojimo ir atpažinimo metodus. Taip pat detaliai aptariama regionų erdvinių ryšių samprata ir konkretus jos taikymo formalizmas – RCC.

Antrajame skyriuje išsamiai aprašytas savaimingo formavimosi sistemos koncepcija paremtas puslaidininkių elementų atpažinimo metodas naudojant RCC taisykles. Taip pat suformuluota puslaidininkių elementų požymių sistema.

Trečiajame skyriuje aprašomas sukurtas savaimingai besiformuojančių puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo sistemos algoritmas.

Ketvirtajame skyriuje aprašomas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistemos veikimas, atskiri eksperimentiniai tyrimai, bei pateikiami kiekvieno jų rezultatai ir išvados.

Išvadose pateiktos disertacijos darbo išvados. Rezultatų apibendrinime pateikiami apibendrinti disertacijos darbo tyrimų rezultatai. Nurodomos disertacijos tyrimų tęsimo perspektyvos.

Prieduose pateikiami programinės įrangos algoritmai C++ programavimo kalba ir paveikslai.

Disertacijos apimtis 116 puslapių, 42 paveikslai ir 8 lentelės.

1

Vaizdų atpažinimo metodų analitinė apžvalga

Savaimingo puslaidininkių elementų formavimosi rezultatas yra dvimačiai paveikslėliai, kurių struktūros vaizduojamos spalviniais regionais. Toks vaizdų pateikimo būdas inžinieriui, priimančiam sprendimus, vizualiai aiškiai suprantamas. Be to, toks struktūros kodavimo būdas priimtinas ir kompiuteriui, automatizuojant puslaidininkių elementų struktūrų analizę.

Savaimingai besiformuojančių dvimačių spalvotų paveikslėlių – šablonų atpažinimas yra pagrindinis analizės tikslas. Tam pirmiausia būtina apžvelgti ir pasirinkti tinkamą metodą šablonų požymių nustatymui ir atpažinimui, atsižvelgiant į tokių šablonų tinkamumo gamybai vertinimą ir tų struktūrų specifiką.

1.1. Šablonų atpažinimo tyrimai

Viena iš sudėtingiausių vaizdų apdorojimo problemų yra jų segmentavimas – vaizdo dalijimo į prasmingus regionus procesas. Nepaisant daugybės žinomų skirtingų segmentavimo technikų, nėra vienos bendrosios segmentavimo teorijos.

Segmentavimo procesas yra vaizdo duomenų, gautų per sensorinius įrenginius, radimas ir kiekybiškas jų matavimų įvertinimas (Sankowski *et al.* 2001). Pagrindinis klausimas – kas yra naujieji vienetai, primityvai, į kuriuos padalijamas paveikslas. Kol tokie primityvai nėra apibrėžti, tol segmentavimo proceso realizavimas taip pat negali būti apibrėžtas. Štai kodėl segmentavimo procesas susijęs su paveikslo primityvais.

Galimi du primityvų pasirinkimo būdai:

- Vienas atskiras primityvas:
  - regionas: homogeniškas, vienspalvis
  - kontūras: vientisa linija
- Keletas primityvų, tiek kiek to reikalauja vaizdas paveiksle:
  - regionas: sutartas paviršiaus vaizdavimas tam tikra spalva
  - kontūras: sutartas kreivės vaizdavimas

Pirmojo metodo pranašumas yra primityvų aptikimo paprastumas. Trūkumas tas, kad duomenys gana skurdūs ir nesegmentuojami. Antrojo metodo pranašumas tas, kad segmentavimo proceso rezultatas tikroviškesnis, o trūkumas yra jo sudėtingumas – metodas sudėtingai realizuojamas ir kartais gaunami netikslūs rezulatai.

Literatūroje pasiūlyta nemažai vaizdų segmentavimo metodų, skirtų tam tikriems paveikslų tipams. Juos būtų galima sugrupuoti taip:

Segmentavimas atskiriant regionus – metodo idėja yra paveikslo padalijimas į atskirus nesusijusius regionus.

Segmentavimas sujungiant regionus – šis metodas priešingas regionų atskyrimui. Pirminės mažos sritys pagal tam tikrus kriterijus iteraciškai „auginamos“ iki baigtinių primityvų.

Segmentavimas pagal kontūro (regiono ribos) radimą – ši segmentavimo rūšis naudojasi netolydumais (trūkiais) paveiksle. Yra sukurta nemažai metodų kontūrų radimui, priklausomai nuo to, koks paveikslo tipas. Daugelis šių metodų naudoja gradientinius skaičiavimus, kurie itin jautrūs triukšmui.

Paprastai segmentavimo procesas priklausomas nuo užduoties ir nuo matavimų pobūdžio, tačiau bendruoju atveju išlieka tas pats principas, kad „geras segmentavimas“ yra subjektyvus dalykas, priklausantis nuo suvokimo ir interpretavimo.

Bendrosios segmentavimo procedūros yra pagrįstos analizuojamojo paveikslo pilkumo lygmens skirtumais ir, paprastai, šiam tikslui naudojama pilkumo lygmens histograma (Balossino *et al.* 2001). Iš tikrųjų histograma parodo pilkumo lygmenų dažnį įvesties paveiksle ir nustato, ar yra skirtingo

pilkumo lygmens sričių. Šiuo atveju galima įvertinti bent jau dvi skirtingas pasiskirstymo sritis. Tinkamiausiu būdu pasirinkus pilkumo lygmens slenksčio reikšmę tarp histogramos maksimumų ir priskyrus žymę ‘0’ pilkiems lygmenims, esantiems žemiau slenksčio, ir žymę ‘1’ pilkiems lygmenims, esantiems aukščiau slenksčio, gaunamas binarinis paveikslas. Jei egzistuoja daugiau kaip du maksimumai, būtinas papildomas slenkstis. Atitinkamai priskiriama papildoma žymė ‘2’, ’3’ ir taip toliau.

Slenksčio paieška gali būti rankinė arba vykti automatiškai.

Slenksčio parinkimui gali būti naudojami skirtingi metodai.

- Daugelis procedūrų suprojektuotos optimaliam tiktai vieno slenksčio nustatymui. Paprastai modifikuoti procedūras daugialypių slenksčių paieškai nėra sudėtinga.
- Slenksčio parinkimo procedūros nenaudoja jokios informacijos apie vaizdo turinį. Tokiu būdu teisingai jos veikia tik tuomet, jei garantuojama, kad reikšmingi regionai vaizduojami panašaus pilkumo lygmeniu. Tokiu atveju regionas vaizduojamas histogramos maksimumu.

Slenksčio parinkimą vykdyti rankiniu būdu praktiškai geriau todėl, kad tokiu atveju slenkstis gali būti pasirinktas žymiai tiksliau ir klasifikavimo klaidų gali pasitaikyti labai nedaug. Bet kokiu atveju, slenksčio parinkimo procedūra kaip šalutinį rezultatą sukuria objektų kontūrus. Jiems pašalinti gali būti panaudotas morfologinis vaizdo apdorojimas.

Kitas naudotinas segmentavimo būdas yra objekto kontūro nustatymas. Šiuo atveju naudojamas gradientas. Gradiento operatorius sukuria pilkumo lygmens skirtumų reikšmę, taip pat ir didžiausių pilkumo lygmenų skirtumų kryptis. Nors gradiento dydžio reikšmė plačiai panaudojama, gradiento kryptis yra labiau svarbi. Tam, kad būtų gautas informatyvesnis vaizdavimas, gradiento kryptis dažnai pasukama 90°: kryptis sulygiuojama su kontūro kryptimi, kad aukštesni pilki lygmenys būtų į dešinę pusę nuo kontūro.

Gradiento operatorių parinkime yra du svarbūs parametrai: maskavimo dydis ir maskavimo koeficientai. Siekiama pasirinkti kiek įmanoma idealesnį gradiento operatorių. 5x5 dydžio maskavimas praktiškai duoda pakankamai gerus rezultatus; didesnis maskavimo dydis tik nežymiai tuos rezultatus gerina. Jeigu paveiksle yra palyginti didelių objektų ir jei triukšmas paveiksle gana didelis, tai rekomenduojamas 9x9 dydžio maskavimas. Tačiau kiekvienam atvejui maskavimo koeficientų nustatymas yra unikalus. Vis dėlto, pagal *Sobel* idėją, koeficientų mažėjimas maskavimo kontūro kryptimi daugumai atvejų yra pakankamas. Naudingesnis metodas segmentavimui realizuoti yra tik *Hough* transformacija.

Vaizdų segmentavimas turi daug potencialių taikymo sričių. Tokie tyrimai labai plačiai naudojami medicinoje, geografinėse sistemose, integruotų schemų gamyboje. Taip pat tokie metodai gali būti taikomi savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų atpažinime. Šiame skyriuje apžvelgsiu darbus, kurie nagrinėja atskirų objektų dvimačiuose paveiksluose – šablonuose identifikaciją.

1.1.1. Vaizdo dalijimas į vienarūšes sritis (regionus)

Wei-Ying Ma ir B. S. Manjunath (Ma *et al.* 1998) aprašo stambių, iš oro darytų fotografijų peržiūrai skirtą vaizdų apdorojimo sistemą, naudojančią vaizdų struktūros analizę. Esminius šios sistemos komponentus sudaro vaizdo struktūros požymių nustatymas, vaizdo dalijimas ir grupavimas, panašumų nustatymas bei greitai paieškai ir indeksavimui skirtas struktūros tezauro modelis. Fotografijų peržiūrai skirta vaizdų apdorojimo sistema grafiškai pavaizduota 1 pav. Struktūros požymiai apskaičiuojami filtruojant vaizdą su *Gabor* filtrų grupe. Tai daroma pradedant nuo struktūros gradiento skaičiavimo ir baigiant kiekvienos didelės oro nuotraukos padalinimu į vienarūšes sritis. Naudojamas hibridinis neuroninis algoritmas, skirtas nustatyti vizualųjį panašumą, klasterizuojant šablonus pagal požymių rinkinį. Panašumų nustatymas smarkiai padidina paieškos greitį. Galiausiai, kombinuojant panašumų nustatymo algoritmą su hierarchine kiekybinio vektoriaus įvertinimo schema, sukuriamas paveikslo struktūros tezauras. Šis tezauras lengvina indeksavimo procesą, užtikrina greitesnį ir tikslesnį paieškos veikimą. Bandomieji rezultatai įrodė paieškos sistemos robastiškumą didelių oro fotonuotraukų rinkinių ir skirtingų geografinių požymių turinčių vaizdų, pavyzdžiui, gyvenamųjų namų rajonų, automobilių stovėjimo aikštelių, magistralių, oro uostų atpažinimo atvejais. Autoriai pristato vaizdo struktūros, kaip vizualaus primityvo, naudojimą iš oro darytų fotografijų paieškai ir analizei.

Didėjant paveikslų kiekiui geografinėse duomenų bazėse, reikia sukurti įrankius efektyviai informacijos analizei bei paveikslo duomenų paieškoms ir valdymui, kad galimas sukauptų paveikslų panaudojimas būtų pilnai realizuotas. Reikalinga technika, kurią naudojant būtų galima užtikrinti paveikslo požymių nustatymą charakteringiems paveikslų atributams aprašyti, pavyzdžiui, struktūrai, formai/kontūrui, spalvinei/multispektrinei informacijai, taip pat kad būtų galima realizuoti efektyvią paiešką ir indeksavimą diaugiadimensėje požymių erdvėje. Darbe bandoma parodyti, kad struktūra gali būti naudojama dideliam kiekiui geografiškai svarbių požymių nustatyti, kurie gali apimti augmenijos struktūrą, automobilių stovėjimo vietas ir statybų eigą. Siekiant surasti panašių struktūrų vaizdus duomenų bazėje galima naudotis struktūros primityvais kaip vizualiais požymiais.

Skirtumas tarp taikomųjų programų, skirtų paveikslų paieškai duomenų bazėse, ir tradicinių šablonų klasifikavimo metodų yra tas, kad šiuo atveju cikle dalyvauja žmogus (vartotojas) ir kad čia reikia išrinkti ne tik geriausius pavyzdžius. Tipiškose taikomosiose programose surasti pavyzdžiai turės aukštesnį rangą priklausomai nuo jų struktūrų panašumo į užklausos šabloną. Šablonų palyginimas požymių erdvėje turėtų išsaugoti regimuosius struktūrų panašumus. Turiniu pagrįstose vaizdų paieškose tai yra svarbus, bet sudėtingai sprendžiamas uždavinys. Šiam uždaviniui spręsti siūlomas neuroninio tinklo algoritmas, skirtas struktūrų panašumų požymių erdvėje analizei. Šis metodas naudoja mokomuosius duomenis, turinčius savyje šablonų klasės informaciją, kuri padalija požymių erdvę į daugelį vizualiai panašių grupių. Bandomieji rezultatai parodė, kad tokiu būdu gali būti pasiektas žymiai geresnis paieškų vykdymas. Papildomas šio metodo pranašumas yra tas, kad jis realizuoja efektyvų indeksavimo medį, skirtą apriboti paieškos erdvę. Suderinus apmokymą su hierarchine kokybinio vertinimo vektoriaus schema, sukuriamas paveikslų tekstūrų tezauras, skirtas struktūrų paieškai pagreitinti.

Svarbiausia šio darbo reikšmė yra įvairių komponentų identifikavimas, kurie reikalingi sistemai realizuoti ir didelės struktūrų tezauro turiniu pagrįstos paveikslų kolekcijos paieškai įgyvendinti. Naujas šios sistemos ypatybes sudaro greitas struktūros kontūro krypties vaizdo segmentavimo procesas ir hibridinio neuroninio tinklo algoritmo naudojimas, užpildantis vaizdų struktūros tezaurą.

Paveikslų analizę apima:

Paieškai reikalingi struktūrų požymiai. Ankstesniame darbe buvo pasiūlyta *Gabor* struktūros požymių nustatymo schema. Bandomieji tyrimai parodė, kad *Gabor* požymiai užtikrina gerą struktūrų paieškų tikslumą.

Paveikslų segmentavimas ir grupavimas. Aero fotonuotraukų duomenų bazė, naudota bandymuose, sudaryta iš paveikslų, kurie yra 5000 X 5000 pikselių dydžio. Supaprastinant, pirminiame etape paveikslai buvo padalinti į 64 X 64 pikselių blokus, tokiu būdu rezultate gauname apytiksliai 6400 blokų vaizde. Kiekvienam blokui, naudojant *Gabor* algoritmą, apskaičiuojamas struktūros požymių vektorius. Kompaktiškesnis paveikslo atvaizdavimas gali būti realizuojamas sugrupuojant struktūriškai panašius blokus. Pasiūlyta schema naudoja struktūros *Gabor* požymius, nustatytus paveikslo blokams, ir įvykdo stambų paveikslo segmentavimą pagal lokalios struktūros gradientą.

Lokalių struktūrų gradientų skaičiavimai. Naudojant požymių vektorius lokalus struktūros gradientas apskaičiuojamas tarp kiekvieno paveikslo bloko ir jo aštuonių kaimynų. Dominuojanti srauto kryptis identifikuojama konkurencijos būdu, kuris yra panašus į „winner-takes-it-all“ vaizdavimą. Tai vadinama *struktūros kontūro srautu*, kadangi gradiento informacija sklinda į kaimyninius

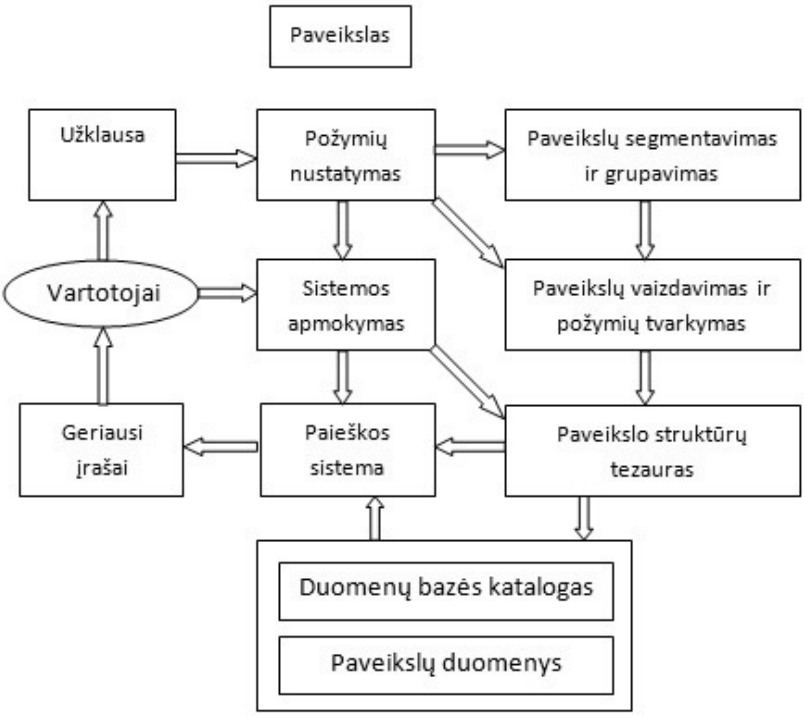
pikselius (ar blokus) ir šis struktūros kontūro srautas savyje turi informaciją apie (erdvinę) kryptį ir lokalios struktūros ribos energiją.

Struktūros kontūrų krypčių nustatymas. Po orientacinio konkuravimo lokalios struktūros kontūro srautas pritaikomas jo kaimynams, jei jie turi tą pačią kryptinę orientaciją. Tokiu būdu srautas plinta tol, kol sutinka priešingą srautą. Tai leidžia nustatyti tikslias kontūrų padėtis ir sukoncentruoti kontūro energiją į paveikslo elementų kontūrus, kur galimai jos ir egzistuoja.

Ribų radimas. Po to, kai kontūrų plitimas pasiekia stabiliąją būseną, paskutinės struktūros kontūro srauto energija panaudojama ribos nustatymui. Tai padaroma sujungiant krašto signalus tarp dviejų kaimyninių paveikslo blokų, jei kikevieno jų paskutinio struktūros kontūro srautas nukreiptas priešingomis kryptimis. Struktūros kontūro energija apibrėžiama susumuojant struktūros kontūrų srautų energijas dviejuose kaimyniniuose vaizdo blokuose.

Regionų sujungimas. Ankstesnio etapo rezultatas yra daugybė nevientisų kontūrų paveiksle. Jie sujungiami taip, kad suformuotų pradinį paveikslo regionų kompleksą. Galiausiai naudojamas konservatyvus sričių sujungimo algoritmas, skirtas panašiems kaimyniniams regionams sugrupuoti.

Regiono struktūros požymiai. Po to, kai paveikslas suskirstytas į dalis, tam, kad būtų sukonstruoti atitinkami regiono struktūros požymiai, naudojami išfiltruoti kiekvieno paveikslo regiono vidurkio ir standartinis *Gabor* nuokrypiai.



1 pav. Stambių iš oro darytų fotografijų peržiūrai skirta vaizdų apdorojimo sistema, naudojanti vaizdų struktūros analizę

1.1.2. Kontūrų nustatymas objekto atpažinimui

Kontūrų nustatymas yra pagrindinė daugelio vaizdų analizės operacijų užduotis. Arnaldo J. Abrantes ir Jorge S. Marques autorių darbe (Abrantes *et al.* 1996) apibūdinama klasė, aprašanti priverstinio klasterizavimo algoritmus objekto ribų radimui, kuriuos sudaro keli žinomi algoritmai, skirti skirtingiems uždaviniams spręsti (deformuoti modeliai, priverstinis klasterizavimas, duomenų išdėstymas). Objekto kontūrų radimas yra viena iš pagrindinių užduočių daugelyje kompiuterinių vaizdų analizės sistemų. Dažniausiai šią užduotį sudaro kontūrų radimo ir kraštų sujungimo funkcijos. Kontūrų radimas yra žemo lygio operacija, kuri analizuoja kiekvieną paveikslo tašką pagal tiriamo vaizdo ypatybes. Kontūrų taškai, aptikti šios operacijos metu, gali būti klaidingi arba nepakankami dėl keleto priežasčių, pavyzdžiui, dėl paviršinių nutrūkimų, struktūros, apšvietimo, užtvaros ar triukšmo. Todėl kontūrų sujungimo operacija

turi sugebėti atskirti taškus, priklausančius objekto kontūrui, nuo tų, kurie priklauso kitiems šaltiniams (objektams) ir interpoliuoti tarpus. Tai yra sudėtinga užduotis, ties kuria vaizdų apdorojimo sistemų bendruomenėse buvo koncentruojamasi kelis dešimtmečius. Šios problemos sprendimui paprastai naudojamos dvi skirtingos strategijos:

- *požiūris iš apačios*, kuomet bandoma sujungti kontūrų taškus pagal lokalias tęstinumo ir lygumo reikšmes be jokios išankstinės informacijos apie objekto formą ir
- *požiūris iš viršaus*, pagrįstas tiksliu objekto ribos šablonu (pavyzdžiui, *Hough* transformacija (Ballard 1981)).

Pirmasis metodas leidžia atlikti labai lankstų kreivės interpretavimą. Deja, tokie algoritmai yra gana jautrūs triukšmams ir jie nesugeba atskirti objekto kontūro ribos nuo kitų artefaktų. Antras metodas naudoja tikslų objekto formos modelį (tikslus šablonas) ir bando lyginti aptiktus kontūrus su šablonu, naudojant tinkamą geometrinę transformaciją. Buvo manoma, kad ši strategija labiau atspari triukšmui ir buvo plačiai naudojama daugelyje kompiuterinių vaizdų apdorojimo programų. Tačiau metodo charakteristikos smarkiai priklauso nuo objekto formos pastovumo ir jis yra jautresnis deformacijoms. Siekiant pašalinti šių dviejų strategijų trūkumus ir užpildyti tarpą tarp šitų dviejų metodų, buvo sukurta nauja kontūrus jungiančių algoritmų klasė, kuri naudoja deformuotus modelius. Šitie modeliai nėra tikslesni, nei naudojami *Hough* transformacijose, bet juose galimi formos deformavimai, kas leidžia gauti geresnį vaizdo duomenų atitikimą. Modelio elastingumas paprastai gali būti kontroliuojamas tolydžiais būdais, varijuojant tarp lanksčių vaizdų ir tarp nelanksčių vaizdų, panašių į *Hough* transformaciją.

Deja, šis metodas skirtas išskirti konkretų objektą vaizde, analizuojant objekto kontūrus, tačiau šiuo atveju nėra nagrinėjami objekto ryšiai su kitais galimais objektais.

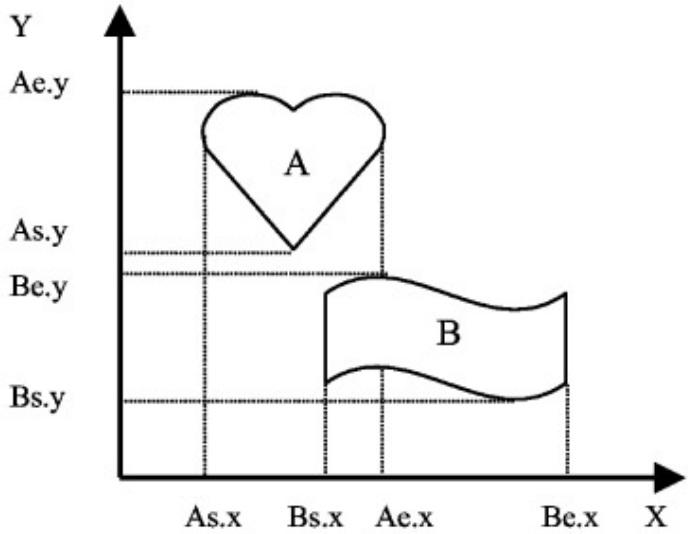
Daugialypė informacijos vaizde paieška yra svarbi, bet itin sudėtinga tyrinėjimo sritis. Šiuolaikiniai metodai naudoja spalvų, struktūrų ir formų informaciją. Savo darbe Shin, Huang ir kiti (Shih *et al.* 2001) pristato hibridinį metodą, sudarytą iš spalvos, formos (kontūro) ir erdvinių ryšių radimo funkcijų, kuris buvo naudotas atpažinti beveik 5000 paveikslų aibei. Tam, kad būtų padidintas paieškos efektyvumas, buvo pasirinkta patikslinta spalvų kombinacija ir jos indeksavimo technika. Objekto formai ir erdviniams ryšiams nustatyti panaudotas *užpildymo sėklomis* mechanizmas. Erdvinių skirtumų panašumo palyginimui buvo taikomas kokybinis metodas. Sistemos paieškos tikslumui įgyvendinti realizuotas vaizdų eskizų pildymo grįžtamasis ryšys.

Spalvinių požymių nustatymui naudojamos dvi pagrindinės procedūros. Pirmiausia, sistema nuskaito paveikslo pikselių RGB reikšmes (nuosekliai, nuo

pradinio taško) ir paskui MTM transformatoriaus pagalba paverčia juos HSI reikšmėmis. Antra, pagal kiekvienos spalvos pikselių skaičių paveiksle, sistema konstruoja spalvotą paveikslo histogramą. Taip pat sistema pagal vidutines atspalvio (hue), įsotinimo (saturation) ir intensyvumo reikšmes įrašo paveikslo spalvų jautrumą, reikalingą filtravimui, kurį sudaro spalvų šiltumas – šaltumas, pilkumas - gyvumas ir šviesumas – tamsumas.

Yra trys pagrindiniai formos (kontūro) nustatymo žingsniai: pirma, naudojant *užpildymo sėklomis* algoritmą, nustatomos objekto formos paveiksle. Tada, naudojant briaunos radimo bei formos panašumo nustatymo žingsnius, formos normalizuojamos ir iš sričių jos paverčiamos į kontūrus. Kitame žingsnyje sistema įrašo spalvą, vietą, aukštį, plotį ir kontūro informaciją objektų panašumo matavimui ir identifikuoja spalvinius bei erdvinius ryšius. Normalizuotas kontūras, kuris sukuriamas vėliau, naudojamas tik formos panašumo matavimams.

Po to, kai nustatyta objekto forma, projektuojant vaizdą (nustatytą objekto formą) iš dvimatės į vienmatę erdvę, sistema nustato erdvinius ryšius. Sistema fiksuoja pradinio, galinio, aukščiausio ir žemiausio taško X ir Y koordinates, statmenai koordinačių ašims (2 pav.). Šių taškų X ir Y koordinatės bus panaudotos dviejų objektų erdvinių ryšių nustatymui, naudojant Shih ir Chang (1998) metodą.



2 pav. Vaizdų projekcijos erdviniams ryšiams nustatyti

Kiti autoriai stambių struktūrų ir paveiksluose vaizduojamų objektų atpažinimui ir segmentavimui siūlo naudoti *Bejeso* grupavimo metodą (Kalitzin *et al.* 2000). Šiuo atveju atliekamas konkretaus paveikslo požymių išskyrimas, paprastų geometrinių primityvų suradimas ir šių primityvų grupavimas naudojant tikimybines taisykles ir etaloninius modelius. Priešingai nei kitos šablonų palyginimo technikos, šis metodas tam, kad sukurtų etaloną su maksimalia tikimybės funkcijos reikšme, nesinaudoja pastoviu įvesties duomenų komplektu. Vietoj to jis sudaro lokalių primityvų poaibį ir randa optimalų etaloninių modelių komplektą, kuris maksimizuoja etaloninių modelių atitikimo tikimybę išrinktiems poaibiams. Skirtingai nuo globalinių atpažinimo metodų, kurie klasifikuoja visą vaizdą, šio metodo visumą sudaro atpažinimo užduotis ir segmentavimo užduotis.

Pagrindinė segmentavimo uždavinio kliūtis yra objekto radimas paveiksle, objekto specifinių matmenų nustatymas ir greitas objektų atvaizdavimas daugiamačiuose paveiksluose. Populiarios segmentavimo technikos pagrįstos lokalia taško – kaimyno klasifikacija. Tokie metodai nesugeba „pamatyti“ globalių objektų, todėl dažnai reikalauja intensyvios operatoriaus pagalbos. To priežastis yra ta, kad objekto „suvokimas“ (interpretavimas) ne būtinai būna priklausomas nuo analizuojamo paveikslo vaizdo.

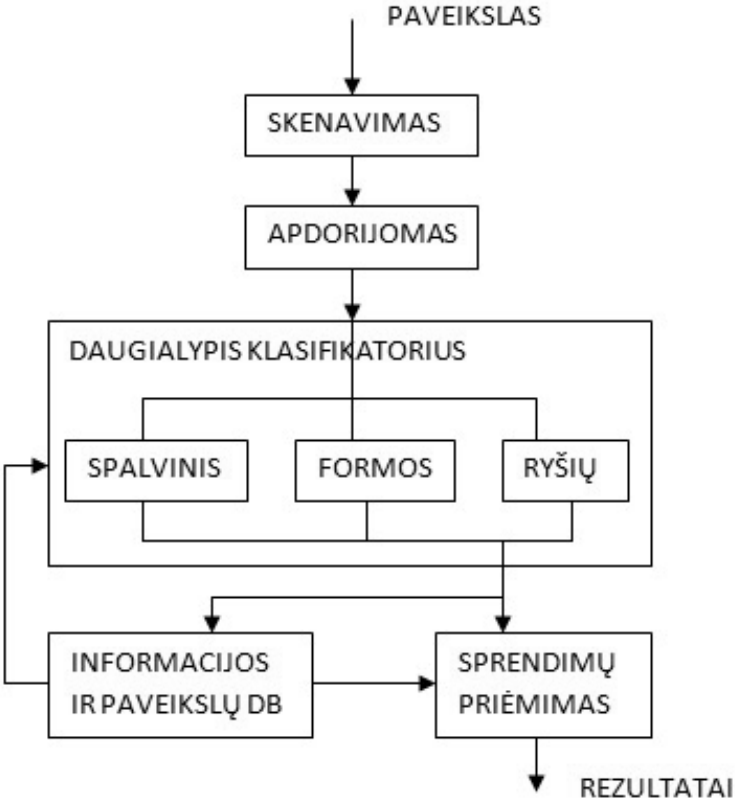
Tam tikros savybės, pavyzdžiui, struktūra, kampuotumai, iškilumai ir pan. ne visada yra vaizduojamojo objekto dalis. Tokiu atveju reikalingas etaloniniu modeliu pagrįstas metodas, kuris rūšiuotų ir grupuotų vaizdo primityvų dalis į konkrečius objektus. Tokio metodo atveju segmentavimo problemos sprendimas reikštų atitinkamos atpažinimo užduoties sprendimą. Autoriai siekia išskirti ne tik geometrinių darinių grupes, bet ir objektus, atpažintus kaip kažkokį etaloninį pavyzdį. Žvelgiant iš vaizdų atpažinimo perspektyvos, metodo tikslas yra klasifikuoti ne visą vaizdą, bet tiktai jo lokalių primityvų poaibius. Asociatyvinių tinklų metodai yra atsparūs mažiems trikdžiams, bet apskritai jie yra neatsparūs globalesnei struktūros transformacijai (vertimui, sukimaui, dydžio pokyčiui) ir yra neefektyvūs atsižvelgiant į daugialypę struktūrą, esančią paveiksluose. Šios problemos privertė mokslininkus nagrinėti dinamiškus segmentavimo mechanizmus (Sompolinsky *et al.* 1990) kontūrams tarp objektų paveiksluose analizuoti. Autorių nuomone, tokia atpažinimo problema gali būti išspręsta tiktai integruojant ją su segmentavimo problema. Panašios išvados motyvavo etaloninių modelių segmentavimą ir grupavimą (Pilu *et al.* 1997), ir to pritaikymą realaus pasaulio vaizdams.

1.1.3. Objektų spalvos, formos ir ryšių nustatymas

Anksčiau aprašyti metodai skirti atskiro objekto vaizde išskyrimui, bei jo atpažinimui, bet šie metodai nenagrinėja paveikslą sudarančių regionų ir ryšių tarp jų tinkamumą. Taip pat svarbu yra tai, kad daugelyje sistemų, tokių kaip prekės ženklo registracija, meninių paveikslų duomenų bazė, piršto atspaudo identifikacija ar veido identifikacija, vienas iš pagrindinių uždavinių yra didelių paveikslų kiekių peržiūra ir atpažinimas. Tokia problema egzistuoja ir savaimingai besiformuojančių paveikslų atveju. Šiuo požiūriu tam, kad būtų išspręsta paieškos problema, reikalingesnė automatizuota vaizdų paieškos sistema. Ing-Sheen Hsieh, Kuo-Chin Fan savo darbe (Hsieh *et al.* 2001) aprašo naują regionų pagrindu paremtą daugialypę spalvotų paveikslų paieškos ir klasifikavimo sistemą. Savo darbe autoriai aprašo idėją, kaip realizuoti greitą ir efektyvią automatinę spalvotų vaizdų paieškos sistemą, siekiant iš didelės apimties paveikslų duomenų bazės atrinkti panašius vaizdus. Tam, kad būtų galima suklasterizuoti besiliečiančius regionus paveiksle, šis metodas iš pradžių naudoja regionų išskyrimo techniką. Siekiant suformuoti spalvines sritis kaip primityvus, tikrinama ar taškas liečiasi su kitu tos pačios spalvos tašku. Tada klasifikatoriaus pasirinkimo stadijoje išrenkami trys vienas kitą papildantys, regionais pagrįsti klasifikatoriai (spalvinis klasifikatorius, formos klasifikatorius ir ryšių klasifikatorius). Kiekviename klasifikatoriuje apibrėžiama tikimybė, kada vaizdas yra panašus į tam tikrą etaloninį vaizdą. Autorių siūlomo paveikslų atpažinimo metodo blokinė diagrama pavaizduota 3 pav.

Spalvoti paveikslai į kompiuterį nuskaitomi naudojant optinį skaitytuvą. Po to, kiekvienas įvesties paveikslas apdirbamas, kad išankstinio apdorojimo stadijoje būtų identifikuoti spalviniai vaizdo regionai. Tada gaunamas sužymėtas vaizdas, sudarytas iš kelių spalvinių sričių. Šioje sistemoje yra trys klasifikatorių rūšys. Formos klasifikatorius, pagal spalvinių regionų formų atitikimus tarp dviejų vaizdų, lygina panašius vaizdus su vaizdais iš duomenų bazės. Spalvinis klasifikatorius, vykdo klasifikavimą pagal atitinkamų spalvinių regionų spalvas. Ryšių klasifikatorius, pagal ryšius tarp spalvinių regionų, paveiksle identifikuoja panašius vaizdus.

Tam, kad būtų galima nustatyti požymius ir visus tuos požymius sukaupti, visi paveikslai vienas po kito nuskaitomi į duomenų bazę. Požymius sudaro spalvinių sričių (regionų) skaičius, kiekvieno spalvinio regiono normalizuotos histogramos santykis vaizde, kiekvienos spalvotos srities apibūdinimo *Fourier* koeficientai (formos klasifikatoriaus požymiai), kiekvieno spalvinio regiono spalva (spalvinio klasifikatoriaus požymiai) ir erdvinių ryšių grafas (ryšių klasifikatoriaus požymiai). Bet kokiu atveju, šio metodo spalvų, formų ir sąryšių klasifikatoriai remiasi analizuojamo šablono atitikimu etaloniniam šablonui, bet neanalizuoja paveikslo struktūros tinkamumo.



3 pav. Siūlomo paveikslų atpažinimo metodo blokinė diagrama

Logotipų atpažinimui siūlomas adaptyvus modelis, vadinamas *rekursiniu neuroniniu tinklu* (RRNN) (Francesconi *et al.* 1998). Šiame darbe siūloma logotipo objektą tiesiogiai paversti m-šakio medžio vaizdu, kuriame kartu egzistuoja ir simbolinė, ir subsimbolinė informacija. Kiekvienas mazgas kontūro medyje susijęs su išoriniu ar vidiniu kontūru, nustatytu konkrečiam logotipui. Požymių vektorius, kurį sudaro kontūro perimetras, jį supanti sritis ir kritinių taškų skaičius kai kuriose iš anksto numatytose atkarpose, yra susieti su kiekvienu mazgu. Tokiu būdu transformuoto šablono vaizdavimas savyje turi topologiškai struktūruotą logotipo informaciją ir kiekvienam kontūro mazgui

priklausančias tolydžias reikšmes. Vėliau, vertinant logotipo taisyklingumą, naudojami rekursiniai neuroniniai tinklai, išreikšti kontūro medžiu.

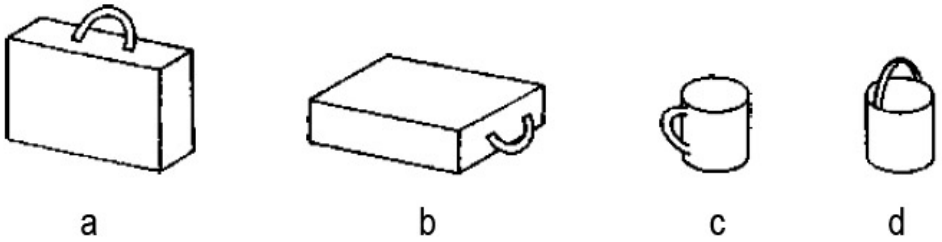
Adaptyvūs skaitiniai statistiniai modeliai ir dirbtiniai neuroniniai tinklai labai tinkami vaizdų atpažinimui. Kaip bebūtų gaila, paprastai manoma, kad tokie adaptyvūs modeliai, o ypač neuroniniai tinklai, labai sunkiai susidoroja su aukšto struktūravimo lygmens informacija. Antra, dauguma modelių, naudojamų sintaksinio šablonų atpažinimo atvejais, gali būti papildyti gramatinėmis taisyklėmis šablonams, bet vienas iš jų trūkumų yra tai, kad jie nelabai atsparūs triukšmams vaizde. Atrodo, kad šis būdas labiau skirtas tiems skaičiavimų atvejams, kurie iš esmės susiję su simboliais ar su nestruktūruota informacija, tuo tarpu šablonų atpažinimo atveju dažnai ieškoma informacijos kombinacijos tarp simbolinių ir subsimbolinių lygmenų. Šiame darbe logotipų atpažinimo problemoms spręsti siekiama sujungti (taikant RRNN) šias dvi skirtingas paradigmas.

Pastaruosius keletą metų logotipų atpažinimo uždavinys, kaip labai unikalus šablonų atpažinimo atvejis, buvo išsamiai tyrinėjamas. Daugelis pasiūlytų būdų pagrįsti sintaksiniu metodu (Doermann *et al.* 1993) ir statistiniu modeliu (žr. (Cortelazzo *et al.* 1994; Hachimura 1992)). Ryšiais pagrįstas (Cesarini *et al.* 1996) logotipų atpažinimo metodas buvo pasiūlytas neseniai ir praplėstas esant taškų triukšmams (Cesarini *et al.* 1997). Šiose darbuose logotipo radimas apskaičiuojamas daugiasluoksniais perceptronais, veikiančiais kaip automatinės jungtys, kurioms reikšmės turi nestruktūruoti požymių vektoriai. Tokie metodai visiškai pasikliauja numanomais daugiasluoksnių perceptronų gebėjimais nustatyti logotipo taisyklingumą esant tam tikram triukšmui. Nors buvo pasiekti ganėtinai tikslūs rezultatai, tikėtina, kad šio metodo efektyvumas šablonų atpažinimo taikomosiose programose, kuriose yra aiškūs simbolių komponentai, mažės.

Tam, kad būtų galima sujungti simbolinį ir subsimbolinį procesus, kai kurie mokslininkai neseniai ištyrė struktūrinių duomenų apmokymo pagal pavyzdžius, naudojant rekursinius dirbtinius neuroninius tinklus (RRNN) (Sperduti *et al.* 1996), tinkamumą. Pasiūlytas neuroninis modelis gali būti nesudėtingai panaudojamas logotipų atpažinimo problemai spręsti, o logotipo triukšmas ir jo struktūrinės informacijos gavimas gali būti paprastai įtraukti į RRNN. Rekursiškai nustatant kontūrus ir įtraukiant ryšius, m-sluoksnis medis sukuriamas taip, kad mazgai nelyginiuose medžio lygmenyse būtų sujungti su išoriniais kontūrais, o lyginiai lygmenys būtų sujungti vidiniais kontūrais. Kiekvienas mazgas v pažymimas skaitinių požymių, nustatytų objektui, rinkiniu, sujungtu su mazgu ir aprašytu kintamųjų masyve Uv. Šių požymių pavyzdžiai yra kontūro perimetras, sritis aplink kontūrą ir kritinių taškų skaičius kai kuriuose iš anksto numatytuose intervaluose.

1.1.4. Atpažinimas per žmogiškąjį suvokimą

Yra dar vienas alternatyvus būdas atpažinti paveikslams – atpažinimo per žmogiškąjį suvokimą metodo naudojimas (Biederman 1987). Objektų atpažinimas per suvokimą suprantamas kaip procesas, kuriame įvesties vaizdas sudaromas iš regionų, esančių įgaubtame paviršiuje, išdėstant jame paprastus geometrinius komponentus, pavyzdžiui, blokus, cilindrus, pleištus ar kūgius. Fundamentali siūlomos teorijos hipotezė, *atpažinimas pagal komponentus* (RBC), yra ta, kad nedidelis paviršiuje suformuotų komponentų rinkinys gali būti atpažįstamas lyginant penkis lengvai vaizde nustatomus briaunų požymius: išlinkimą, susikirtimą, simetriją, lygiagretumą ir sutapimą. Šių požymių nustatymas, apskritai, nepriklausomas nuo žvilgsnio kampo ir paveikslo kokybės, todėl objekto suvokimas visuomet toks pats, net kai tas pats vaizdas analizuojamas iš kito taško ar yra sumažintas. Tokiu būdu RBC suformuoja principinį pagrindą apie iki tol nenustatytą ryšį tarp klasikinių suvokimo principų ir vaizdų atpažinimo principų: charakterizuojamas ne vientisas objektas, bet objekto komponentai. Atvaizdavimo tikslumas priklauso nuo nepastovių dalių kombinacijų. Komponentų nustatymo principas gali būti esminiu objekto atpažinimo veiksniu: jei dviejų ar trijų dalių išdėstymas gali būti nustatytas pagal pirminius duomenis, objektai gali būti aiškiai atpažįstami net kai jie yra dalinai uždengti, pasukti į gylį ar išoriškai sumažinti.



4 pav. Skirtingas tų pačių komponentų išsidėstymas sukuria kitokį objektą

Straipsniuose apie objektų atpažinimą beveik tradiciškai pažymima, kad atpažinti objektus galima naudojant naujųjų teorijų metodus, net nepaisant to, kad tam tikri vaizdai gali reikšti radikaliai skirtingus atvaizdus žmogaus tinklainėje. Viena iš svarbiausių žmogiškojo objektų atpažinimo paslapčių yra klausimas, dėl ko taip nutinka. Viena iš daugelio reikšmingų teorijų — struktūrinio vaizdavimo teorija — tai aiškina tuo, kad šis gebėjimas atspindi būdą, kuriuo mūsų regėjimo sistemos identifikuoja objekto formas (Hummel 1998). Bendra mintis tokia, kad mes analizuojame objekto atvaizdą suskirstytą į

sritis, atitinkančias tūrines dalis, ir paskui aiškiai susiejame tas dalis, nustatydami jų tarpusavio ryšius. Pavyzdžiui, kavos puodelį galėtų sudaryti išlenktas cilindras (ąsa) pridėtas prie tiesaus vertikalaus cilindro (korpusas). Tačiau ryšiai yra viską lemiantys: jei išlenktas cilindras būtų prijungtas prie tiesaus cilindro iš viršaus, tai tas objektas jau būtų kibiras, o ne puodelis (4 pav.).

Struktūriškas vaizdavimas pagrįstas abstrakčiomis sudedamosiomis dalimis ir ryšiais tarp jų, pavyzdžiui, rankena apibrėžiama kaip tiesiog „lenkta“, užuot apibrėžus jos tikslų išlinkimo laipsnį, ir ryšys apibrėžiamas kaip „pridėtas šone“, užuot apibrėžus detalius pritvirtinimo matus. Visa tai yra natūralus reiškinys naujųjų atpažinimo teorijų metoduose. Pažymėtina, kad puodelio apibūdinimas priėjus arčiau prie jo ar toliau, pasukus perspektyvoje (jei rankena nedingsta už puodelio korpuso) liks toks pat, kadangi puodelis interpretuojamas per regos lauką. Atpažinimas, pagrįstas šiuo metodu, nepakistų esant tokiems puodelio vaizdo pokyčiams. Bet regėjimo plokštumoje sukdami atvaizdą 90° kampu, kad kūnas liktų horizontalus, o rankena atsidurtų viršuje, vaizdo suvokimas pasikeistų, o tai dažnai gali turėti įtakos klaidingiems atpažinimo rezultatams. Kaip ir žmogiškasis objekto atpažinimas, šis abstraktus struktūrinis atpažinimas yra jautrus sukimuisi apie regėjimo plokštumą, bet nejautrus vertimui, mastelio pokyčiams, kairiąjam – dešiniąjam sukimui ir tam tikram perspektyviniam sukimui (į gylį). Abstraktus struktūrinis vaizdavimas taip pat naudingas dar ir todėl, kad jis leidžia taikyti tas pačias taisykles tos pačios klasės objektams atpažinti: „Išlenktas cilindras, pridėtas tiesaus vertikalaus cilindro šone“ apibūdina daugybę skirtingų puodelių ir tokiu būdu palengvina atpažinimo uždavinį.

Struktūrinio vaizdavimo teorijos sulaukė didelio dėmesio ir kaip žmogiškojo objektų atpažinimo pagrindas, ir kaip metodai, prieštaraujantys automatizuotam vaizdų atpažinimui. Abiem atvejais šios teorijos buvo smarkiai kritikuotos. Tačiau kompiuterizuotose sistemose nėra lengva realizuoti algoritmus, kurie paveikslo objektams taikytų abstraktų struktūrinį vaizdavimą. Struktūrinio vaizdavimo paveikslams formavimas sudėtingas iš dalies todėl, kad rezultatai gali būti labai jautrūs tam metodui, kuriuo naudojantis paveikslas padalinamas į dalis: tas pats paveikslas, padalintas į skirtingas dalis skirtingais metodais, gali reikšti visiškai kitokį vaizdą. Ši problema — nors galbūt įveikiama — privertė daug tyrėjų abejoti struktūrinio vaizdavimo, kaip metodo, veiksmingumu objekto atpažinimui. Tačiau svarbu parodyti tai, kad nors vis dar reikia tobulinti kompiuterines sistemas, kurios galėtų patikimai padalinti vaizdų objektus į dalis. Toks objektų dalijimas žmonėms nesukelia absoliučiai jokių problemų; problema tik ta, kad dar nėra visiškai aišku, kaip tai padaroma.

Paplitusi klaidinga nuomonė, kad struktūrinis vaizdavimas orientuotas į objektą ir nekintantis nuo žvilgsnio. Daug tyrėjų parodė, kad veikiamas daugybės sąlygų ir veiksnių, žmogiškas objekto atpažinimas yra jautrus

perspektyviniam sukimui: kai kuriuos objektus naujose aplinkose mes atpažįstame sunkiau negu pažįstamose aplinkose. Tokie rezultatai rodo, kad objekto atpažinimas nėra visiškai nekintantis nuo žvilgsnio. Reaguojant į panašius pasvarstymus, kai kurie tyrėjai atmetė struktūrinį vaizdavimą, teigdami, kad mes atpažįstame objektus žinomos aplinkos pagrindu. Tokių aplinka besiremiančių teoretikų tvirtinimai labai dažnai yra tvirti: tai nėra tiesiog tvirtinimas, kad objekto atpažinimas yra jautrus žiūrėjimo taško pokyčiams, o yra taip, kad mes atpažįstame objektus, kurie tiksliai atitinka tam tikrus šablonus (vaizdus) iš mūsų atminties.

Atpažinimas per žmogiškąjį suvokimą gali būti analizuojamas kaip atpažinimas pagal pirminį žvilgsnį. Walther ir kiti (Walther *et al.* 2002) objektų paveiksluose siūlo atpažinimą pagal pirminio žvilgsnio nustatymą. Žiūrint į kažkokį vaizdą, tačiau be bet kokių nors ankstesnių žinių apie jį ar konkrečių užduočių jam, dėmesys pirmiausiai būna kreipiamas į tam tikras vietas, daugiausia dėl jų reljefiškumo, spalvų kontrastų, intensyvumo, padėties ir panašiai. Paprastai dėmesys nėra kreipiamas į vieną vaizdo vietą, bet dažniausiai į kažkokį regioną, kuris, tikėtina, yra tam tikras objektas ar objekto dalis. Pasakymas „tikėtina“ vartojamas todėl, kad analizuojant paveikslo detales pirmiausia pasikliaujama žemo lygio požymiais, kurie tiksliai neapibūdina objektų. Taip nutinka iškart po to, kai regos sistema pasirenka matymo lauko sritį, kurioje objektai jau identifikuojami atpažinimo sistemos smegenų inferolaikinoje žievėje. Tai turi įtakos objektų analizės, taip vadinamai, vištos-kiaušinio problemai, kurią gana sudėtinga išspręsti.

Anksčiau buvo manoma, jog naudojant greitą pradinio fiksavimo momento vertinimą, norint pagreitinti atpažinimą analizuojant objekto padėtį, smarkiai pagreitėja objektų atpažinimas netvarkinguose vaizduose.

Tačiau šis metodas, kaip ir kiti anksčiau naudoti, buvo pagrįstas paradigma, skirta rinkti „įdomias“ vaizdo dalis, iškerpant vaizdą ir naudojant iškirptą dalį atpažinimui dinamiškais neuroniniais ryšiais. Nors tai buvo plačiai naudojama skaitiniame modeliavime, tačiau ši paradigma nelabai pagrindžiama fiziologiškai. Svarbiausia svarstoma problema yra vaizdo dalies perkėlimas naudojant „viskas arba nieko“ metodą neuroniniuose tinkluose, atsižvelgiant į tai, kad remiantis fiziologiniais tyrimais, paprastai randamos tik minimalios moduliacijos pirminėse matomose srityse, kurios užfiksuojamos pradinio žvilgsnio.

Šiuo atveju tiriamas alternatyvus metodas. Statiškoje architektūroje naudojama erdvinė informacija, kuri gaunama pagal šio modelio pirminio žvilgsnio informacijos komponentus tam, kad būtų galima sumodeliuoti atpažinimą naudojant kintamą moduliacijų kiekį. Nustatyta, kad 20% moduliacija pakankama sėkmingam keleto objektų vaizde atpažinimui. Tam, kad būtų pasiektas toks procentas reikalingas tiriamojo objekto apytikris segmentavimas. O sistema turi būti aprūpinta ne tiktai informacija apie

analizuojamą sritį, bet taip pat ir informacija aplink „dominantį“ regioną. Čia siūlomas metodas, kuris naudoja jau išskirtų požymių žemėlapius ir tuomet vykdo nežymius papildomus skaičiavimus vaizdų segmentavimui.

Modelis

Požiūris iš apačios pradiniam vaizdui identifikuoti. Modelis sukuria požymių žemėlapius objektų padėčiai, intensyvumui ir spalvai ir, naudodamas tuos tarpinius žemėlapius, sukuria reljefinį vaizdo žemėlapį. „*Winner-takes-all*“ tinklas iš integruotų ir sužadintų neuronų atrenka labiausiai objektą charakterizuojančias vietas, o sugrįžimo uždraudimo mechanizmas leidžia modeliui sėkmingai iš eilės analizuoti daugelį tokių vietų.

Identifikuotų objektų atpažinimas. Atpažinimo blokas pagrįstas hierarchiniu HMAX (Riesenhuber 1999; Riesenhuber 1999a) objekto modeliu, kuris atpažinimą interpretuoja kaip *feed forward* procesą Fukušimos Neocognitron (Fukushima 2004) pagrindu. HMAX modelis, naudodamas maksimalią sujungimo operaciją (erdviniam sujungimui) ir sumos sujungimo operaciją (požymių kombinacijoms), pagal objektų vaizdų eiliškumą sluoksniuose sukuria tam tikrus primityvus.

Sąveikos tarp pradinio vaizdo ir atpažinimo. Pradinio vaizdo moduliacijos tikslas yra suteikti atpažinimo sistemai apytikslę pirminio vaizdo vietos reikšmę ir „įdomių“ objektų vaizde skaičių. Tam tikslui požymių žemėlapiai ir aiškių elementų žemėlapiai, kurie buvo sukurti reljefo žemėlapio apskaičiavimo procese, gali būti naudojami pakartotinai.

Tačiau nei atitikimas etaloniniam šablonui, nei analizuojamo objekto atitikimas realiam objektui, nei atskirų objektų ar jų dalių paveiksle identifikavimas neleidžia kokybiškai analizuoti regionų ir ryšių tarp jų. Reikalingas toks metodas, kuris leistų nustatyti lokalius kokybinius erdvinius ryšius. Žemiau apžvelgiu kontrolės metodus, naudojamus integrinių schemų gamyboje.

1.1.5. Integruotų schemų gamybos proceso kokybės kontrolė

Vaizdų apdorojimo programos labai paplitusios gamybos ir karinėje pramonėje. Kalbant apie gamybos pramonę, tokios sistemos dažniausiai naudojamos gaminių tikrinimui, matavimui ir su tuo susijusiose srityse. Daugelyje masinės produkcijos gamybos atvejų siekiama užtikrinti šimtaprocentinę tiek visų sudėtinių dalių, tiek ir galutinio produkto kokybės garantiją. Viena iš sudėtingiausių šio proceso užduočių yra vaizdo analizė – tikrinimas, siekian aptikti funkcinius ir kosmetinius defektus. Progresuojant

kompiuteriams (jų greičiams, atminčiai ir, atitinkamai, kainai), vaizdų apdorojimas, šablonų atpažinimas ir dirbtinis intelektas tampa gana nebrangiomis priemonėmis industriniam vaizdų atpažinimui. Toks vystymasis elektronikos industrijai suteikia galimybę vizualinį tikrinimą analizuojant lustus, integruotas schemas, tofometrus ir pan. gamybos procese automatizuoti.

Sprendimai, kuriuos priima žmonės analizuodami vaizdus, dažnai yra subjektyvūs, imlūs laikui, bei labai brangūs. Tuo tarpu automatinė analizė nėra priklausoma nuo subjektyvumo ir esant dideliam analizuojamų objektų skaičiui yra greita.

Yra nemažai metodų, skurtų integruotų schemų analizei ir defektų jose radimui. Tokie metodai gali aptikti linijos pločio, trūkio, medžiagų pertekliaus ar kitokius defektus. Tai yra kosmetiniai defektai, kurie atsiranda dėl gamybos proceso netikslumų (Moganti *et al.* 1996). Šie metodai plačiai taikomi VLSI struktūrų analizei. VLSI (*angl. Very-large-scale integration*) yra integruotų schemų kūrimo procesas, viename luste sujungiantis iš tūkstančių tranzistorių sudarytas schemas. VLSI pradžia laikomi 1970-ieji metai, kuomet buvo pradėtos kurti sudėtingos puslaidininkių ir komunikacijų technologijos. Mikroprocesorius taip pat yra VLSI prietaisas.

Šiuo metu VLSI struktūros tikrinimas yra bene svarbiausia integruotų schemų gamybos dalis. Todėl šis procesas turėtų būti greitas ir tikslus. Struktūros kontūrų analizė gali užtikrinti abi šias sąlygas (Beeftink 1995). Tokio metodo pagalba objekto struktūra konvertuojama į ją atitinkantį tinklą, kuris yra tikslus struktūros modelis. Vėliau kontūrų analizė ir tinklinis lyginimas naudojami tiksliems skaičiavimams ir kontūrų tikrinimams dar iki gamybos proceso pradžios, taip sumažinant prietaisų gamybos kainą.

Šio metodo tikslumas labiausiai priklausomas nuo tinklo, aprašančio mikroschemos struktūrą. Todėl svarbus ne tik struktūros netikslumų, pavyzdžiui, sujungimų trūkio ir nenutrūkstamos varžos radimas, bet ir viso (vientiso) gaminio tikrinimas. Tam tikrais atvejais gana sudėtinga sumodeliuoti tikslų kontūro tinklo ekvivalentą, atitinkantį dvipolį prietaisą, nes integruotos schemos topologija labai kompleksiška.

Siūlomas metodas išskiria išorinius ir vidinius dvipolius įrenginius. Išorinės dalys modeliuojamos pavieniais, atskirais, pavyzdžiui, varžos ar talpinės varžos, elementų kontūrais. Vidinių dalių, kurioms egzistuoja keletas prietaiso modelių, modelio parametrai apskaičiuojami sujungiant prietaiso geometrijos ir jo apdorojimo duomenis.

Struktūros pavertimo kontūru įrankiai leidžia greitai tikrinti struktūros tinkamumą. Yra sukurti CAD programinės įrangos įrankiai, kurie paverčia integruotos schemos struktūrą į ją atitinkantį tinklą. Šis tinklas yra tikslus struktūros modelis, kuris taip pat gali turėti ir tos struktūros defektus.

Dėl sparčiai augančio elektronikos prietaisų vienoje integruotoje schemoje skaičiaus ir dėl jų mastelio mažėjimo, labai svarbus faktorius yra ne tik netikslumai sujungimuose tarp mikroschemos prietaisų, bet ir netikslumai pačiuose prietaisuose. Be to, tradiciškai žinomas mikroschemos netikslumų ir prietaisų (tranzistorių) savitumas tokiu atveju sunkiai pastebimas. Todėl analizės įrankiai privalo identifikuoti ne tik netikslumų (defektų) sujungimuose modelį, bet taip pat ir pavienius prietaisus struktūroje.

Struktūros pavertimui kreive buvo pasirinktas labai efektyvus **Spice** įrankis. Įrankis naudoja skenavimo algoritmą ir kampų sujungimo duomenų struktūravimui techniką (Meijs *et al.* 1992). Tokiu būdu tiriama tik viena smulki struktūros dalis, tuo tarpu skenavimas vyksta iš kairės į dešinę.

Aukščiau pasiūlyti metodai, naudojami CAD programinėje įrangoje, kuri integruotų schemų struktūras paverčia į jas atitinkančius tinklus, pastaruoju metu labai paplitę MOS (*angl. Metal Oxide Semiconductor*) technologijose įvairioms struktūroms analizuoti. Tinklai gali būti sumodeliuoti naudojant tam skirtus programinius paketus, pavyzdžiui **Spice**, kurie įgalina tikslius skaičiavimus ir kontūrų pokyčių tikrinimus iki produkto gamybos pradžios, taip mažinant gamybos kaštus.

Struktūrų analizės įrankiai nėra visiškai tinkami bipolėms technologijoms, bet kai kurie tyrimai šioje srityje jau pradėti. Vis dėlto, dauguma egzistuojančių bipolių struktūrų analizės įrankių tinkami konkrečiam procesui arba tik apibrėžtam bipolių prietaisų skaičiui. Dėl to, kad bipolės technologijos plačiai naudojamos, MOS technologijoms tinkamų įrankių poreikis labai aktualus.

Simuliacijos rezultatų struktūrų analizei ir skaičiavimams reikalingas ir tinklas (aprašantis schemos topologiją), ir simuliacijos modelio parametrai (kiekvienam prietaisui tinkle). Lyginant su MOS prietaisais, dvipoliai prietaisai turi žymiai kompleksiškesnes topologijas. Todėl schemos struktūroje identifikuoti šiuos prietaisus bei apibrėžti simuliacijos modelio parametrus yra žymiai sunkiau.

Tokių kompleksiškų prietaisų struktūrų identifikavimas gali būti efektyvus naudojant analizės strategiją, paremtą subgrafo izomorfizmu, kuris gali būti adaptuojamas tokiems poreikiams. Toks būdas gali būti ne tik kaip naujas ir nesudėtingas atpažinimo algoritmas, bet taip pat jis gali būti naudojamas kartu su jau veikiančiais įrankiais. Simuliacijos modelio parametrų apibrėžimui naudojamas metodas, kuris remiasi „*skaldyk ir valdyk*“ strategija (Beeftink 1997).

Dar vienas būdas VLSI elementų tikrinime yra *Hough transformacija* (HT) – gerai žinoma efektyvi formų atpažinimo technika (Huang *et al.* 1985). Pagrindinis HT trūkumas yra labai sudėtingi skaičiavimai ir su tuo susiję pernelyg dideli reikalavimai kompiuterinei atminčiai. Atminties problema gali būti išsprendžiama naudojant atminties integravimo technikas (Hanahara *et al.* 1988). Skaičiavimų greičiui padidinti sukurta nemažai skirtingų metodų ir

algoritmų (Ibrahim *et al.* 1997). Daugelis metodų, naudojančių Hough transformaciją, susiduria su trigonometrinių ir transcendenčių funkcijų vertinimo problema. Dėl to HT realizavimas vienalyčiame algoritme yra labai sudėtingas uždavinys. Šiai problemai išvengti naudojamos CORDIC architektūros (Timmerman *et al.* 1989; Bruguera *et al.* 1996).

Viso to tikslas yra sukonstruoti tokias HT architektūras, kurios gali būti tinkamos VLSI atvejams ir kurios gali demonstruoti aukštą našumo lygį bei sumažinti skaičiavimų kompleksiškumą. Šiam tikslui buvo pasitelktos CORDIC asinchroninių masyvų architektūros. Bendrasis *apdorojimo elementas* (CIRDIC modifikacija) ir skenavimo kampo reikalavimai yra sumažinti pritaikius kampo sulygiagretinimo schemą. Siekant išvengti mąstelio pokyčių problemos, paprastai būdingos CORDIC metodui, mąstelio modifikacijos gali būti atliekamos naudojant sukryžmintų ryšių ir sumavimų metodus. Aukšto našumo asinchroninio masyvo architektūra gali būti naudojama tiesios linijos Hough transformacijai. Tačiau praplėtus ir modifikavus šią architektūrą ji gali būti tinkama apskritimų ir elipsių Hough transformacijoms (Maharatna *et al.* 2001).

Tokia modifikuota architektūra apskritimų ir elipsių Hough transformacijoms skaičiuoti, žinant centrą ir orientaciją, reikalauja mažesnio aritmetinių operacijų skaičiaus. Apskritimų ir elipsių Hough transformacijoms skaičiuoti, atsisakant hierarchinio metodo, šios architektūros gali būti naudojamos kaip submoduliai ir kituose algoritmuose, VLSI struktūrų tikrinime.

Vaizdo apdorojimas yra svarbi bet kurių mikroschemų gamybos stadija. Daugialypiai metodai, skirti mikroschemų atpažinimui, taškų segmentavimui ir vertinimui atsirado pakankamai neseniai. Šiuo metu yra įvairių komercinių ir laisvai platinamų programinių paketų, skirtų vaizdų su mikrorinkiniais analizei (Petrov *et al.* 2004).

DNR ir baltymų masyvų tyrimai yra gana sudėtingas daugiažingsnis procesas, kuris, priklausomai nuo bandymų skaičiaus bei pradinių sąlygų, generuoja didelės apimties duomenis. Mikrorinkiniai arba mikrolustai yra gana paplitę gamtos moksluose. Nors iš pradžių naudoti genų išraiškų reikšmėms skaičiuoti, pastaruoju metu jie buvo pritaikyti daugelyje kitų tyrimų. Tokie taikymo pavyzdžiai yra baltymų rinkiniai, antikūnių rinkiniai, CGH rinkiniai, SNP rinkiniai, ir pan. Tačiau tokie metodai, kurie taikomi bet kokiam anksčiau minėtam mikrorinkinių (pavyzdžiui, baltymo rinkinių) panaudojimui, taip pat gali būti naudojami ir vaizdų apdorojimui. Yra trys skirtingi duomenų rinkinio apdorojimo būdai. Pirmas būdas skirtas lustų gamybos, pavyzdžių ruošimo ir rinkinių mišrinimo metu generuojamų duomenų apdorojimui. Antrasis susijęs su mikrorinkinių vaizde užfiksavimu ir analize, siekiant rinkinį įvertinti kokybiškai. Trečias skirtas analizuoti kokybiškai įvertinto vaizdo duomenis, siekiant gauti biologiškai tinkamą informaciją.

Vaizdai su mikrorinkiniais yra rinkiniai, sudaryti iš taškų, išdėstytų tolygiai tokio paties mastelio erdvėse, vadinamuose *subtinkleliuose*. Visuose subtinkleliuose paprastai, bet ne visada, yra toks pats eilutėse ir stulpeliuose išdėstytų taškelių skaičius.

Šie *subtinkleliai*, taip pat vadinami *kvadrantais*, tolygiai išdėstyti lygiose erdvėse ir tarpusavyje susieti tam tikrais ryšiais, suformuoja *meta rinkinį*. Vaizdų su rinkiniais apdorojimo tikslas yra išmatuoti šitų taškelių intensyvumo lygmenis, tada, remiantis šiuo intensyvumu, kokybiškai vertinti genų išraiškų reikšmes, vertinti duomenų patikimumą, identifikuoti defektus ar nepatikimus duomenis ir generuoti tinkamą pranešimą vartotojui.

Idealiu atveju paprasta kompiuterinė programa gali nesunkiai atlikti pagrindinę vaizdo apdorojimo užduotį, sulyginti vienodais tarpais išdėstytų apibrėžtų matmenų apskritimų rinkinį paveiksle su etaloniniu pavyzdžiui. Teoriškai šių apskritimų viduje ar išorėje esantys pikseliai (triukšmai), gali būti vertinami atitinkamai kaip signalas ar fonas. Iš tikrųjų kiekvieno subtinklelio ir kiekvieno atskiro apskritimo tiksli vieta skirtinguose paveiksluose gali kisti. Tokie pakitimai gali būti priklausomi nuo daugelio faktorių, pavyzdžiui, nuo mechaninio atpažinimo proceso atkuriamumo ir tikslumo, kiekybinio vertinimo nesuderinamumų, paviršinės chemijos ir panašiai. Tokia nenuoseklaus atpažinimo problema automatiniam taško radimui reikalauja patikimo metodo.

Užterštumas – kitas svarbus iššūkis paveikslų su mikrorinkiniais analizei. Užterštumai, pavyzdžiui, dulkės ar priemaišos ant lusto, purvas, dėmės ir lašai DNR molekulėse ar panašiai dažnai turi įtakos analizuojamo paveikslo su mikrorinkiniais sričių ryškumui. Geriausias užterštumo problemos sprendimas yra taškų ir/ar mikrotinkinių atkartojimas. Tokiu būdu, jei taškai yra užteršti, kiti taškai gali būti naudojami atkartojimui vietoje jų. Bet kokiu atveju, toks metodas daugeliu atvejų gali būti netinkamas esant dideliems ribojimams dėl DNR molekulės kompleksiškumo. Tačiau tokių problemų sprendimui gali būti naudojami įvairūs segmentavimo algoritmai kiekvieno taško geram signalui, fonui ir triukšmų regionui identifikuoti.

Specifinio matavimo parinkimas pikselio intensyvumo lygiui identifikuoti, taip pat yra svarbus uždavinys mikroduomenų analizėje. Tam, kad būtų galima pavaizduoti geno išraiškos lygmenį, galima pasirinkti pikselio iš segmenuojamojo taško paveiksle vidurkį, medianą, modą ar visų pikselių intensyvumo reikšmes. Be to, kai mikroduomenų tyrimas apima du lygmenis – kontrolinį lygmenį bei eksperimentinį lygmenį, tų lygmenų matavimų santykis taip pat gali būti naudojamas genų išraiškai analizuoti. Gretimais esančių pikselių santykis taip pat gali būti naudojamas kaip releatyvaus reguliavimo matavimas.

Paminėtina, jog kiekvienas tyrėjas susijęs su vienokiu ar kitokiu matavimų, gautų po vaizdo apdorojimo, kokybės vertinimu. Minimalus reikalavimas idealiai vaizdų apdorojimo programai yra sugebėjimas atskirti „blogos kokybės“ taškus.

Bet netgi tokiu atveju nėra bendro sutarimo kaip apibrėžti „blogos kokybės“ tašką. Ši problema apsunkina taško kokybinio vertinimo kokybę.

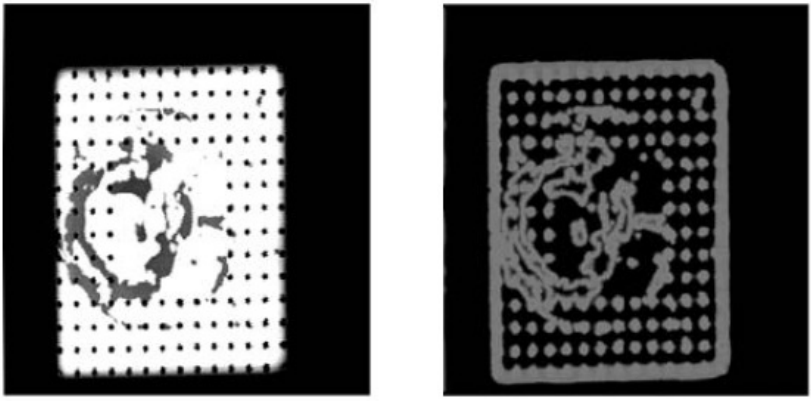
Galiausiai, mikrorinkinių tyrimai yra tipiškas didelio našumo tyrimo, susijusio su automatizuotu vaizdų apdorojimu, siekiant pagreitinti apdorojimo procesą ir sumažinti žmogiškųjų klaidų skaičių, pavyzdys. Vaizdų su mikrorinkiniais apdorojimas apima keletą gerai žinomų žingsnių. Pradedama nuo tiriamojo vaizdo su mikrorinkiniais užfiksavimo (capture) ir baigiama kokybiškai vertinamų genų išraiškų reikšmėmis bei galimais kokybės matavimais.

Puslaidininkių industrijoje dėl ultragarsinio C-modos skanavimo akustiniu mikroskopu (C-SAM) metodo gebėjimo be jokių nuostolių aptikti defektus, integruotų schemų gamyboje jis plačiai naudojamas patikimumo testuose ir gaminio tikrinimuose. Tačiau paveikslų analizė ir defektų identifikavimas smarkiai priklauso nuo juos atliekančių inžinierių patirties ir nėra naudojama jokia atpažinimo sistema; dalinai priklausoma nuo naudojamos atpažinimo sistemos, kuri paremta kompiuteriniais vaizdų apdorojimo algoritmais ir nėra tinkama C-SAM paveikslams, nes yra jautri triukšmams. Aptariama dvimačių pilkų C-SAM paveikslų analizė, paremta netiesiniu Mumford-Shah modeliu (5 pav.), o defektų atpažinimas atliekamas atraminių vektorių klasifikatoriaus pagalba (Zhang *et al.* 2004).

Automatiškai tikrinant integruotų schemų lustus puslaidininkių elementų industrijoje mašininis vaizdavimas vaidina labai svarbią rolę. Integruotų schemų gamyboje pagrindinis automatizuotas tikrinimo procesas sudarytas iš maskavimo ir skalės tikrinimo šablonų gamybos procese bei galutinio rezultato (lusto) kokybės tikrinimo. Zhou ir Kassim (Zhou *et al.* 1998) pristatė greitą metodą įspaudų nebuvimo (trūkio) nustatymui integruotose schemose, naudojant optimalius filtrus tiesiniams požymiams nustatyti ir kitas požymių išryškinimo technikas. Dinesh and Teoh (Dinesh *et al.* 1989) defektų nustatymui, kurie galimai egzistuoja integruotų schemų lustuose, sukūrė programinį paketą. Defektų atpažinimas realizuojamas lyginant paveikslo duomenis su iš anksto apibrėžta slenksčio (threshold) reikšme.

Net jeigu objektų atpažinimui ir yra pakankamas skaičius tinkamų kompiuterinių algoritmų, tai turėtų būti bent keletas sistemų, tinkančių praktiniam naudojimui, tačiau dauguma tokių sistemų negali būti adaptuojamos esant kitokioms sąlygoms. Pagrindiniai tokių sistemų trūkumai susiję su kompleksiškumu, atsirandančiu susidarant triukšmams, pozicijos pokyčiams ir apšvietimo sąlygoms. Tuo labiau, kad daugelyje vaizdų apdorojimo algoritmų naudojamas fiksuotas parametrų skaičius dažnai linkęs prastėti algoritmo vykdymo metu. Pastaruoju metu atraminių vektorių klasifikatorių SVM (*angl. Support Vector Machine*) metodai tapo labai efektyvūs šablonų atpažinime (Vapnik 1995).

Toks klasifikatorius yra naujas ir labai geras šablonų atpažinimo įrankis. Naudojant jį galima geriau apibendrinti sistemos apmokymo ir atpažinimo procesus. Dideliam mokymo duomenų rinkiniui, paprastai, parenkamas nedidelis atraminių vektorių rinkinys, kuris būtinas tikslinant klasifikatorių, siekiant minimizuoti skaičiavimus atpažinimo metu. Tuo labiau, kad netiesiniai klasifikatoriai daugiamatėse erdvėse gali naudoti mažą mokymo duomenų rinkinį. Tai gali būti tinkama integruotų schemų atpažinime, su joms būdingais defektais, turint omeny tai, kad tai gali būti panaudota realiame laike automatiškai tikrinti objektų kokybę, esant jų formų, formatų ar ryškumo pokyčiams. Paveikslų apdorojimo algoritmai sudaryti iš paveikslų segmentavimo ir požymių nustatymo algoritmų.



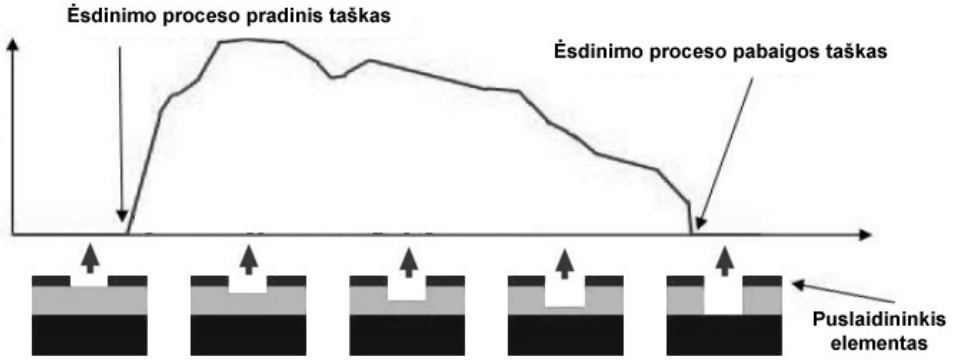
(a) (b)

5 pav. C-SAM paveikslo segmentavimo rezultatas. (a) originalus C-SAM paveikslas, (b) Mumford-Shah briaunos radimo rezultatas

Identifuokuoti bet kokioms proceso metu atsirandančioms anomalijoms puslaidininkių elementų gamyboje gali būti naudojamas ėsdinimo proceso kreivės galutinis taškas. Produkto gamybos kreivės taškų pokyčių stebėsena realiame laike suteikia galimybę iš anksto nustatyti tokias anomalijas (Chen *et al.* 2006). Autoriai aprašo galimą būdą, kaip automatizuoti ekspertinį (rankinį) stebėjimą ir kaip analizuoti kreives gamybos metu.

Duomenys, gauti skenuojant objektą, išreiškiami kvadratinėmis lygtimis. Dviejų kvadratinių lygčių sprendimo rezultatas yra pokyčio taškas. Šablonų palyginimas atliekamas lyginant skirtingas pokyčio taškų būsenas. Dauguma tų būsenų generuojamos esant kreivės pokyčiui proceso metu. Realaus ir siekamo pokyčio palyginimas atliekamas tam, kad būtų galima nustatyti, kurioje vietoje

atsiranda pokytis. Bet kokiu atveju, Ge ir Smyth (Ge *et al.* 2000) tyrimai, skirti galutinio ėsdinimo taško nustatymui, naudojami laiko ir ėsdinimo kreivės pokyčiams fiksuoti. Taip siekiama stebėti anomalius kreivės pokyčius viso produkcijos gamybos proceso metu nuo to momento, kai baigiamas medžiagų nusodinimo procesas, kuris gali turėti įtakos nenumatytiems kreivės pokyčiams puslaidininkio elemento gamybos procese. Todėl pokyčių identifikavimas tam tikru momentu gali būti ne pats optimaliausias būdas proceso anomalijai įvardinti, nes pakankamai sudėtinga nustatyti kiekvieną anomalaus rezultato atvejį. Ėsdinimo proceso galutinio rezultato kreivė naudojama vykstančių reakcijų pokyčiams stebėti (6 pav.). Esant normalioms aplinkybėms, numatytasis gaminys kiekvieno ėsdinimo proceso metu turi būti panašus ir gauta kreivė kiekvienu atveju turi turėti tokią pačią formą. Tačiau, jei gaunamas nenumatytas gaminio rezultatas, tai gamybos pokyčiai nulemia proceso kreivės rezultatą. Kreivės išlinkimo pokyčiai gali būti nagrinėjami kaip kreivės klasifikavimo problema.



6 pav. Ėsdinimo proceso kreivė

Puslaidininkio elemento ėsdinimo proceso rezultato kreivėms identifikuoti ir elementams klasifikuoti, autoriai siūlo naudoti grįžtamąjį neuroninį tinklą (BPNN), pritaikant Ge ir Smyth metodą (Ge *et al.* 2000) kreivei identidikuoti.

Be visų žinomų metodų, skirtų vaizdų apdorojimui ir atpažinimui, paminėtina, jog kokybiniams erdviniams skaičiavimams egzistuoja formali sistema – regionų-ryšių teorija (RCC) (Stell 2000). Ji aksiomiškai analizuoja erdvę, kurioje regionai suprantami kaip primityvai, o ne kaip taškų rinkinys. Formalus erdvės traktavimas iš esmės pradedamas pasirenkant vieną iš dviejų pradinių taškų. Atskiru atveju taškus galima traktuoti kaip primityvus, o regionus

konstruoti iš taškų rinkinių. Tai yra tradicinis metodas, naudojamas taškų rinkinių topologijoje. Kitu atveju erdvinės teorijos gali būti kuriamos taip, kad regionai suvokiami kaip primityvai, o taškai, net jei jie ir būtų naudojami, vis tiek suvokiami kaip atskiras regiono atvejis. Dirbtinio intelekto regionais pagrįstų erdvės modelių plotmėje buvo išvystyta tai, kas dabar žinoma kaip *kokybinė erdvinė samprata* – KES.

1.2. Regionų ir erdvinių ryšių tarp jų samprata. Regionų-ryšių teorija RCC

Šioje apžvalgoje pateiksiu keleto tyrėjų darbų santrauką apie tyrimus, susijusius su kokybine erdvine samprata.

Įvairių mokslininkų grupės išvystė daugybę teorijų, skirtų vaizduoti ir vertinti kokybinius erdvinius ryšius tarp regionų. Regionų teorija grindžiama primityvia erdvine esybe ir tuo remiantis parodoma, kaip gali būti konstruojama turtinga kalba, naudojant tik kelis primityvus. Ši kalba gali būti vienokia išgaubtiems paviršiams, kitokia įdubusiems paviršiams, bei galimi skirtingi jos plėtiniai neapibrėžtiems regionams aprašyti. Peržvelgsiu esmines technikas statiniams erdviniams vaizdams aprašyti.

1.2.1. Regionai ir erdviniai ryšiai

Kokybinė samprata (KS) šiuo metu tapo tvirta dirbtinio intelekto mokslo sritimi. Remiantis KS, bandoma paprastai perteikti mūsų kasdienes elementarias žinias apie supantį fizinį pasaulį, taip pat esmines mokslininkų ir inžinierių abstrakcijas fiziniams modeliams aprašyti. Turint šios srities žinių ir atitinkamus suvokimo metodus, kompiuteris gali daryti prognozes ar diagnozes, bei kokybiškai paaiškinti fizinę sistemos būseną net ir tada, kai tikslus kokybinis apibūdinimas neįmanomas ar sunkiai įsivaizduojamas. Kaip teigia KS bendruomenė, vaizdavimas nėra taip lengvai apibrėžiamas kaip kiekybinis. Taip yra ne tik todėl, kad jis yra simbolinis ir turintis diskretų matų skaičių, bet ir todėl, kad požymiai šiuose diskretiškumuose susiję su sudėtingu sistemos arba jos būsenos modelio aprašymu.

Daugelis KS sistemų aprašomos skaliarinėmis išraiškomis. Taip yra net ir tokiais atvejais, kai sistemos aprašo šokinėjančio kamuolio trajektorijos aukštį, skysčio talpoje kiekį, kūno temperatūrą. Net jei sistemai aprašyti ir reikalingos erdvinės išraiškos, jos retai gali būti aprašomos kokiais nors formalumais.

Pastaruoju metu smarkiai daugėja tyrimų KS srityje, o ypatingai *žinių vaizdavimo* (Knowledge Representation) srityje. Šioje srityje atrasta daugybė

kokybinių erdvinių vaizdavimo metodų, kurie remiasi tranzityvumo taisykle. Yra dar daugiau galimų kokybinės erdvinės sampratos (KES) taikymo sričių; tai gali būti, pavyzdžiui, fizinių sistemų vaizdavimas – tradicinė KS sritis. O kai kurie tyrėjai kaip pagrindinį uždavinį įvardija būtinybę sukurti kalbos semantiką erdvinių išraiškų pateikimui, kuri turėtų būti daugiau kokybinė, nei kiekybinė. Kita didelė KES taikymo erdvė yra geografinės informacinės sistemos (GIS).

Šioje apžvalgoje daugiausia dėmesio bus skirta apžvelgti konkretų KS formalizmą – RCC, kuris buvo suformuotas Leeds universiteto keleto metų laikotarpiu išspausdintose publikacijose (autorių Randell, Cui ir Cohn 1992 metais (Randell *et al.* 1992), Cohn, Randell, Cui ir Bennett 1993 metais, Cui, Cohn ir Randell 1993 metais, Bennett 1994 metais, Gotts 1994 metais, Cohn ir Gotts 1996 metais, Gotts, Gooday ir Cohn 1996 metais, ir Cohn 1995 metais) ir kuris šiuo metu vis dar yra tyrimų objektas. Vienas iš RCC akronimo vertimų yra *Regional Connection Calculus* – fundamentalus RCC požiūris yra toks – pirminiais primityvais vadinamos erdvinės esybės, t.y. erdviniai regionai, o ne tradiciniai matematiniai bemačiai (neišmatuojami) taškai. Ryšio tarp regionų primityvas yra sąryšis, kuris suteikia kalbai galimybę vaizduoti erdvinių esybių struktūras.

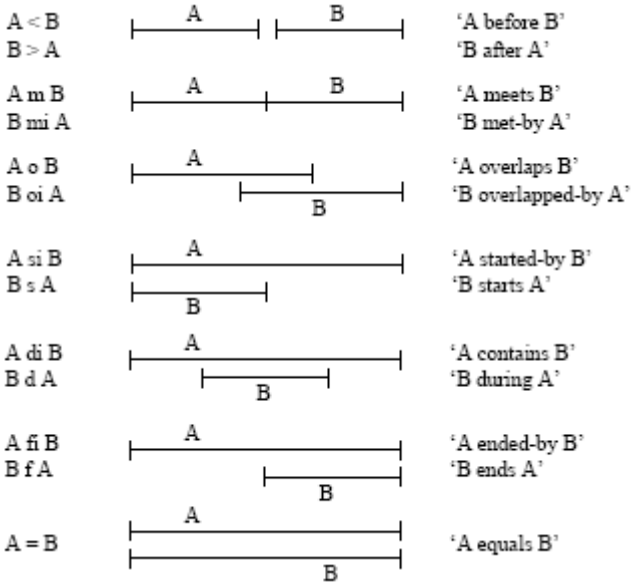
Įvardijama daugybė priežasčių kokybinei erdvinei analizei vengti iš taško perspektyvos pagrįsto vertinimo ir paprasčiausiai naudoti standartinius matematinius topologinius įrankius. Pirmiausia, regionai suteikia paprastą būdą vaizduoti bet kokius erdvinius neapibrėžtumus, kurie tinkami kokybinei analizei. Tuo labiau kad erdvė, reiškianti kažkokį realų kūną, bus daug dažniau panaši į kažkokį regioną, nei į tašką. Netgi paprasta kalba kalbant, sąvoka „taškas“ nėra tas pats, kas matematinis taškas: smailus pieštukas vis tiek pieš tam tikro storio liniją. Tai taip pat verčia mąstyti apie galimybę matematinio taško sąvoką naudoti kaip primityvaus regiono sąvoką. Standartinės matematinės topologijos, bendrosios topologijos ir algebrinės topologijos požiūriu taškas yra fundamentalus. Primityvios esybės ir sudėtingos erdvinės esybės suvokiamos kaip taškų rinkiniai. Bet kokiu atveju, tokiu požiūriu aprašoma erdvės koncepcija skiriasi nuo intuityvaus jos suvokimo; tai iš dalies priimtina taškinei topologijai, bet algebrinė topologija dėl esamų sąsajų tarp struktūrų reikalauja gerokai abstraktesnio interpretavimo. Atvejai, kai KES naudoja ne standartines taškais paremtas matematines technikas, yra gerokai išsamesni.

Žinoma, galbūt šiems tikslams galima adaptuoti tradicinį matematinį formalizmą – ši strategija kartais naudojama. Bet jei mes turime vaizdą, kuris iš dalies arba net visiškai reiškia erdves, užpildytas fiziniais objektais, tai, a priori, jo ontologijai aprašyti visiškai nereikalingi taškai ir tuo (tradiciniu) keliu neturėtų būti einama, o turėtų būti stengiamasi naudoti regionus, kaip primityvus, ir turėtų būti atsisakoma tradicinių matematinių būdų.

Kadangi RCC labiausiai susijusi su Clarke sistema (Clarke 1981), verta panagrinėti jo RCC sistemos savybių aprašymą. Clarke išsamiau vaizduoja regionais aprašomos erdvinės sampratos naudą; jis aprašė daugybę teoremų, iliustruojančių svarbias šios teorijos savybes. Sistemos pagrindas yra primityvus ryšys C(x,y) reiškiantis, kad „*x liečiasi su y*“.

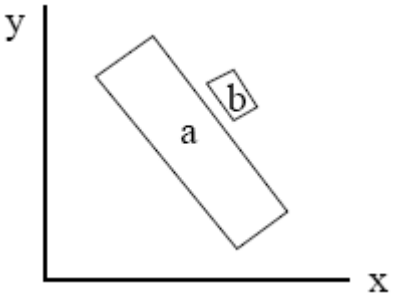
Tarkime, kad regionai sudaryti iš aibės taškų; taškų būsenos regionuose (kalbant C(x,y) terminais) galios tada, kai bent vienas taškas iš regionų *x* ir *y* liesis. Yra daugybė aksiomų, kurios charakterizuoja galimus C(x,y) (arba C) atvejus. Clarke sistemoje yra galimybė išskirti regionus, kurie topologiškai yra atviri ar uždari. Uždaras regionas – tai toks regionas, kuris turi briauną, sudarytą iš taškų (arba, kitaip tariant, turi kontūrą), o atviras objektas yra toks, kuris kontūro neturi. Clarke sistemoje apibrėžta daugybė galimų topologinių ryšių (objektai liečiasi, vienas objektas yra kito objekto tangentinė dalis ir pan.), o daugybė objekto savybių pagrįstos šiais ryšiais. Clarke apibrėžia labai daug kitų koncepcijų, tokių kaip *kvazi-Bulio* funkcijos, topologinės funkcijos.

Allen'o intervalinė erdvinių ryšių samprata (Allen 1983) geriausiai žinoma dirbtinio intelekto srityje. Jo teorija apibrėžia trylika JEPD ryšių iškiliems intervalams (7 pav.).



7 pav. Allen'o trylika intervalas-intervalas ryšių

Kai kurie autoriai, pavyzdžiui Mukerjee ir Joe, naudojo Allen'o sistemą erdviniam vaizdavimui, kiekvienai dimensijai pritaikydami tą sistemą. Tačiau nors sistema patraukli daugeliu aspektų, bet tam tikrais atvejais gana ribota – esant stačiakampiams objektams – ir tokiais atvejais nėra pakankamai išraiški (8 pav.).



8 pav. Stačiakampiai objektai

Allen'o teorija gali būti naudojama bet kuriai erdvės dimensijai, bet tai tinka tik stačiakampiams objektams, išlygiuotiems pagal vieną ašį. Šioje diagramoje (8 pav.) stačiakampiai nėra taip išlygiuoti ir tokiu atveju mažasis stačiakampis yra didžiojo dalis projektuojant ir į vieną, ir į kitą ašį atskirai, bet dvimatėje erdvėje taip nėra. Tačiau to negalima aprašyti naudojant vienmates Allen'o sistemos projekcijas.

1.2.2. RCC teorija

Pirmiausia reikia tiksliai apibrėžti, ką reiškia sąvoka regionas. Visų pirma, regionai turėtų turėti sutartinę dimensiją, jie visi turi būti tos pačios dimensijos ir negali priklausyti skirtingoms. Tokie regionai vadinami taisyklingais. Natūraliai, bendruoju atveju, dimensija turėtų būti trimatė, tačiau norint supaprastinti vaizdavimą daugeliu atvejų naudojami dvimačio pasaulio regionai (o tai yra įprasta pvz. GIS sistemose).

Pirminė sistema buvo aprašyta Randell ir Cohn (1989) (Randell *et al.* 1989), kuri daugiausiai rėmėsi Clarke sistema. Tačiau vėliau Randell, Cui ir Cohn (1992) (Randell *et al.* 1992) apibrėžia patobulintą teoriją, kuri nuo Clarke skiriasi vienu svarbiu atžvilgiu. Šiuo atveju skiriasi C(x,y) suvokimas: Clarke supratimu, regionai *x* ir *y* turi bent vieną bendrą tašką, o pagal naują sampratą regionai *x* ir *y* liečiasi bent vienu tašku.

Dėl šio C suvokimo pokyčio reikia naujai apibrėžti daugelį Clarke ryšių, kuriuos norima naudoti toliau. Dvi C refleksyvumo ir asimetrijos aksiomos lieka nepakitusios:

$$\forall x[C(x,x)] \tag{1}$$

$$\forall x,y[C(x,y) \rightarrow C(y,x)] \tag{2}$$

Naudojant C(x,y) galima apibrėžti pagrindinius diadinius ryšius. Apibrėžimas ir numanoma reikšmė pateikta 1 lentelėje. Visi apibrėžtų funkcijų ir predikatų argumentai yra *Region* klasės. Ryšiai P, PP, TPP, NTPP yra nesimetriniai, bet gali būti inversiški. Inversijai naudojamas žymėjimas Φi, kur Φε{P, PP, TPP, NTPP}, pavyzdžiui, TPPi.

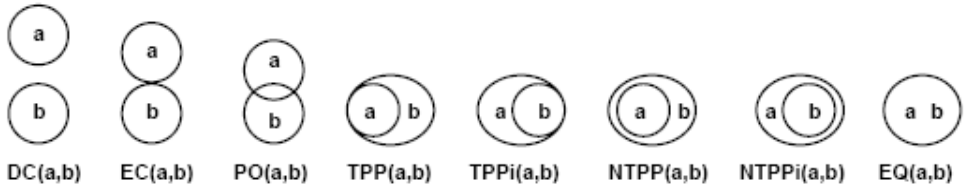
1 lentelė. Kai kurie C kalbos ryšių apibrėžimai

Ryšys	Vertimas	*Apibrėžimas*
DC(x,y)	x nesiliečia su y	$\neg C(x,y)$
P(x,y)	x yra y dalis	$\forall z[C(z,x) \rightarrow C(z,y)]$
PP(x,y)	visas x yra y dalis	$P(x,y) \wedge \neg P(y,x)$
EQ(x,y)	x ir y yra identiški	$P(x,y) \wedge P(y,x)$
O(x,y)	x persidengia su y	$\exists z[P(z,x) \rightarrow P(z,y)]$
DR(x,y)	x nepriklauso y	$\neg O(x,y)$
PO(x,y)	x dalinai persidengia su y	$O(x,y) \wedge \neg P(x,y) \wedge \neg P(y,x)$
EC(x,y)	x liečiasi su y	$C(x,y) \wedge \neg O(x,y)$
TPP(x,y)	visas x yra tangentinė y dalis	$PP(x,y) \wedge \exists z[EC(z,x) \wedge EC(z,y)]$
NTPP(x,y)	visas x yra netangentinė y dalis	$PP(x,y) \wedge \neg\exists z[EC(z,x) \wedge EC(z,y)]$

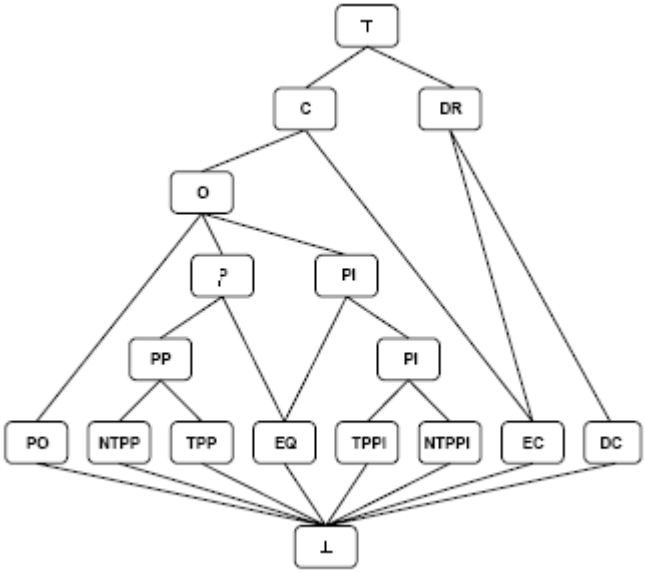
Iš visų apibrėžtų ryšių, tie, kurie yra rinkinyje, {DC, EC, PO, EQ, TPP, NTPP, TPPi, NTPPi} (pavaizduota 9 paveiksle), yra JEPD įrodymas.

JEPD – teorija, sudaryta iš šių aštuonių ryšių rinkinio, vadinama RCC8. Visas rinkinys, sudarytas iš aukščiau apibrėžtų ryšių, gali būti vaizduojamas

ryšių tinklu. Tai pavaizduota 10 paveiksle. Simbolis ⊤ vadinamas tautologija, o simbolis ⊥ yra neiginys. Šių ryšių išsidėstymas skirstomas į silpnuosius (daugiausia pagrindinius) ryšius, sujungtus tiesiogiai su viršumi, ir stipriuosius (daugiausia specifinius) ryšius, sujungtus su apačia. Pavyzdžiui, TPP apima PP, o PP apima ir TPP, ir NTPP.



9 pav. 8 JEPD ryšių vaizdavimas



10 pav. Diadinių ryšių vaizdavimas ryšių tinklu C kalba

1.2.3. RCC8 teoremos

Čia cituojamos kelios teoremos, kurios pavaizduoja RCC8 ir Clarke sistemų skirtumus. Pirmiausia, Clarke sistemos atveju du regionai *x* ir *y* yra identiški, tai bet koks kitas regionas, liečiantis *x*, taip pat liesis ir su *y*, ir atvirkščiai:

$$\forall x, y[x = y \leftrightarrow \forall z[C(z,x) \leftrightarrow C(z,y)]] \quad (13)$$

Naujoje teorijoje, atitinkanti teorema aprašanti identiškumą

$$\forall x, y[x = y \leftrightarrow \forall z[O(z,x) \leftrightarrow O(z,y)]] \quad (14)$$

tampa įrodymu, skirtingai negu Clarke sistemoje: bet koks regionas *z*, kuris dengia uždarą regioną *x*, taip pat uždengs ir jo vidų (ir atvirkščiai), taip tampa identiška tai aksiomai, bet Clarke atveju atviras ir uždaras regionai interpretuojami skirtingai, todėl jie negali būti identiški.

Turbūt įtikinamiausia priežastis, leidusi atsisakyti Clarke semantikos C, yra kita teorema, kuri išreiškia įprastinį erdvės suvokimą – jeigu duota kažkokia regiono dalis, tuomet yra ir kita (atskira nuo pirmos, diskreti) to regiono dalis:

$$\forall x, y[PP(x,y) \rightarrow \exists z[P(z,x) \wedge \neg O(z,y)]] \quad (15)$$

Tai gali būti įrodoma naujoje, bet ne Clarke teorijoje: uždaro regiono vidus yra visiška jo dalis (*proper part*), bet daugiau vientisų dalių jame nėra; tuo tarpu Clarke sistemoj regiono kontūras nėra regiono dalis.

Iš to išplaukianti teorema:

$$\forall x, y[PO(x,y) \rightarrow [\exists z[P(z,y) \wedge \neg O(z,x)] \wedge \exists w[P(w,x) \wedge \neg O(w,y)]]] \quad (16)$$

Tai taip pat yra naujosios teorijos teorema, bet ne Clarke. Kontrpavyzdį Clarke teorijoje galima išvesti tada, kai duoti du pusiau atviri apskriti regionai *x* ir *y* (vienodu spinduliu), kur *x* regiono šiaurinis pusapskritimis yra atviras, o pietinis uždaras, šiaurinis *y* regiono pusapskritimis uždaras, o pietinis atviras. Jeigu regionai *x* ir *y* yra vienas ant kito taip, kad jų centrai sutampa, tai *x* ir *y* bus dalinai persidengiantys (*partialy overlap*), bet *x* nebus diskretus nuo *y* (visi taškai sutaps) ir atvirkščiai.

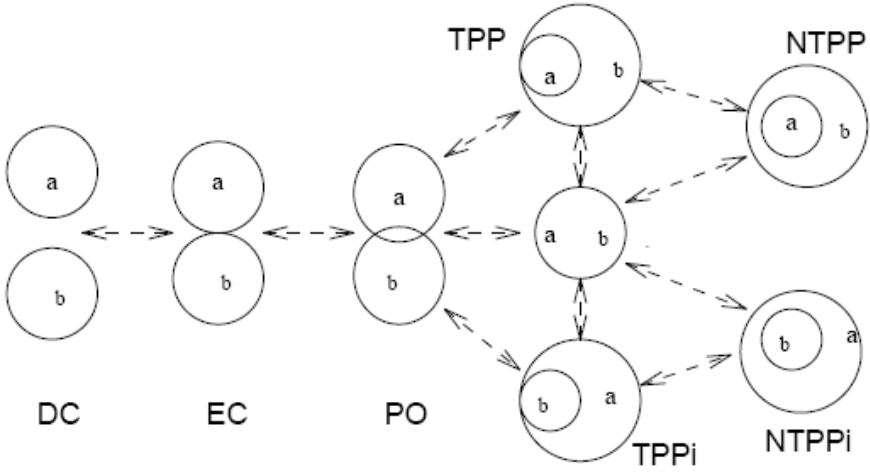
Kitas esminis skirtumas tarp naujosios ir Clarke sistemos susijęs su ryšiais tarp regiono ir jo papildinio. Naujoje teorijoje $\forall x[EC(x, compl(x))]$ reiškia, kad regionai liečiasi su jų papildiniais, kas reiškia labai aiškią išvadą, o Clarke atveju regionai negali liestis su savo papildiniais $\forall x[DC(x, compl(x))]$.

1.2.4. RCC ryšių tolydumas

Iš esmės ši teorija apžvelgiama tiktai statinės erdvės ypatybių požiūriu, o ne vystoma kaip teorija erdvinių regionų konfigūracijos pokyčiams laike skaičiuoti. Tačiau toks dinamiškas samprotavimas aiškiai yra labai svarbus daugelyje situacijų. Galima daryti prielaidą, kad daugelyje sričių pokyčiai yra nuolatiniai. KS bendruomenė nuolat pabrėžia tokio požiūrio reikšmę. Kokybinės erdvinės sampratos kontekste tęstinumas reiškia tai, kad formos deformavimas yra

nuolatinis, nepriklausomai nuo to, ar judesys nutrūkstamas ar ne. 11 pav. vaizduoja galimus būsenos pokyčius RCC8 tęstinumo atveju. Tai, kas vadinama *tolydžiais tinklais*, pasirodo turi lygiai tą pačią sampratą kaip ir konceptuali kaimynystė. Galton savo knygoje (Galton 1995) atliko nuodugnią tęstinumo analizę, nes visa tai tinka ir RCC8 atveju. Egenhofer ir Al-Taha (Egenhofer *et al.* 1992) formuoja jo teorijai panašias (nors ir ne identiškas) struktūras (yra mažiau sąsajų apskritai), naudodamas sampratą, pavadintą artimiausiu topologiniu atstumu.

Kai kurie autoriai pastebėjo įdomų santykį tarp sudėties/tranzityvumo ir konceptualios kaimynystės. Skaičiavimų įvairovei kiekviena įvestis sudėtyje suformuoja susijusį konceptualios kaimynystės diagramos subgrafą. Pavyzdžiui įvestis, kuri apėmė DC ir PO turės taip pat apimti EC. Freksa (Freksa 1992) naudojosi šia mintimi norėdamas sukurti kompaktišką sudėties atvejį Allen‘o sistemai. Freksa sumažintas atvejis leidžia realizuoti kompozicijas ryšių rinkiniui (praktiškai konceptuali kaimynystė), o ne pavieniams ryšiams. Šis metodas gali būti taikytinas Allen‘o teorijos ir RCC sistemos kontekste. Truputį supaprastinant Freksa sąlygas tam, kad būtų galima pasirinkti ryšių rinkinius, galima realizuoti kompaktiškus RCC8 atvejo pavaizdavimus.



11 pav. RCC8 tolydumas

Šiame skyriuje apžvelgti metodai, nagrinėjantys šablonų struktūras skirtingais aspektais, aprašo specifines vaizdų apdorojimo ir atpažinimo technikas, kurios nagrinėja atskirų objektų dvimačiuose paveiksluose (šablonuose) identifikaciją. Išanalizavus kitų autorių darbus, galima išskirti

pagrindinius objekto paveiksle analizės aspektus – tai yra: atitikimas etaloniniam šablonui, analizuojamo objekto atitikimas realiam objektui, atskirų objektų ar defektų vaizde identifikavimas. Tačiau šie metodai **neleidžia kokybiškai analizuoti spalvinių objektų** (regionų) ir ryšių tarp jų.

Analizuojant savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūras galima aiškiai pasakyti, kad **jų sandarą efektyviausia analizuoti erdvinių primityvų – regionų, o ne taškų požiūriu**. Taip yra todėl, kad kokybinei struktūrų analizei vykdyti vertintinamos jose dalyvaujančios medžiagos (regionai) ir erdviniai ryšiai tarp jų. Maža to, **medžiagų forma šiuo atveju nesvarbi, todėl nėra reikalo vykdyti tam tikrų objektų struktūroje išskyrimą ir/ar jų lyginimą su pavyzdžiais**. Svarbu dar ir tai, kad medžiagų formų anomalijos gali lemti geresnį savaiminio formavimosi rezultatą, jei tenkinamos erdvinių ryšių sąlygos. Taip pat paminėtina, jog regionai puslaidininkių elementų struktūrose neturi rėmelių, todėl tinkamiausia struktūras analizuoti RCC8 formalizmo požiūriu.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados

1. Atsižvelgiant į savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų (šablonų) specifiką, buvo atlikta šablonų atpažinimo metodų analitinė apžvalga, leidžianti parinkti tinkamiausią metodą savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūroms atpažinti.
2. Skyriuje apžvelgti metodai, nagrinėjantys šablonų struktūras, aprašomos specifinės vaizdų apdorojimo ir atpažinimo technikos, kurios nagrinėja vientisų objektų arba defektų identifikaciją dvimačiuose paveiksluose ir/arba šablono atitikimą etaloniniam šablonui.
3. Atitikimas etaloniniam šablonui, vientisų objektų vaizde identifikavimas neleidžia kokybiškai analizuoti šablono spalvinių sričių (regionų) ir ryšių tarp jų, darant prielaidą, kad mums nesvarbi regionų forma.
4. Atsižvelgiant į analizuojamų šablonų specifiką ir apžvelgus kitų autorių darbus galima teigti, kad tinkamiausias būdas puslaidininkių elementų struktūrų lokaliems kokybiniams erdviniams ryšiams nustatyti yra formali sistema kokybiniams erdviniams skaičiavimams – regionų-ryšių teorija (RCC).

2

Kokybinė struktūros analizė savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų atpažinimui

Mikroelektronikos technologijoje egzistuoja tam tikrų objektų (puslaidininkių elementų) savaimingo formavimosi sistema. Savaimingo formavimosi rezultatas yra atsitiktiniai spalvoti dvimačiai paveikslėliai – šablonai. Specialisto vertinimu vienas iš tokių šablonų gali būti tinkamas, o kitas netinkamas, t.y. gali neatitikti objektui keliamų reikalavimų. Problema atsiranda tada, kai norima suklasifikuoti dvimačius spalvotus atsitiktinius paveikslėlius į du rinkinius, į dvi klases. Klasė $\mathbf{\Omega_1}$ aprašo puslaidininkių elementų struktūras, tinkamas pramoninei puslaidininkių gamybai, o klasė $\mathbf{\Omega_2}$ – netinkamas.

Automatizuotas puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimas gali padėti:

- pagreitinti puslaidininkinių elementų atrinkimą;
- sumažinti inžinierių darbo sąnaudas;
- gauti aukštesnės kokybės atrankos rezultatus.

Šiuo atveju atpažinimui yra svarbūs dvimatį paveikslą sudarančių regionų tarpusavio ryšiai, o atskirų objektų išskyrimas dvimačiame paveiksle, naudojant tam tikras paveikslų apdorojimo technikas (Düntsch *et al.* 2001; Tsai *et al.* 2001), nėra svarbus. Esminį vaidmenį objekto priklausomumui klasei $\mathbf{\Omega_1}$ nusako jį

sudarančių medžiagų (regionų) sąryšiai, nepriklausomai nuo regionų geometrinės figūros.

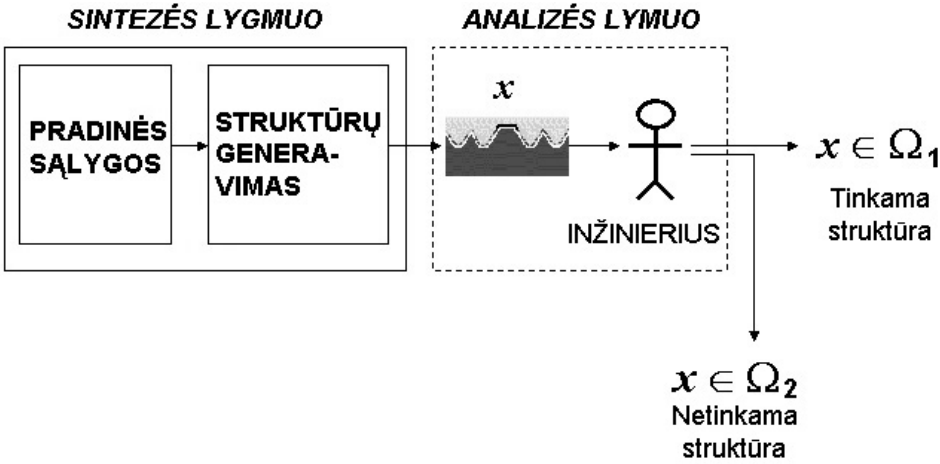
2.1. Atpažinimo uždavinio formulavimas

Savaimingai besiformuojantys puslaidininkiniai elementai generuojami imituojant savaimingo formavimosi (evoliucijos) procesus (Janusonis 2004; Leonas *et al.* 2004; Telksnys 2004). Inžinierius nustato pradines sąlygas dirbtiniams elementams generuoti:

1. elementų geometriją;
2. elementų skaičių;
3. medžiagas, naudojamas elementams generuoti.

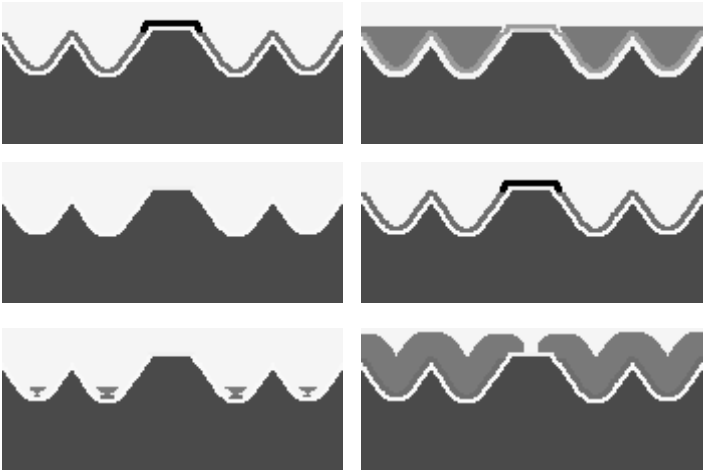
Pradinės sąlygos turi įtakos savaimingo formavimosi elementų topologijoms, bei jų atpažinimo kriterijams. Skirtingos pradinės sąlygos skirtingai nulemia savaimingo formavimosi rezultatą – puslaidininkių elementų rinkinius.

Inžinierius taip pat pasirenka sąveikos matricą, kuri apibrėžia dirbtinių plokščių sistemų generavimo procesą. Tradicinis puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi modelis pavaizduotas 12 paveiksle:

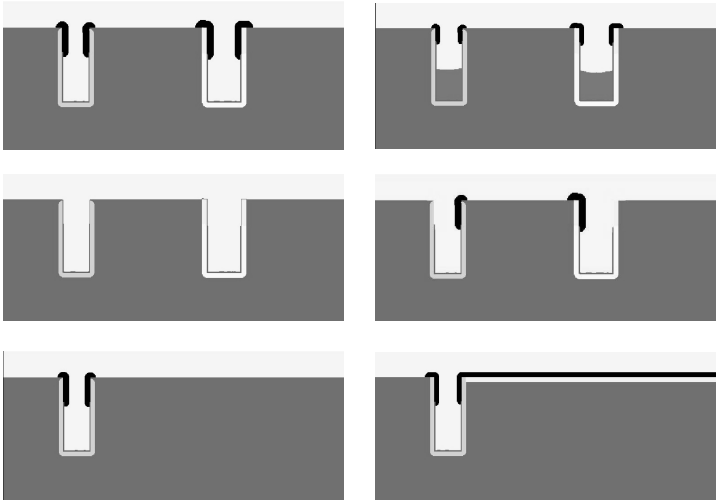


12 pav. Tradicinis puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi modelis. x – šablonas – savaimingo formavimosi dirbtinės plokščios sistemos dvimatis spalvotas paveiksliukas

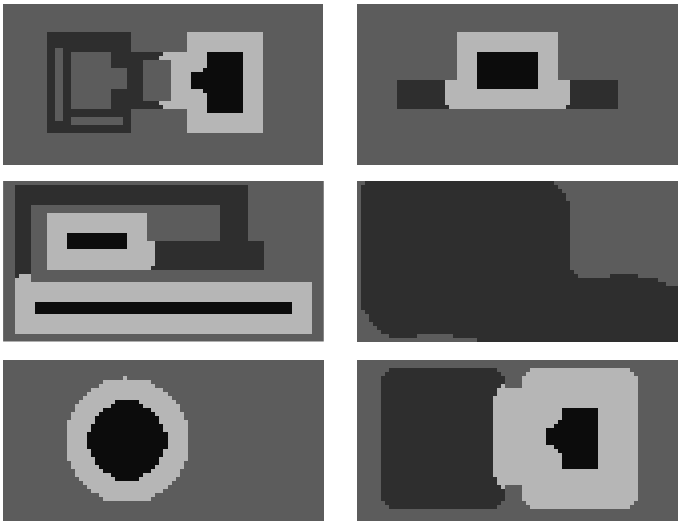
Tarkime, kad savaimingo formavimosi dirbtinio objekto struktūra sudaryta iš *n* medžiagų $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1,...,\mathbf{x}_n)$. 13 – 16 paveiksluose pateikti keturi skirtingi savaimingo formavimosi rezultatų rinkiniai, turintys skirtingą topologinę struktūrą ir ją sudarančias medžiagas.



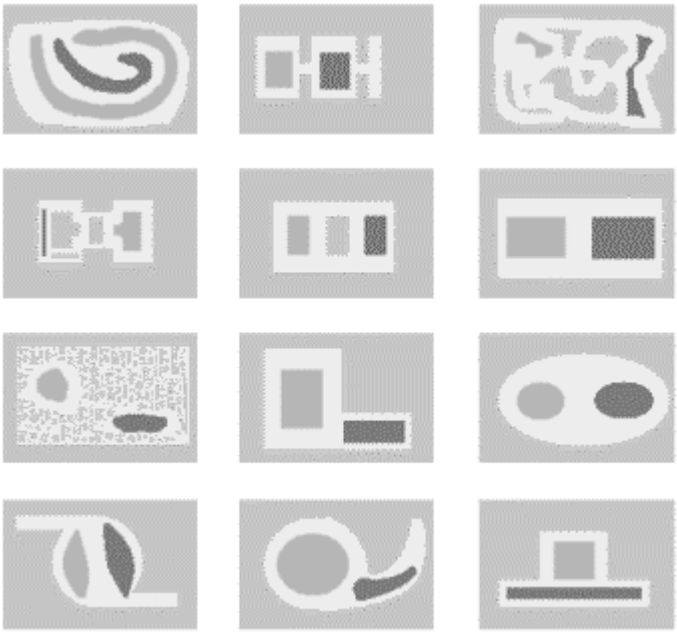
13 pav. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų rinkinys R1



14 pav. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų rinkinys R2



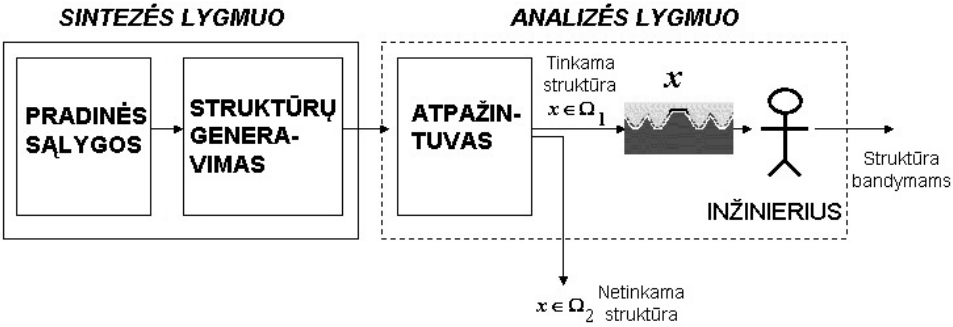
15 pav. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų rinkinys R3



16 pav. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų rinkinys R4

Deja, savaimingo formavimosi dirbtinių plokščių sistemų – šablonų atpažinimas yra labai daug laiko ir pastangų kainuojantis procesas. Peržiūrėti didelį kiekį šablonų – dvimačių spalvotų paveikslėlių – fiziškai, o taip pat ir dėl laiko trukmės yra neįmanoma, net jeigu įvesime tam tikrus apribojimus.

Puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi modelis, paremtas šablonų atpažinimu, pavaizduotas 17 paveiksle.

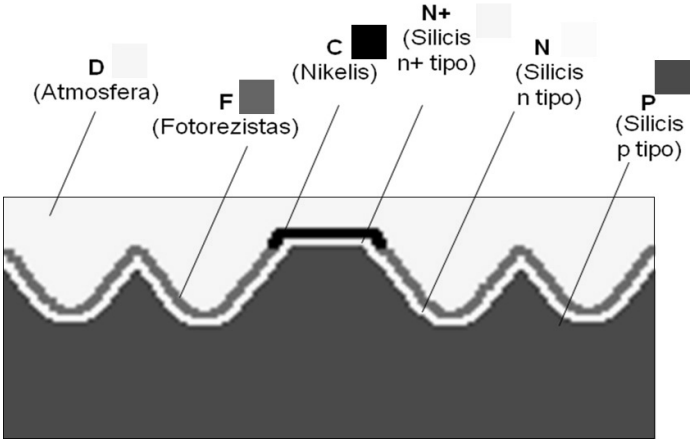


17 pav. Puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi modelis, paremtas šablonų atpažinimu

Kiekvieno puslaidininkių elementų rinkinio formavimosi rezultatas yra objektai, kurių struktūros sudarytos iš skirtingų medžiagų (regionų). Topologiniam puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui yra svarbūs tik jas sudarantys regionai ir sąryšiai tarp jų. Žinant kokios medžiagos naudojamos generuojant objektus, bet kurio rinkinio puslaidininkio elemento charakteristikos (priklausomumas klasei $\mathbf{\Omega_1}$) gali būti vertinamos naudojant tą pačia (disertacijoje aprašytą) metodiką. Todėl išsamiau analizuoti verta vieną pasirinkto rinkinio puslaidininkį elementą.

Detaliau aptarsiu rinkinio R1 rezultatą, kurį sudaro puslaidininkių elementų struktūros, sudarytos iš n=6 medžiagų $\mathbf{X = (x_1,...,x_6)}$ ir turinčios tam tikrą inžinieriaus suformuluotą geometriją. Kiekvieną iš medžiagų atitinka puslaidininkio elemento struktūros regionai **X = (P, N, N+, C, D, F)**.

18 paveiksle pateiktas tokio dirbtinio puslaidininkio elemento struktūros iš 6 medžiagų (regionų) pavyzdys su medžiagų žymėjimais. Puslaidininkio elemento regionų žymėjimas pateiktas 2 lentelėje.



18 pav. Savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūros pavyzdys

2 lentelė. Puslaidininkio elemento struktūros regionų žymėjimas

Regiono žymėjimas	Regiono spalva	Medžiaga
P	Pilka	Silicis, p sritis
N	Gelsva	Silicis, n sritis
C	Juoda	Nikelis (kontaktas)
N+	Geltona	Silicis, n+ sritis
D	Žydra	Atmosfera
F	Žalia	Fotorezistas

Reikia nuspręsti, priimti sprendimą, kurios iš sugeneruotų puslaidininkių elementų struktūrų tinkamos gamybai ($\mathbf{\Omega_1}$), o kurios tam netinkamos ($\mathbf{\Omega_2}$). Būtina padaryti sprendimą $\mathbf{X \in \Omega_s;\ s = 1,2;\ s - ?}$. Šiuos sprendimus galima priimti naudojant spalvotų paveikslėlių, sugeneruotų objektų, vizualią analizę.

Deja, savaimingo formavimosi dirbtinių objektų – šablonų atpažinimas labai daug darbo ir pastangų reikalaujantis procesas. Net jeigu įvestume tam tikrus apribojimus, peržiūrėti labai didelį dvimačių spalvotų paveikslėlių kiekį yra neįmanoma.

Todėl puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo automatizavimas gali smarkiai sumažinti darbo sąnaudas sprendimų priėmimo procese. Tokiu atveju būtina suformuluoti požymius, kurie bus naudojami puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimui.

2.2. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų požymiai

Savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūra sudaryta iš n medžiagų (regionų) $\mathbf{X} = (\mathbf{x_1,...,x_n})$. Jos priklausomumą klasei $\mathbf{\Omega_1}$ nusako požymių vektorius:

$$Z_i = \begin{pmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \\ . \\ . \\ z_{ij} \end{pmatrix}; \; kur \;\; i = 1,...,k; \; j = 1,...,l; \;\; kur \;\; k,l \in N; \tag{17}$$

Tuomet:

$$X(Z_i) \in \Omega_1; kai \;\; i = 1; \tag{18}$$

$$X(Z_i) \in \Omega_2; kai \;\; i = 2,...k; \tag{19}$$

Tam, kad puslaidininkis elementas iš rinkinio R1 atitiktų jam keliamus reikalavimus, jo struktūra turi tenkinti tokias salygas:

$z_{1\,1}$ – Elementai sudaryti iš šešių skirtingų regionų (P, F, N, C, N+, D),

$z_{1\,2}$ – P ir C regionai privalo būti vientisi,

$z_{1\,3}$ – F regionas negali būti vientisas,

$z_{1\,4}$ – Regionai C ir D turi liestis,

$z_{1\,5}$ – Regionai C ir N+ turi liestis,

$z_{1\,6}$ – Regionai P ir N turi liestis,

$z_{1\,7}$ – Regionai P ir N+ turi liestis,

$z_{1\,8}$ – Regionas D negali liestis su P, N ir N+ regionais

$z_{1\,9}$ – Elemento struktūroje negali būti kitų regionų * (20)

* Puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi metu dalyvauja kitos medžiagos, kurių susiformavusio puslaidininkio elemento struktūroje neturėtų būti.

Puslaidininkių elementų savaimingo formavimosi rezultatų atpažinimas, remiantis aukščiau išskirtais požymiais, gali būti realizuojamas kokybine struktūros analizės teorija, tiksliau, konkrečiu jos formalizmu – RCC, suformuluotu *Clarke* (Clarke 1981), o vėliau tobulinta daugelio autorių, tokių kaip *Cohn, Randell, Cui, Bennett* (Cohn *et al.* 1997; Randell *et al.* 1989; Randell *et al.* 1992).

2.3. RCC taikymas topologiniam šablonų atpažinimui

Fundamentalus RCC požiūris toks – pirminiais primityvais vadinamos erdvinės esybės, t.y. erdviniai *regionai*, o ne tradiciniai taškai. Ryšio tarp regionų primityvas yra sąsaja, kuri suteikia kalbai galimybę vaizduoti erdvinių esybių struktūras.

Kokybinė struktūros analizės teorija naudojama dvimačių vaizdų (pavyzdžiui, GIS) analizėje. Ši teorija taip pat vadinama C teorija nuo žodžio *Connectivity* ir charakterizuojama keletu esminių aksiomų. Visi teorijoje naudojami argumentai sutartinai vadinami regionais.

Sistemos pagrindas yra primityvus ryšys **C(x,y)** reiškiantis, kad „*x* liečiasi su *y*“.

Pagrindinės RCC aksiomos yra tokios:

$\forall x[C(x,x)]$ (regionas liečiasi pats su savimi) (21)

$\forall x \forall y\ [C(x,y) \rightarrow C(y,x)]$ (jei regionas *x* liečiasi su regionu *y*, tai ir regionas *y* liečiasi su regionu *x*) (22)

$DC(x,y) \equiv_{def} \neg C(x,y)$ (regionai *x* ir *y* nesiliečia) (23)

$EC(x,y) \equiv_{def} C(x,y) \wedge \neg O(x,y)$ (regionai *x* ir *y* liečiasi) (24)

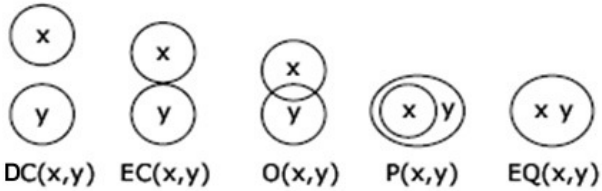
$O(x,y) \equiv_{def} \exists z[P(z,x) \wedge P(z,y)]$ (regionai *x* ir *y* persidengia) (25)

$P(x,y) \equiv_{def} \forall z[C(x,z) \rightarrow C(z,y)]$ (regionas *x* yra regiono *y* dalis) (26)

$EQ(x,y) \equiv_{def} P(x,y) \wedge P(y,x)$ (regionai *x* ir *y* identiški) (27)

$CON(x) \equiv_{def} \forall yz[sum(y,z) = x \rightarrow C(y,z)]$ (regionas *x* yra vientisas) (28)

Grafinė šių aksiomų interpretacija pateikta 19 paveiksle.



19 pav. Pagrindinių RCC aksiomų žymėjimas

Naudojantis esminėmis RCC aksiomomis ir reikalavimais struktūrai (20) apibrėžkime rezultatus, kurie rodo, kad puslaidininkis elementas **X = (P, N, N+, C, D, F)** priklauso klasei $\mathbf{\Omega_1}$:

$$\mathrm{CON(P)} \wedge \mathrm{CON(C)} \wedge \neg\mathrm{CON(F)} \wedge \mathrm{EC\ (C,D)} \wedge \mathrm{EC\ (C,N+)} \wedge \mathrm{EC\ (P,N)}$$
$$\wedge\ \mathrm{EC\ (P,N+)} \wedge \mathrm{DC(D,P)} \wedge \mathrm{DC\ (D,N+)} \wedge \mathrm{DC\ (D,N)} \wedge \exists(\mathrm{P, F, N, C, N+, D}) \tag{29}$$

Remiantis esminėmis RCC aksiomomis ir reikalavimais struktūrai (20) teigiame, kad puslaidininkis elementas **X = (P, N, N+, C, D, F)** priklauso klasei $\mathbf{\Omega_2}$, jei tenkina šią sąlygą:

$$\neg\mathrm{CON(P)} \vee \neg\mathrm{CON(C)} \vee \mathrm{CON(F)} \vee \neg\mathrm{EC\ (C,D)} \vee \neg\mathrm{EC\ (C,N+)} \vee \neg\mathrm{EC\ (P,N)}$$
$$\vee\ \neg\mathrm{EC\ (P,N+)} \vee \neg\mathrm{DC(D,P)} \vee \neg\mathrm{DC\ (D,N+)} \vee \neg\mathrm{DC\ (D,N)} \vee$$
$$\neg\exists(\mathrm{P, F, N, C, N+, D}) \tag{30}$$

CON (P) reiškia, kad regionas P privalo būti vientisas.
¬CON (F) reiškia, kad regionas F negali būti vientisas.
EC(P,N) reiškia, kad regionas P ir N būtinai turi liestis.
DC (D,P) reiškia, kad regionas D ir P liestis negali.

Tuo atveju, kai **n=6** ir **X = (P, N, N+, C, D, F)**, tai objektas $\mathbf{X} \in \mathbf{\Omega_1}$ tada ir tik tada, kai tenkinamos visos Z_1 požymių vektoriaus sąlygos:

$$Z_1 = \begin{pmatrix} z_{1\,1} = \exists(\mathrm{P, F, N, C, N+, D}) \\ z_{1\,2} = CON(P) \\ z_{1\,3} = CON(C) \\ z_{1\,4} = \neg CON(F) \\ z_{1\,5} = EC(C, D) \\ z_{1\,6} = EC(C, N+) \\ z_{1\,7} = EC(P, N) \\ z_{1\,8} = EC(P, N+) \\ z_{1\,9} = DC(D, P) \\ z_{1\,10} = DC(D, N+) \\ z_{1\,11} = DC(D, N) \end{pmatrix}; \tag{31}$$

Toks rinkiniui R1 patikrintas RCC teorijos taikymo metodas, žinant reikalavimus savaimingo formavimosi puslaidininkių struktūroms, gali būti taikomas bet kokiam kitam rezultatų rinkiniui.

Objektas $\mathbf{X} \in \mathbf{\Omega_2}$, tada, kai, netenkinama bent viena Z_1 požymių vektoriaus sąlyga ir tenkinamos vieno iš Z_2, Z_3 ar Z_4 požymių vektoriaus sąlygos.

$$Z_2 = \begin{pmatrix} z_{2\,1} = \exists(\mathrm{P, F, N, N+, D, Fn}) \\ z_{2\,2} = CON(P) \\ z_{2\,3} = \neg CON(F) \\ z_{2\,4} = EC(P, N) \\ z_{2\,5} = EC(P, N+) \\ z_{2\,6} = DC(D, P) \\ z_{2\,7} = DC(D, N+) \\ z_{2\,8} = DC(D, N) \end{pmatrix}; \tag{32}$$

$$Z_3 = \begin{pmatrix} z_{3\,1} = \exists(\mathrm{P, N, N+, D}) \\ z_{3\,2} = CON(P) \\ z_{3\,3} = EC(P, N) \\ z_{3\,4} = EC(P, N+) \\ z_{3\,5} = DC(D, P) \end{pmatrix}; \tag{33}$$

$$Z_4 = \begin{pmatrix} z_{4\,1} = \exists(\mathrm{P, F, N, N+, D}) \\ z_{4\,2} = CON(P) \\ z_{4\,3} = \neg CON(F) \\ z_{4\,4} = EC(P, N) \\ z_{4\,5} = EC(P, N+) \\ z_{4\,6} = DC(D, P) \\ z_{4\,7} = DC(D, N) \end{pmatrix}; \qquad (34)$$

Puslaidininkių elementų priklausomumas klasėms $\mathbf{\Omega_1}$ ir $\mathbf{\Omega_2}$ pateiktas 3 lentelėje.

3 lentelė. Puslaidininkių elementų priklausomumas klasėms Ω 1 ir Ω 2 esant skirtingiems požymių vektoriams

$\mathbf{X}(Z_i)\in\mathbf{\Omega}_1$, $i=1$		$\mathbf{X}(Z_i)\in\mathbf{\Omega}_2$, $i=2,..l$	
X	Z_i	**X**	Z_i
	Z_1		Z_2
	Z_1		Z_2
	Z_1		Z_3
	Z_1		Z_4

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Naudojantis puslaidininkių elementų savaiminio formavimo rezultatais, išskirti požymiai jų struktūrų atpažinimui. Išskirti požymiai gali būti taikomi puslaidininkių elementų struktūrų tinkamumui vertinti.
2. Pasiūlytas tinkamiausias savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas, kuris tinkamas analizuoti struktūras regioniniu požiūriu ir taikyti joms RCC taisykles.

3

Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistema

3.1. Atpažinimo sistemos koncepcinis modelis

Remiantis esminėmis RCC aksiomomis ir žinant reikalavimus generuojamų puslaidininkių elementų struktūroms, buvo apibrėžtos ryšių taisyklės, kurios rodo, kad puslaidininkis elementas priklauso klasei $\mathbf{\Omega_1}$. Elementas, netenkinantis visų taisyklių (29), priklauso klasei $\mathbf{\Omega_2}$. Šios taisyklės naudojamos atpažintuvo klasifikatoriuje.

Tam, kad naudojantis RCC teorija būtų galima atpažinti savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūrą, būtina nuskaityti analizuojamą objektą ir išskirti jo struktūros požymius. Požymių nustatymui šablonas suskirstomas į spalvinius regionus – medžiagų atitikmenis ir identifikuojami ryšiai tarp tų regionų. Tuomet, taikant RCC taisykles, šablonas priskiriamas $\mathbf{\Omega_1}$ (jei visos taisyklės patenkintos) arba $\mathbf{\Omega_2}$ klasei.

Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo proceso automatizavimas gali smarkiai sumažinti darbo sąnaudas. Tam reikalinga

programinė įranga (atpažintuvas), kuri analizuoja puslaidininkių elementų struktūras pagal aukščiau nustatytas taisykles ir jas klasifikuoja.

Atpažinimo sistemos modelio pagrindines užduotys:

1. Nuskaityti objektą,
2. Nustatyti taškų žymėjimą,
3. Sukurti RCC objektą,
4. Identifikuoti regionus,
5. Tikrinti taisykles,
6. Spausdinti rezultatus.

Objekto nuskaitymas reiškia tai, kad į taškų masyvą nuskaitomas *BMP* failas. Puslaidininkio elemento struktūrą sudarančios medžiagos, vaizdumo dėlei, koduojamos RGB spalvų kodais, o pati struktūra vaizduojama dvimačiu *BMP* tipo paveikslu.

Vėliau, taškų RGB reikšmės pakeičiamos sutartiniais medžiagų žymėjimais.

RCC objektas sukuriamas nuskaičius taisykles iš išorinio failo. Svarbu yra tai, kad ateityje jos gali kisti, todėl taisyklės turėtų būti aprašomos sistemos išorėje.

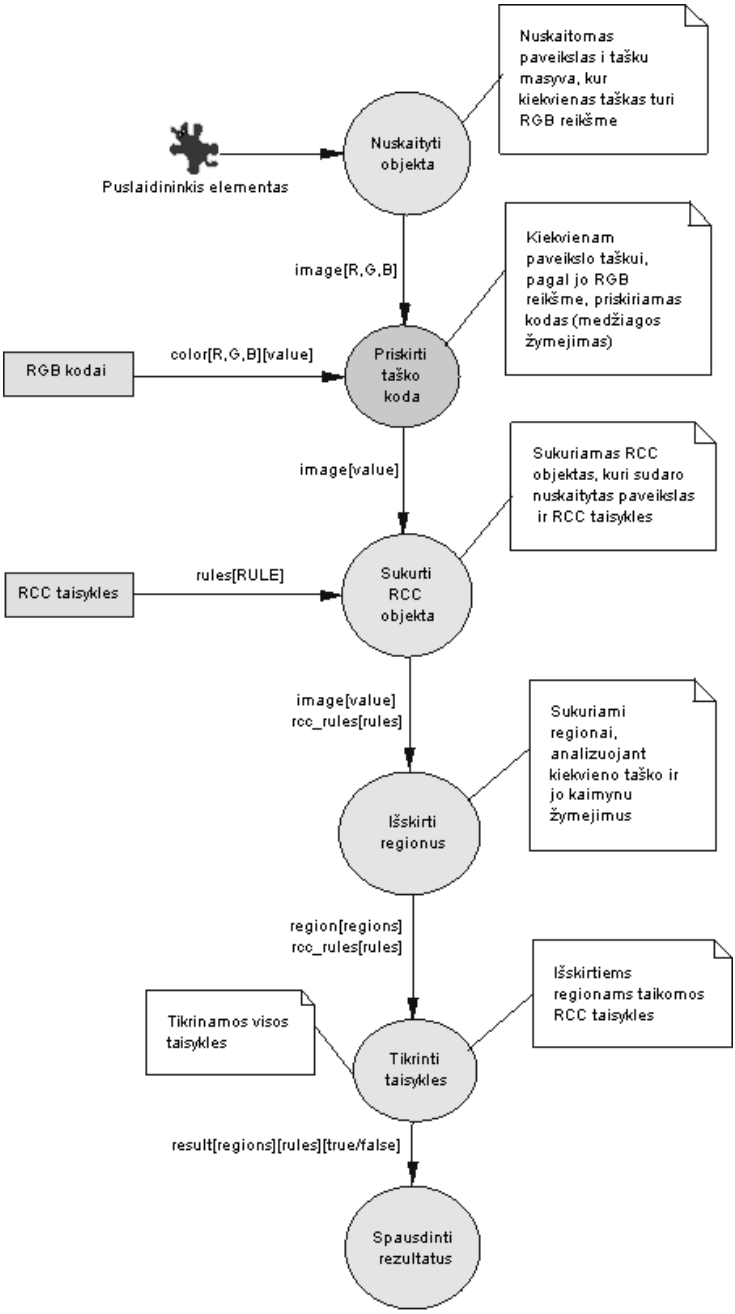
Regionų radimui naudojama kiekvieno taško ir jo „kaimynų“ žymėjimų analizė. Šio proceso metu taip pat identifikuojami ryšiai tarp nustatytų regionų.

Išskirtiems regionams tikrinamos visos RCC taisyklės bei spausdinami rezultatai. 20 paveiksle pavaizduotas koncepcinis atpažintuvo modelis.

Sistema nuskaito objektą – dvimatį paveikslą – į masyvą, kurio elementai yra paveikslo taškų RGB reikšmės, paveikslo plotis ir aukštis. Pagal nuskaityto paveikslo taškų RGB reikšmes, formuojamas masyvas, kurio elementai yra sutartiniai žymėjimai, atitinkantys tam tikrą spalvą.

4 lentelė. RGB reikšmių – žymėjimų lentelė

Žymėjimas	Medžiaga	R	G	B
101	P	77	73	72
103	N	255	251	156
150	C	0	0	0
105	N+	229	222	86
0	D	210	255	255
140	F	0	210	63



20 pav. Atpažintuvo koncepcinis modelis

Programa nuskaito RCC taisykles, atitinkančias Z_1 požymių vektorių (31), kurios bus taikomos išskirtiems savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūros regionams (21 pav.).

CON	1	101
CON	1	150
CON	0	140
EC	150	0
EC	150	105
EC	101	103
EC	101	105
DC	0	101
DC	0	105
DC	0	103

21 pav. Iš failo nuskaitomos RCC taisyklės

Analizuojant taškų žymėjimo masyvo elementus, išskiriami regionai, sudarantys paveikslo struktūrą. Kiekvienas regionas žymimas medžiagos žymėjimo reikšme (4 lentelė) ir unikaliu numeriu (skaičiumi). Tas yra svarbu tuo atveju, jei identifikuojami keli tos pačios spalvos regionai. Regionų išskyrimo metu taip pat nustatomi ryšiai tarp regionų. Kitaip tariant, nustatoma, su kuriuo kitu regionu liečiasi analizuojamasis regionas.

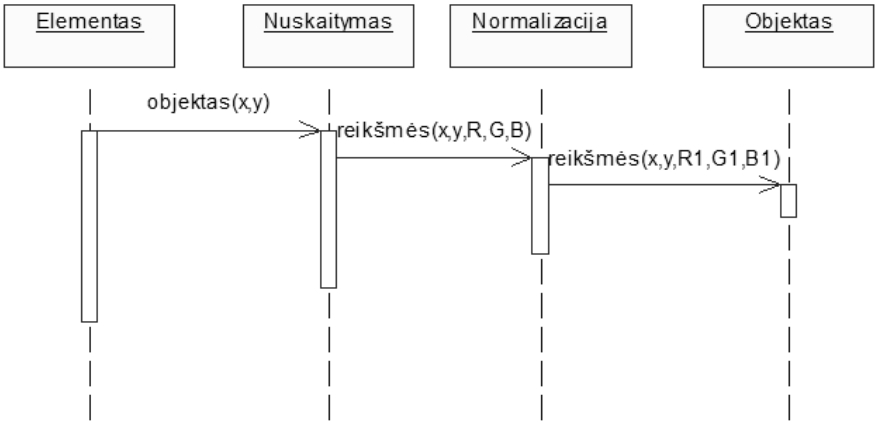
Analizuojamojo puslaidininkio elemento iš rinkinio R1 (18 pav.) regionų masyvas atrodo taip:

Regionai = {0,1}, {140,2}, {150,3}, {140,4}, {105,5}, {103,6},{105,7}, {101,8};

Regionų – kaimynų masyvas atrodo taip:

Ryšiai = {1,3}, {1,2}, {1,3}, {2,1}, {2,3}, {2,6}, {3,1}, {3,2}, {3,5}, {3,6}, {4,1}, {4,3}, {4,6}, {5,2}, {5,3}, {5,5}, {5,8}, {6,3}, {6,8}, {7,2}, {7,3}, {7,5}, {7,8}, {8,5}, {8,6};

22 pav. pavaizduota užduotis *Nuskaityti objektą* aprašo paveikslo nuskaitymo ir paveikslo taškų spalvų normalizavimo funkcijas. Užduoties detalizacija pavaizduota žemiau:



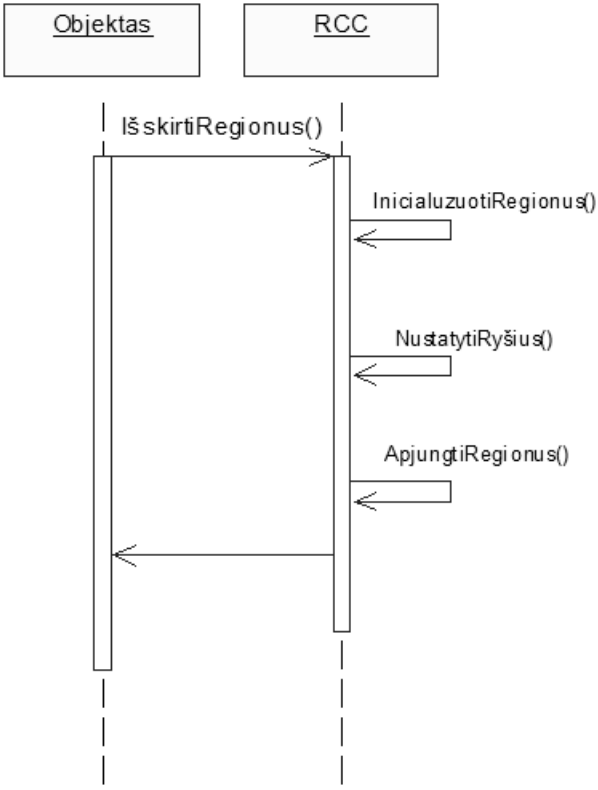
22 pav. Užduoties „Nuskaityti objektą“ sekų diagrama

Šiame etape analizuojamas objektas (puslaidininkis elementas) nuskaitomas į taškų masyvą, kuris aprašomas koordinatėmis ir RGB reikšmių kodais. RGB reikšmės perskaičiuojamos pagal sudarytą spalvų reikšmių intervalų lentelę. Vėliau, pagal nuskaityto paveikslo taškų RGB reikšmes, formuojamas masyvas, kurio elementai yra sutartiniai žymėjimai, atitinkantys tam tikrą medžiagą struktūroje.

Nuskaičius objektą, iš išorinio failo nuskaitomos RCC taisyklės. Vėliau sistema, naudodama puslaidininkio elemento duomenis (taškų masyvą), identifikuoja jį sudarančius regionus.

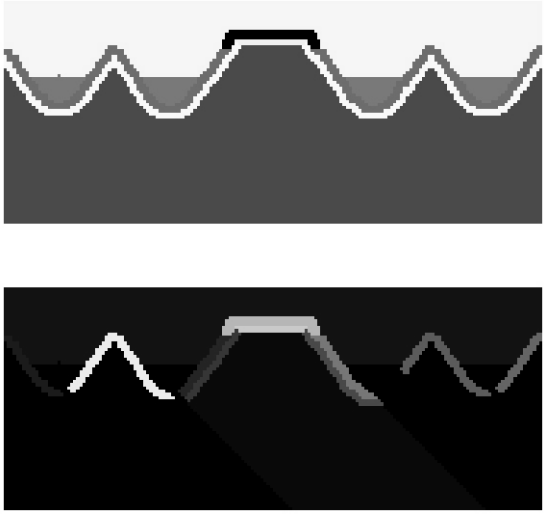
23 pav. pavaizduota užduotis *Išskirti regionus*.

Analizuodama taškų masyvo elementus, sistema išskiria regionus, sudarančius puslaidininkio elemento struktūrą. Kiekvienas regionas žymimas regiono žymėjimu (atitinkančiu taško žymėjimą) ir unikaliu numeriu (skaičiumi). Nuo regiono žymėjimo nepriklausantis unikalus numeris svarbus tuo atveju, jei paveiksle randami keli tos pačios spalvos, tačiau tarpusavyje nesiliečiantys regionai. Regionų išskyrimo metu taip pat nustatomi ryšiai tarp regionų. Kitaip tariant, nustatoma su kuriuo kitu regionu liečiasi analizuojamasis regionas.



23 pav. Užduoties „Išskirti regionus“ sekų diagrama

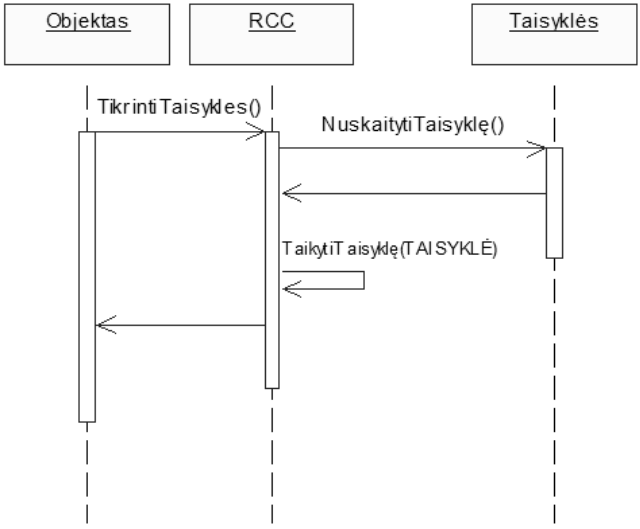
Kadangi puslaidininkio elemento struktūros taškų analizė vykdoma nuo kairiojo viršutinio taško į dešinę, vėliau pasislenkant per vieną eilutę žemyn, tai pradedant nauja eilute ir tikrinant jau identifikuotų regionų ryšius, analizuojamasis regionas dažnai suskaidomas į kelis skirtingus regionus, turinčius tą patį žymėjimą, bet skirtingą unikalų numerį. Dėl šios priežasties vėliau vykdomas regionų sujungimas. 24 paveiksle pateiktas to paties puslaidininkio elemento originalus vaizdas ir po regionų išskyrimo skirtingom spalvom pavaizduoti kai kurie išskirti regionai. Šiuo atveju, 12 skirtingų regionų nuspalvinti skirtingomis spalvomis (kiti nuspalvinti juodai, todėl paveiksle nesimato). Vėliau kai kurie iš šių regionų bus sujungiami.



24 pav. Regionų išskyrimo pirminis rezultatas

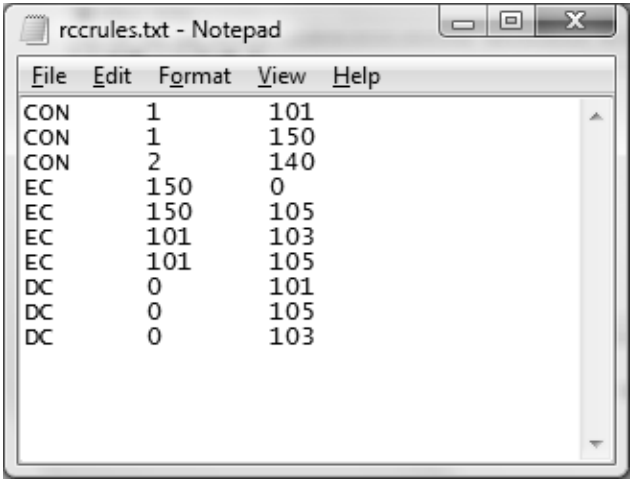
Bent vienu tašku besiliečiantys regionai, turintys tą patį medžiagos žymėjimą ir skirtingą numerį, sujungiami.

Suskirsčius paveikslą į regionus ir nustačius regionų tarpusavio ryšius, puslaidininkio elemento struktūrai (tiksliau, jo regionams) taikomos RCC taisyklės (25 pav.).



25 pav. Užduoties „Tikrinti taisykles“ sekų diagrama

Šiame etape sukuriamas RCC taisyklių objektas, kuris nuskaito faile aprašytas RCC taisykles. Taisyklės aprašomos tam tikra tvarka ir saugomos išoriniame faile. Priklausomai nuo savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų, jų struktūrą sudarančių medžiagų (regionų) ir ryšių tarp jų, šios taisyklės gali kisti. Tokiu būdu atpažinimo programa gali būti taikoma skirtingiems savaimingo formavimosi atvejams. 26 paveiksle pateiktas taisyklių aprašymo išoriniame faile pavyzdys.



26 pav. Sistemos naudojamų taisyklių aprašymo pavyzdys

Nuskaičius taisykles sistema jas tikrina analizuodama išskirtus regionus ir ryšius tarp tų regionų. Patikrinus visas taisykles, vartotojui išvedamas pranešimas, ar puslaidininkio elemento struktūra atitinka jai keliamus reikalavimus. Taisyklių taikymo rezultatai išvedami į tekstinį failą.

3.2. Atpažinimo sistemos algoritmas

Remiantis 4.1 skyriuje aprašytu atpažintuvo koncepciniu modeliu, sukurtas kompiuterinės programos puslaidininkių elementų struktūroms atpažinti algoritmas:

- **Puslaidininkis elementas.** Tai *BMP* tipo paveikslas, kur puslaidininkio elemento struktūrą sudarančios medžiagos užkoduotos spalvomis.

- Į masyvą nuskaitomas puslaidininkis elementas, kurį sudaro visų jo taškų žymėjimų reikšmės (medžiagos žymėjimo kodas) ir koordinatės;

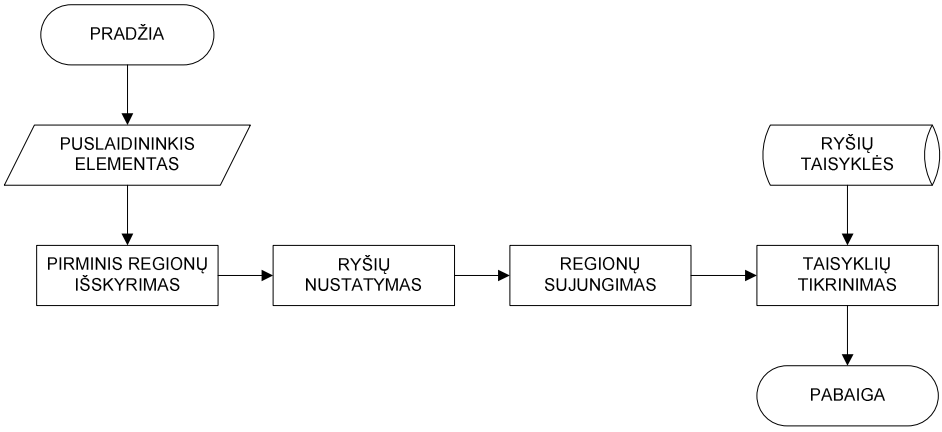
▪ **Pirminis regionų išskyrimas**.
- Analizuojamos kiekvieno taško žymėjimų reikšmės ir sukuriami regionai, kur regionas aprašomas taško (medžiagos) žymėjimu ir unikaliu numeriu (pvz.: {140,1});

▪ **Ryšių nustatymas**.
- Nustatomi regionų ryšiai su kitais regionais;

▪ **Regionų sujungimas**.
- Sujungiami besiliečiantys ir tuos pačius žymėjimus turintys regionai bei perskaičiuojami ryšiai;

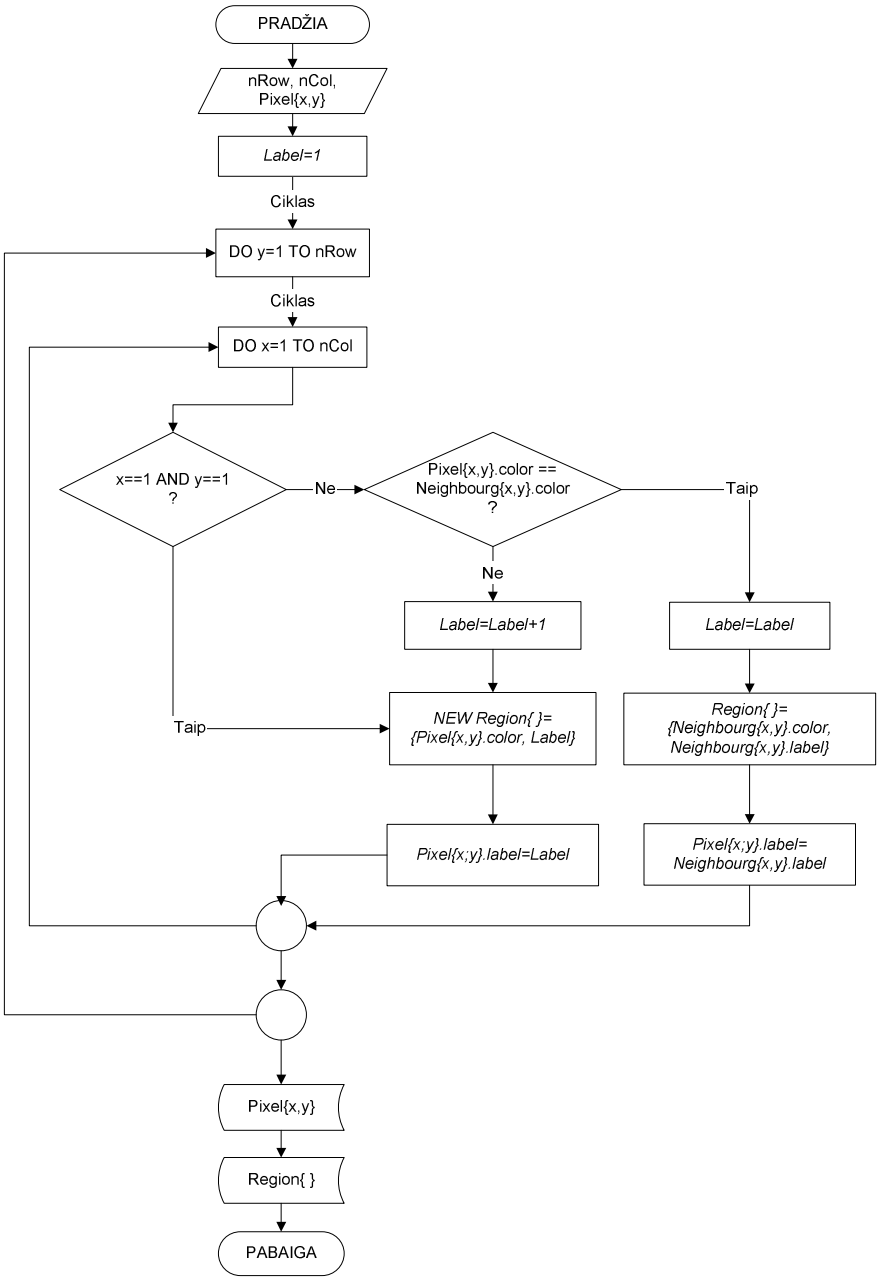
▪ **Taisyklių tikrinimas**.
- Iš išorinio failo nuskaitomos ir sukuriamos regionų ryšių taisyklės. Išskirtiems regionams tikrinamos visos taisyklės.

Kompiuterinės programos algoritmo struktūrinė schema pavaizduota 27 paveiksle.



27 pav. Kompiuterinės programos algoritmas

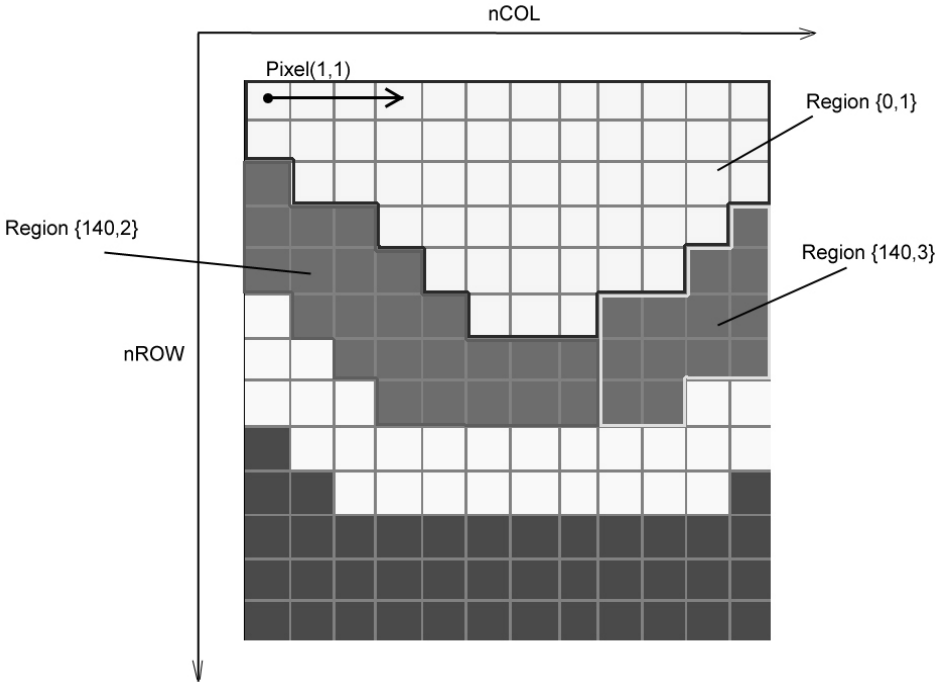
28 paveiksle pateiktas detalus *Pirminio regionų išskyrimo* algoritmas.



28 pav. Pirminio regionų išskyrimo algoritmas

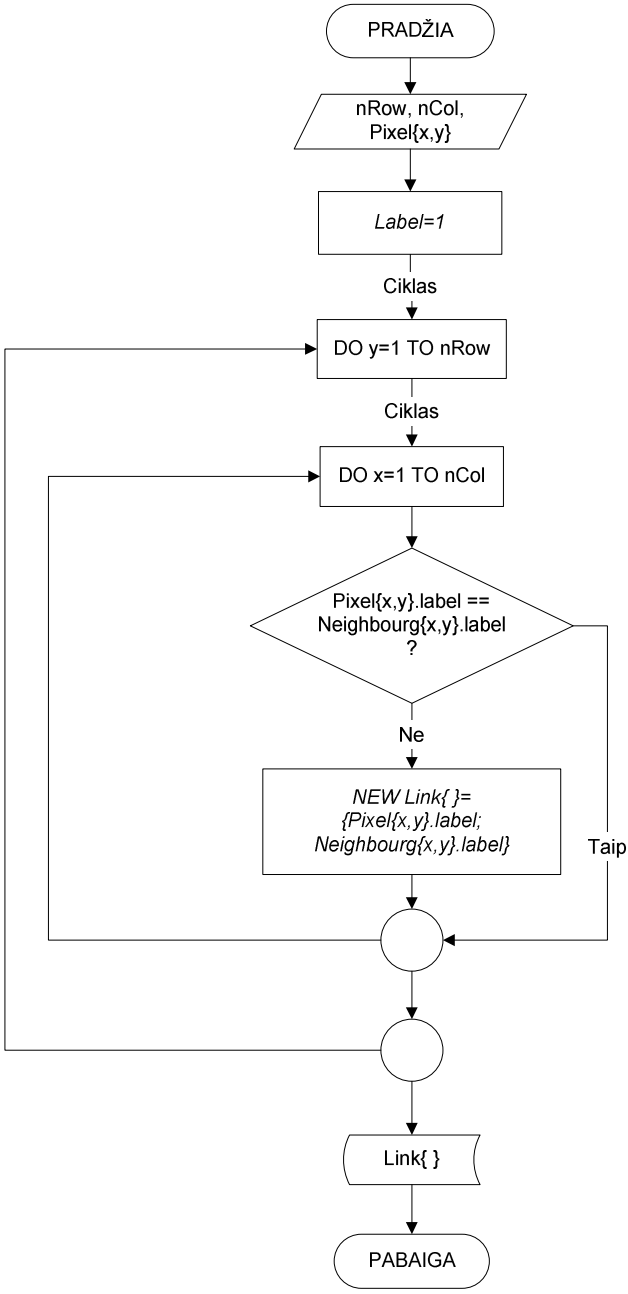
Algoritmo taikymo rezultatas yra regionų masyvas ***Region{}*** ={0,1}, {140,2}, {140,3}, …, kurio elementai yra agloritmo taikymo metu išskirti puslaidininkio elemento struktūrą sudarantys regionai.

Išskirti regionai ***Region{0,1}***, ***Region{140,2}***, ***Region{140,3}*** vizualiai pavaizduoti 29 paveiksle.



29 pav. Pirminio regionų išskyrimo rezultato vizualizacija

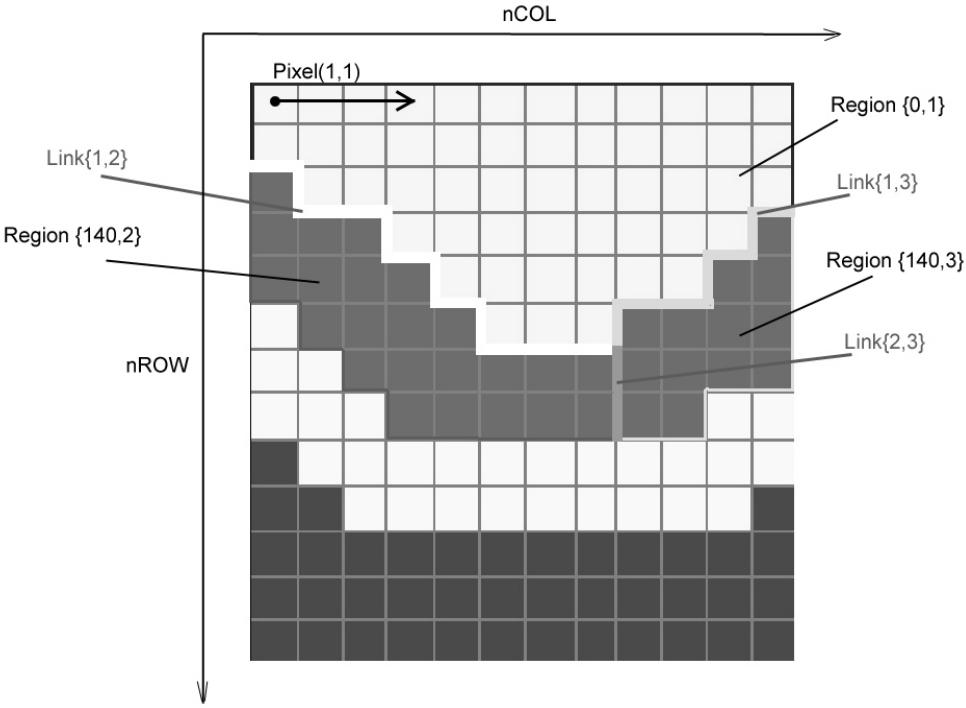
Ryšių nustatymo algoritmas pateiktas 30 paveiksle.



30 pav. Ryšių nustatymo algoritmas

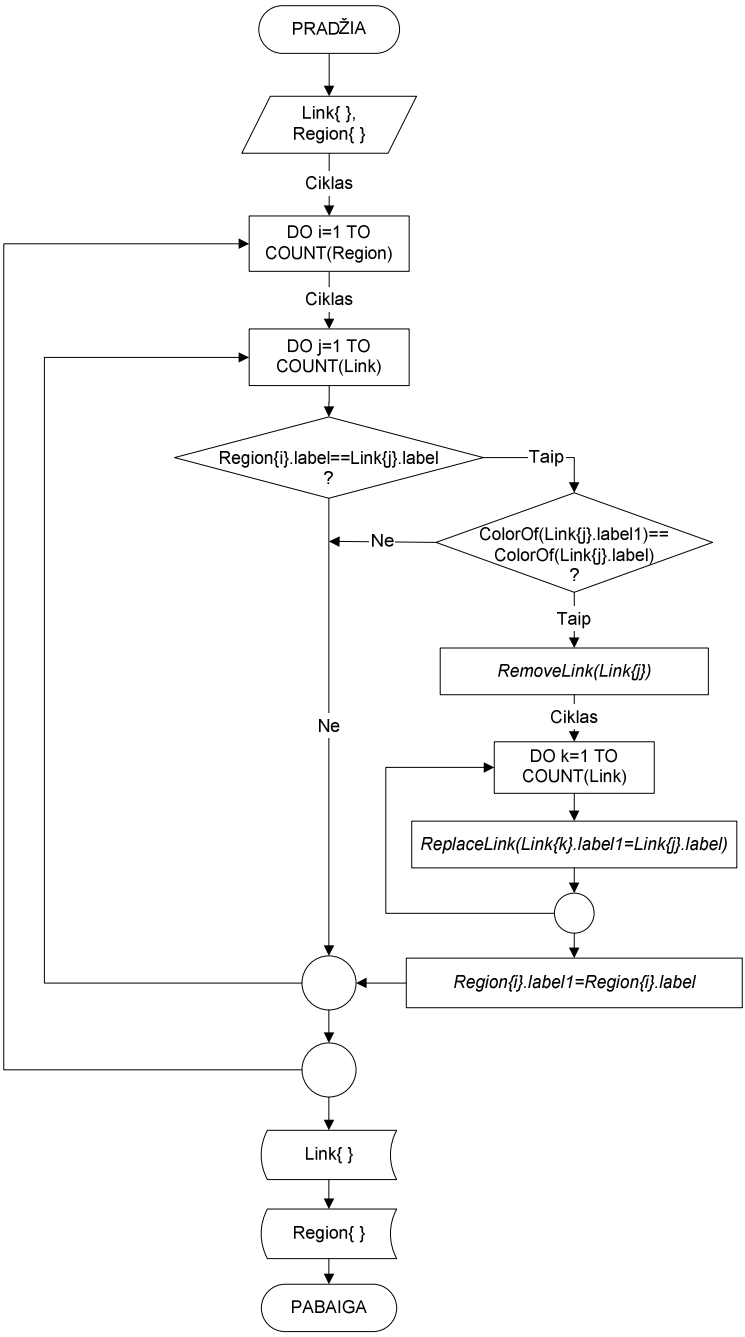
Ryšių nustatymo algoritmo rezultatas yra ryšių masyvas ***Link{}*** ={1,2}, {1,3}, {2,3}, …, kurio elementai yra agloritmo taikymo metu nustatyti ryšiai tarp puslaidininkio elemento struktūrą sudarančių regionų.

Nustatyti ryšiai ***Link{1,2}***, ***Link{1,3}***, ***Link{2,3}*** vizualiai pavaizduoti 31 paveiksle.



31 pav. Ryšių nustatymo algoritmo rezultato vizualizacija

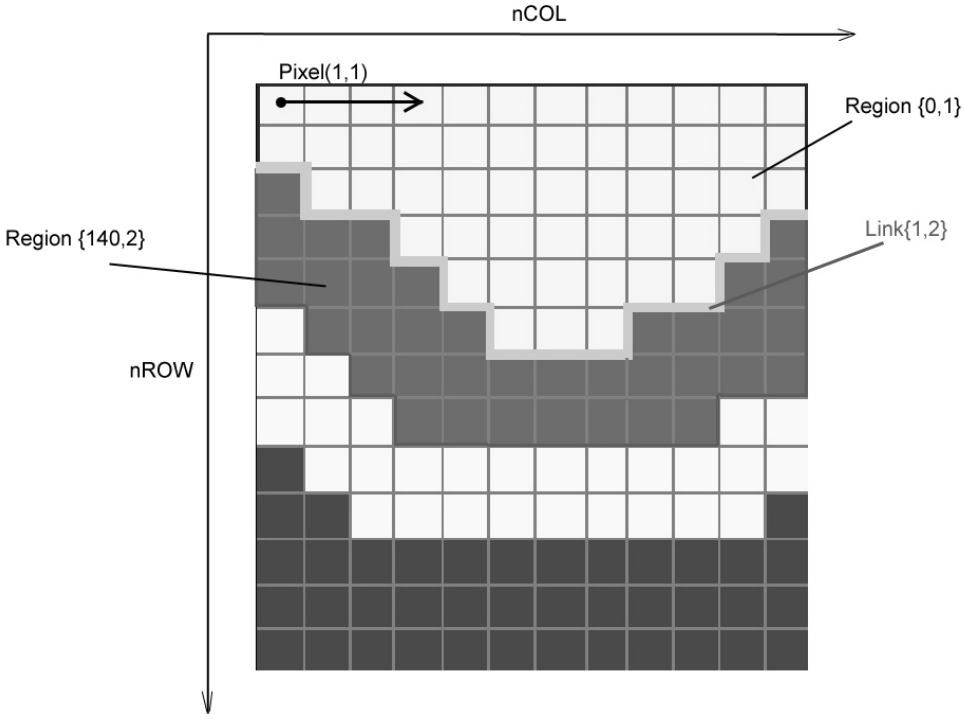
32 paveiksle pateikta regionų sujungimo algoritmo struktūrinė schema.



32 pav. Regionų sujungimo algoritmas

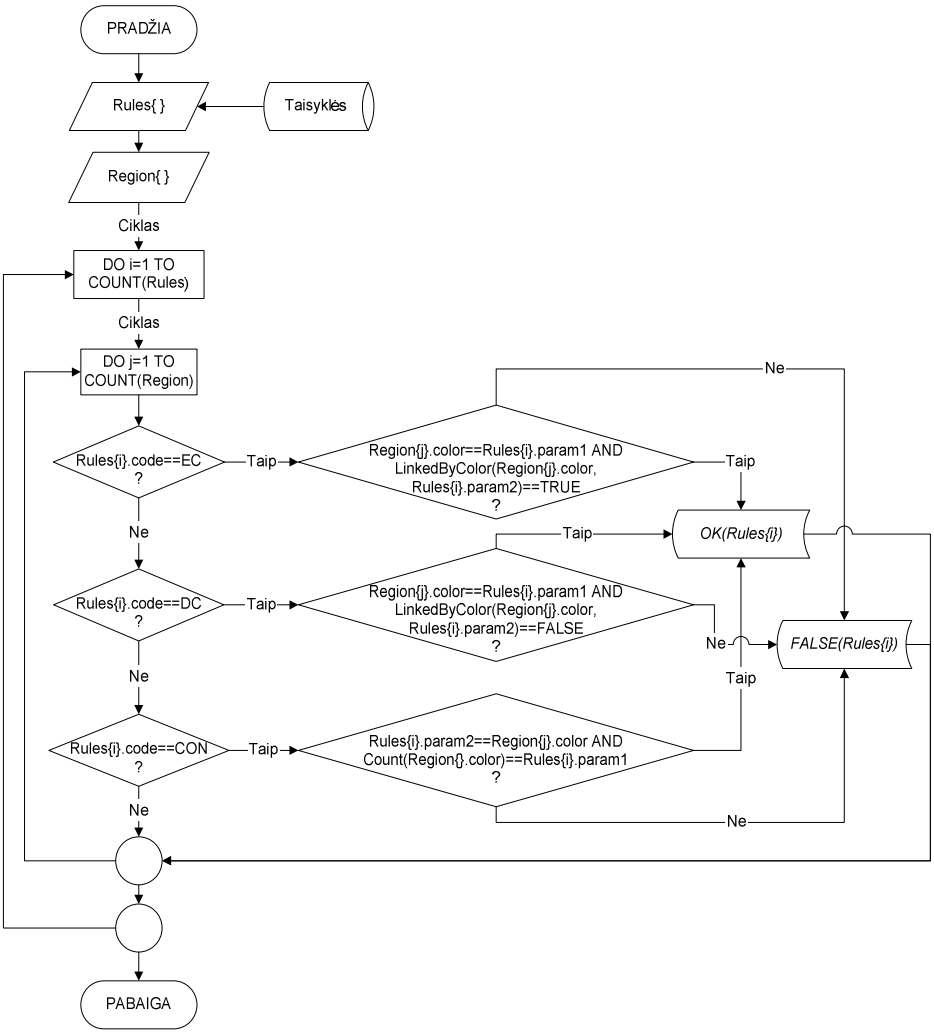
Regionų sujungimo algoritmo rezultatas yra regionų masyvas ***Region{}*** ={0,1}, {140,2}, …, kurio elementai yra sujungti regionai ir ryšių masyvas ***Link{}*** ={1,2}, …, kurio elementai yra agloritmo taikymo metu sujungti ryšiai tarp puslaidininkio elemento struktūrą sudarančių regionų.

Sujungtas ryšys ***Link{1,2}*** ir sujungti regionai ***Region{0,1}***, ***Region{140,2}*** vizualiai pavaizduoti 33 paveiksle.



33 pav. Regionų sujungimo rezultatas

Taisyklių tikrinimo algoritmas pateiktas 34 paveiksle.



34 pav. Taisyklių tikrinimo algoritmas

Algoritmo taikymo rezultatas yra masyvas
OK{}={CON,1,101}, {DC,0,101}, ...;
ir/arba masyvas ***FALSE{}***={CON,0,140}, {EC,0,150}, ...;

Jei masyvas ***FALSE{}*** netuščias, gražinamas neigiamas atpažinimo rezultatas – puslaidininkio elemento struktūra neatitinka jai keliamų reikalavimų.

Algoritmuose naudojami kintamieji ir išraiškos:

nROW – paveikslo aukštis (taškais);
nCOL – paveikslo plotis (taškais);
Label – sveikas skaičius;
Pixel{x,y} – taškų masyvas. ***Pixel{x,y}=[color, label]***, kur *color* – taško žymėjimo reikšmė (medžiagos kodas), *label* – taško numeris;
Neighbour{x,y} – taškui ***Pixel{x,y}*** kaimyninis taškas;
Region{} – regionų masyvas. ***Region{}=[color, label]***, kur *color* – regiono žymėjimo reikšmė, *label* – regiono numeris;
RegionNeighbour{} – regionui ***Region{}*** kaimyninis regionas;
Link{} – regionų ryšių masyvas. ***Link{}=[label1, label2]***, kur *label1*, *label2* – regionų numeriai***;***
Rules{} – taisyklių masyvas. ***Rules{}=[code, param1, param2]***, kur *code* – taisyklės pavadinimas, *param1*, *param2* – regionų žymėjimų reikšmės;
RemoveLink(var) – regiono ryšio naikinimo funkcija, kur *var* – konkretus regiono ryšys;
ColorOf (var) – žymėjimo nustatymo pagal kodą funkcija, kur *var* – regiono numeris;
ReplaceLink(var1, var2) – regiono ryšio keitimo funkcija, kur *var1* – regiono numeris, *var2* – naujas regiono numeris;
LinkedByColor(var1, var2) – regiono ryšio tikrinimas, kur *var1, var2* – regionų žymėjimai.

Bendrasis regionų identifikavimo ir taisyklių tikrinimo algoritmas stuktūrizuota anglų kalba:

```
k=0;
RN=1;
BEGIN (k, label)
{

region[k][value]=value[x]
region[k][value][label]= label[x]

CHECK COLOR (k)
{
 FOR (i=0; i<4; i++)
 {
  IF (Neighbourg[i][value] != region[k][value])
  {
```

```
    region[k][value][neighbourg][i][value] = Neighbourg[i][value]
    j=j+1
    }
  }
  IF (j==4)  GO TO BEGIN(k+1, label[x+1])
  ELSE GO TO SET LABEL (k)
}

SET LABEL(m)
{
 FOR (i=0; i<8; i++)
 {
   IF ( Neighbourg[i][value] == region[k][value] )
   {
    m=m+1;
    region[m][value] = region[k][value]
    region[m][value][label] = region[k][value][label]
    }
  }
 CHECK COLOR(m+1)
}
}


RULE_NAME[ ] = { CON(1,P); CON(1,C); EC(C,D); EC(C,N+); ... }

RuleNumber=count(RULE_NAME[ ]);

FOREACH (m)
{
  IF (RULE_NAME[m] == TRUE)
  {
    RN=RN+1
    Print (RESULT: RULE_NAME = true)
  }
  ELSE
  {
    Print (RESULT: RULE_NAME  = false)
  }
}

IF (RN < RuleNumber) Print (IMAGE BELONGS TO CLASS B)
ELSE Print (IMAGE BELONGS TO CLASS A)
```

```
//////////////////    TAISYKLIŲ FUNKCIJOS

CON(number,y)
{
  IF (number==0)
  {
    IF(count(region[y][]) > 1 )    RETURN TRUE
  }
  ELSE
  {
   IF(count(region[y][]) == number )    RETURN TRUE
  }
}

EC(x,y)
{
  FOREACH(i,j, k)
  {
   IF(region[i][y][neighbourg][k][value]  == region[j][x])      RETURN TRUE
 }
}

DC(x,y)
{
  FOREACH(i,j, k)
  {
   IF(region[i][y][neighbourg][k][value]  == region[j][x])     RETURN FALSE
 }
}
```

Naudojantis puslaidininkių elementų savaiminio formavimo rezultatais ir žinant puslaidininkio elemento kokybės reikalavimus, išskirti požymiai jų struktūrų atpažinimui. Pasiūlytas savaimingam puslaidininkių elementų struktūrų formavimosi rezultatui tinkamiausias atpažinimo metodas, kuris remiasi struktūrų analize regioniniu požiūriu ir RCC taisyklių ryšiams tarp regionų taikymu. Šis metodas gali būti naudojamas įvairioms savaimingo formavimosi puslaidininkių elementų rinkinių struktūroms atpažinti.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Remiantis suformuluota požymių sistema bei pasiūlytų atpažinimo metodu, sukurtas saivaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo sistemos metodas, leidžiantis kokybiškai analizuoti puslaidininkių elementų struktūras.
2. Naudojantis sukurtu savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodu, realizuotas kompiuterinės atpažinimo programos algoritmas.
3. Sukurtas algoritmas gali būti naudojamas įvairioms savaimingo formavimosi puslaidininkių elementų rinkinių struktūroms atpažinti.

4

Atpažinimo sistemos eksperimentiniai tyrimai

Šiame skyriuje aprašoma savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programa, kuri buvo realizuota C++ kalba, naudojant Visual Studio .NET 2003 aplinką ir atlikti eksperimentiniai tyrimai atpažinimo metodo tinkamumui patikrinti. Sukurtas atpažintuvas yra tinkamas konkrečios apibrėžtos aibės savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūroms atpažinti. Tuo pačiu sistema gali būti pritaikoma bet kokioms kitoms savaimingai (ir ne tik) besiformuojančioms dvimatėms struktūroms atpažinti, jei kokybę galima vertinti pagal jų struktūrose dalyvaujančias medžiagas ir tų medžiagų tarpusavio ryšius.

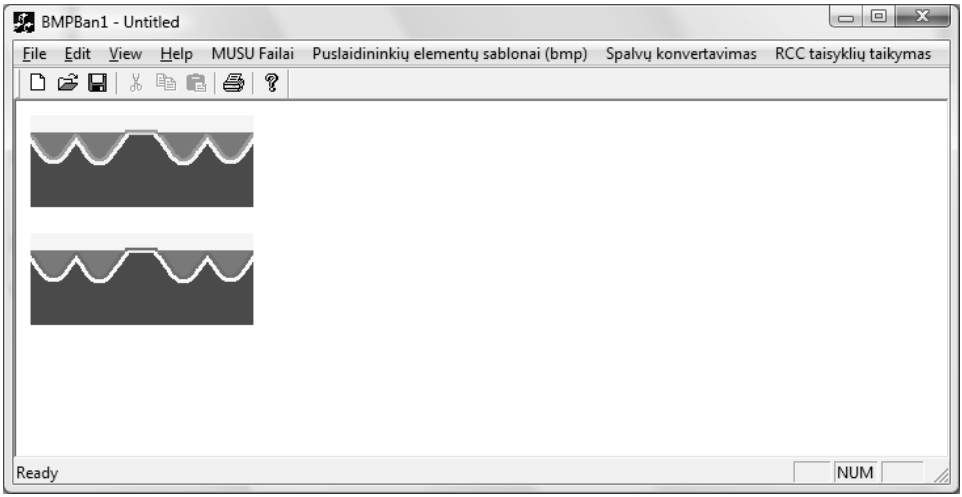
Sukurta programa gali būti naudojama savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų aibėms atpažinti, jei žinoma:

- Puslaidininkių elementų struktūras sudarančios medžiagos (regionai);
- Reikalavimai medžiagų erdviniams ryšiams.

4.1. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programinė įranga

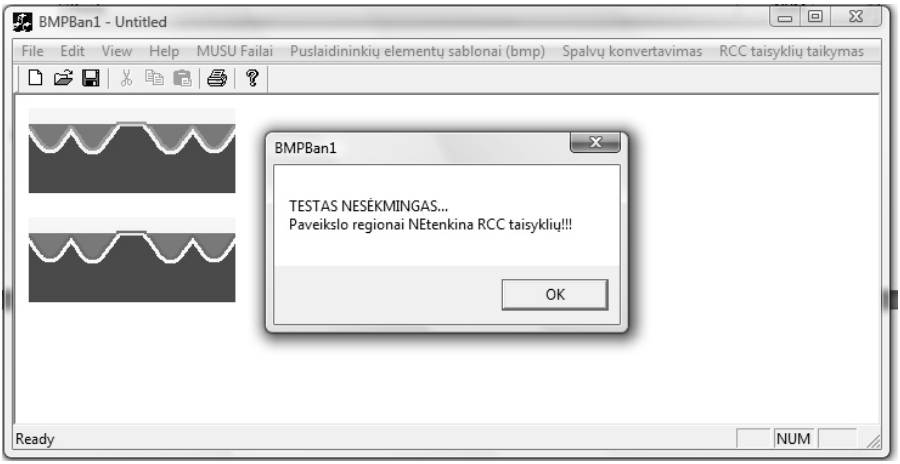
Remiantis aukščiau suformuluota atpažinimo sistemos koncepcija ir sukurtu algoritmu buvo realizuota savaimingai suformuotų puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo kompiuterinė programa „BMPRCCv1“. Sistema parašyta C++ programavimo kalba, kuri analizuoja bet kokių matmenų *BMP* tipo paveikslus, bei išveda testavimo rezultatus.

Pirmame žingsnyje programa nuskaito savaimingai suformuotą puslaidininkį elementą (*BMP* paveikslą). Šiame etape puslaidininkis elementas nuskaitomas į taškų masyvą, kurie aprašomi koordinatėmis ir RGB spalvos kodais (35 pav.).



35 pav. Programos „BMPRCCv1“ langas

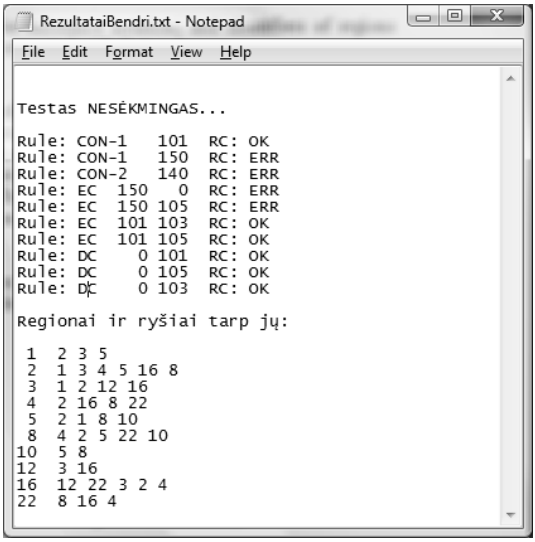
Kitame etape vykdomas visas paveikslo analizės procesas: regionų išskyrimas, taisyklių taikymas ir rezultatų išvedimas (36 pav.).



36 pav. Atpažinimo rezultatas

Kaip matoma šiuo atveju, sistema išveda pranešimą apie nesėkmingą testą. Savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūros regionai netenkina suformuluotų ryšių taisyklių: puslaidininkio elemento struktūra yra netinkama.

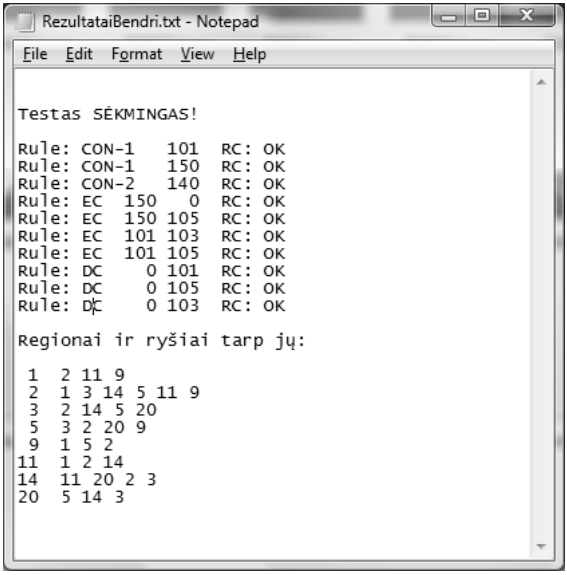
Sistema po kiekvieno testavimo suformuoja rezultatų failą, kuriame pateikia išsamius testo rezultatus (37 pav.).



37 pav. Atpažinimo rezultatai faile (1)

Kaip matoma iš šio pavyzdžio, netenkinamos keturios taisyklės iš dešimties. Pagal medžiagų žymėjimus (4 lentelė, 18 paveikslas) galima nustatyti, kad medžiaga **C** (nikelis) nėra vientisa, medžiaga **F** (fotorezistas) sudaro vientisą regioną, medžiagos **C** ir **D** (atmosfera) nesiliečia, medžiagos **C** ir **N+** (silicis n+ tipo) nesiliečia.

38 paveiksle pateiktas sėkmingo testo pavyzdys.



```
RezultataiBendri.txt - Notepad
File  Edit  Format  View  Help

Testas SĖKMINGAS!

Rule: CON-1   101  RC: OK
Rule: CON-1   150  RC: OK
Rule: CON-2   140  RC: OK
Rule: EC  150   0  RC: OK
Rule: EC  150 105  RC: OK
Rule: EC  101 103  RC: OK
Rule: EC  101 105  RC: OK
Rule: DC    0 101  RC: OK
Rule: DC    0 105  RC: OK
Rule: DC    0 103  RC: OK

Regionai ir ryšiai tarp jų:

 1  2 11 9
 2  1 3 14 5 11 9
 3  2 14 5 20
 5  3 2 20 9
 9  1 5 2
11  1 2 14
14  11 20 2 3
20  5 14 3
```

38 pav. Atpažinimo rezultatai faile (2)

Šiuo atveju matoma, kad visos nustatytos sąlygos tenkinamos. Testas sėkmingas.

Žemiau, po taisyklių tikrinimo (38 pav.), pateiktos skaičių eilutės nusako, iš kairės: regiono numerį ir numerius tų regionų, su kuriais regionas turi ryšius.

Kaip jau minėta ankščiau, algoritmas tinkamas bet kokios kitos aibės savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui, jeigu žinomos puslaidininkių elementų struktūras sudarančios medžiagos (regionai) ir žinomi reikalavimai medžiagų erdviniams ryšiams. Tokiu atveju sistema gali būti adaptuojama vis kitai situacijai nekeičiant paties algoritmo.

Pagrindiniai žingsniai adaptuojant sistemą kitokių puslaidininkių elementų aibei atpažinti yra tokie:

1. Medžiagų identifikavimas,
2. Medžiagų žymėjimo priskyrimas,
3. Ryšių tarp medžiagų aprašymas taisyklėmis (taisyklių regionams apibrėžimas, norint aprašyti ryšius tarp jų).

Būtina apibrėžti kintamuosius, kurie dalyvauja regionų identifikavimo ir taisyklių tikrinimo algoritme:

1. RegionColorValue[x] – medžiagų spalvų masyvas;
2. RegionColorCode[x] – medžiagų spalvų žymėjimų masyvas;
3. RULE_NAME[ ] – taisyklių masyvas.

Mūsų atveju, įvesties kintamieji yra tokie (pagal 4 lentelę):
RegionColorValue[1] = 77,73,72;
RegionColorValue[2] = 255,251,156;
RegionColorValue[3] = 0,0,0;
RegionColorValue[4] = 229,222,86;
RegionColorValue[5] = 210,255,255;
RegionColorValue[6] = 0,210,63;
RegionColorCode[1] = 101;
RegionColorCode[2] = 103;
RegionColorCode[3] = 150;
RegionColorCode[4] = 105;
RegionColorCode[5] = 0;
RegionColorCode[6] = 140;

Regionų ryšių taisyklės:
RULE_NAME[1] = **CON**(1,105);
RULE_NAME[2] = **CON**(1,104);
RULE_NAME[3] = **CON**(2,106);
RULE_NAME[4] = **EC**(105,106);
RULE_NAME[5] = **EC**(104,106);
RULE_NAME[6] = **DC**(104,105);
RULE_NAME[7] = **DC**(104,0);
RULE_NAME[8] = **DC**(105,0);

4.2. Atpažinimo eksperimentai

Remiantis 3.2. skyriuje aprašyta požymių sistema, pateikta išraiškoje (31), buvo atlikti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo eksperimentiniai tyrimai. Atsižvelgiant į medžiagų žymėjimus (4 lentelė, 18 paveikslas), tam, kad puslaidininkis elementas būtų pripažintas tinkamu, turi būti patenkintos jo struktūroje dalyvaujančių medžiagų tarpusavio ryšių sąlygos (29).

Eksperimentams atlikti buvo naudojama disertacijoje aprašyta programinė įranga, kurios pagalba buvo analizuojama **851** savaimingai suformuota puslaidininkio elemento struktūra.

Atlikus eksperimentinius tyrimus, sukurta programinė įranga taisykles tenkinančiais elementais (priklausančiais klasei $\mathbf{\Omega_1}$) pripažino **23** puslaidininkius elementus. Eksperimento rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Puslaidininkių elementų atpažinimo rezultatai(1)

Viso elementų	Klasė „$\mathbf{\Omega_1}$“	Klasė „$\mathbf{\Omega_2}$“
851	23	828
100%	2,7%	97.3%

Puslaidininkių elementų priklausomumas klasėms $\mathbf{\Omega_1}$ ir $\mathbf{\Omega_2}$ pateiktas 6 lentelėje.

6 lentelė. Puslaidininkių elementų atpažinimo rezultatų pavyzdžiai, esant ryšių taisyklėms (29)

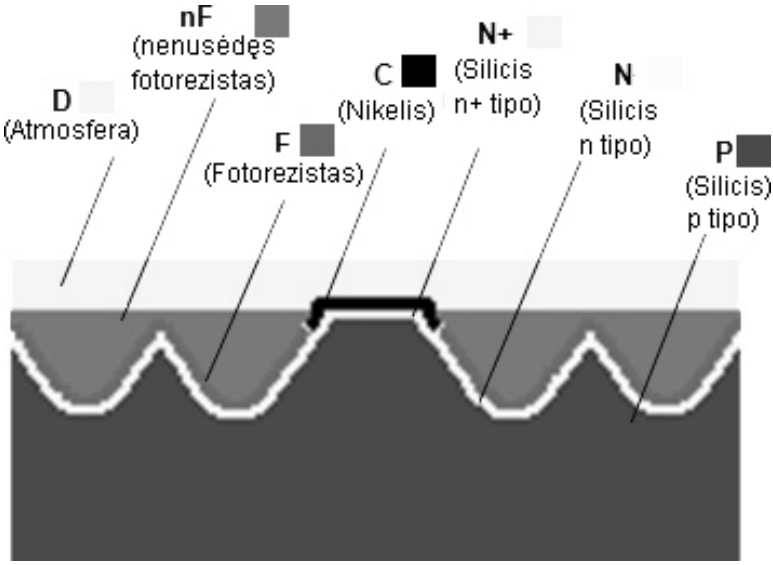
$\mathbf{\Omega_1}$		$\mathbf{\Omega_2}$	
	A1		*B1*
	A2		*B2*
	A3		*B3*

	A4		*B4*
	A5		*B5*
...	*Ai*	...	*Bj*
	A23		*B23*
...		...	*Bk*
...			*B828*

Ekspertiškai, naudojantis vizualia rezultatų analize, patikrinus gautus rezultatus, buvo nustatyta, kad tarp gerais pripažintų savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų yra blogų struktūrų. Visų gerais pripažintų puslaidininkių elementų struktūros tenkino aukščiau aprašytas sąlygas, tačiau 17 puslaidininkių elementų struktūrose buvo nustatytas vienas neįvertintas savaiminio formavimosi faktorius – savaiminio formavimosi procese dalyvaujanti medžiaga **nF** (39 pav.). Inžinierių-technologų teigimu, pastaroji medžiaga dalyvauja saivaimingo formavimosi procese, tačiau rezultatuose jos būti neturi.

Įvertinus naują savaiminio formavimosi faktorių ir naudojant tą pačią programinę įrangą, nekeičiant jos veikimo algoritmo, o tik papildant ryšių taisykles, buvo atliktas kitas eksperimentas. Sąlygos, kurias turi tenkinti

puslaidininkio elemento struktūros, papildytos naujomis taisyklėmis, esant dar vienai savaimingo formavimosi procese dalyvaujančiai medžiagai (**nF**).

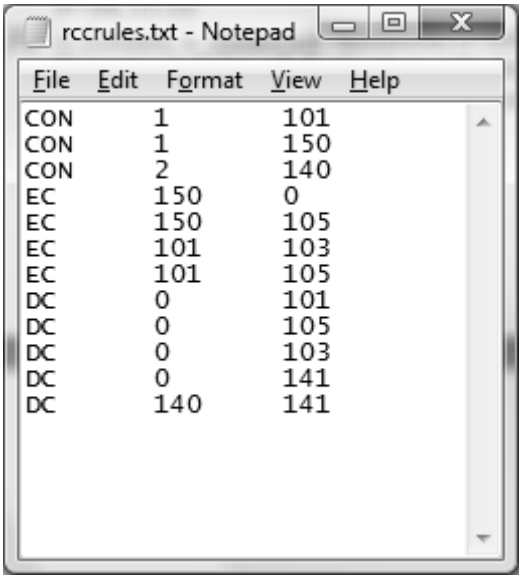


39 pav. Savaimingai besiformuojančio puslaidininkio elemento struktūra esant papildomai medžiagai

Šiuo atveju struktūra yra tinkama, jei tenkina aukščiau nustatytas taisykles, bei papildomą sąlygą – regionai **D** ir **F** negali liestis su regionu **nF**. Tokiu atveju naujos ryšių taisyklės yra tokios:

$$CON(P) \wedge CON(C) \wedge \neg CON(F) \wedge EC(C,D) \wedge EC(C,N+) \wedge EC(P,N) \wedge EC(P,N+) \wedge DC(D,P) \wedge DC(D,N+) \wedge DC(D,N) \wedge DC(D,nF) \wedge DC(F,nF) \quad (35)$$

Taisyklių failas papildomas dviem naujomis taisyklėmis (40 pav.).



40 pav. Papildytas taisyklių failas

Atlikus eksperimentinius tyrimus, programinė įranga taisykles tenkinančiais elementais (priklausančiais klasei $\mathbf{\Omega_1}$) pripažino **6** puslaidininkius elementus. Eksperimento rezultatai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Puslaidininkių elementų atpažinimo rezultatai(2)

Viso elementų	Klasė „$\mathbf{\Omega_1}$“	Klasė „$\mathbf{\Omega_2}$“
851	6	845
100%	0,71%	99.29%

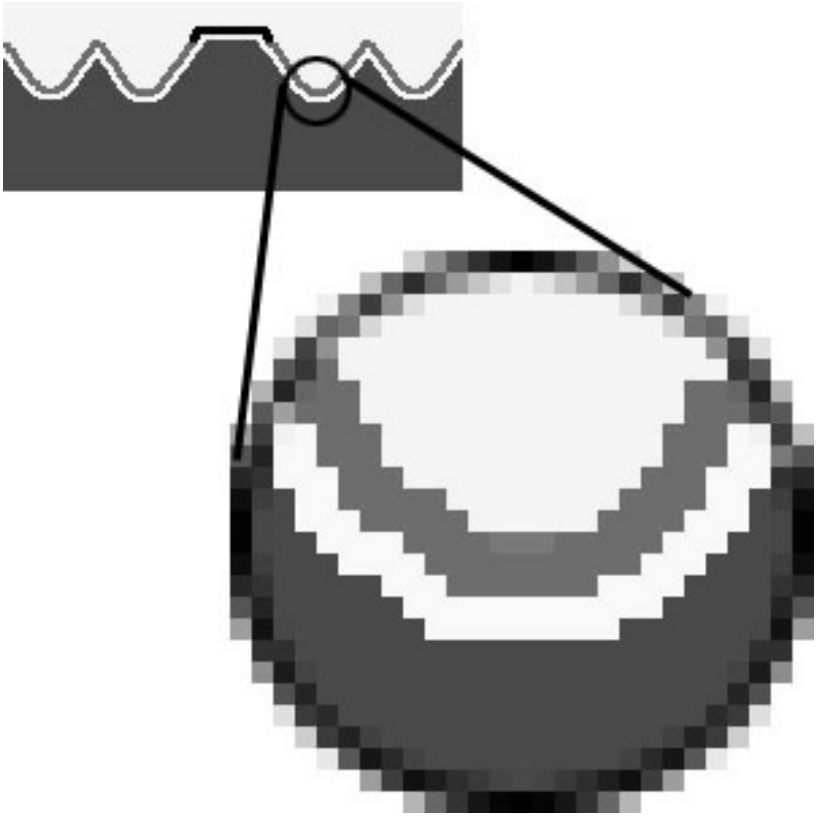
Puslaidininkių elementų priklausomumas klasėms $\mathbf{\Omega_1}$ ir $\mathbf{\Omega_2}$ pateiktas 8 lentelėje. Iš čia matoma, kad kai kurios savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūros, priskirtos klasei $\mathbf{\Omega_1}$ pagal (29) ryšių taisykles (6 lentelė), nepatenka į klasę $\mathbf{\Omega_1}$ pagal (35) ryšių taisykles. Taip yra todėl, kad pagal (29) ryšių taisykles puslaidininkių elementų struktūros, kuriose dalyvauja medžiaga **nF** gali būti priskiriamos klasei $\mathbf{\Omega_1}$ (su sąlyga, jei tenkinamos visos ryšių taisyklės), ko negali būti tuomet, kai patenkinamos visos taisyklės iš (35).

Tokiu būdu, elementai *A1* ir *A3* (6 lentelė) netenkina taisyklių (35), todėl jie priskirti klasei $\mathbf{\Omega_2}$.

8 lentelė. Puslaidininkių elementų atpažinimo rezultatų pavyzdžiai, esant ryšių taisyklėms (35)

Ω_1		Ω_2	
	A1		*B1*
	A2		*B2*
	A3		*B3*
	A4		*B4*
...	*Ai*	...	*Bj*
	A6		*B6*
...		...	*Bk*
...			*B845*

Priežastis, kodėl puslaidininkis elementas *A3* (6 lentelė) nepatenka tarp klasės $\mathbf{\Omega_1}$ elementų esant ryšių sąlygoms (35), matoma 41 paveiksle, padidinus vieną iš puslaidininkio elemento struktūros sričių.



41 pav. Puslaidininkio elemento struktūroje matomas regionas nF (mėlyna spalva)

Šis pavyzdys iliustruoja turimo atpažinimo algoritmo lankstumą. Papildžius ryšių tarp struktūroje dalyvaujančių medžiagų taisykles, nekeičiant algoritmo, gautas naujas atpažinimo rezultatas.

4.3. Programinės įrangos savybių apibendrinimas

Pagal pasiūlytą savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų analizės metodą realizuota ir eksperimentiškai patikrinta atpažinimo programa tinkama bet kokios savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų aibės atpažinimui.

Žemiau pateikiami pagrindiniai dalykai, į kuriuos reikia atkreipti dėmesį programinės įrangos naudotojui.

Nekeičiant algoritmo sistema gali būti adaptuojama esamai situacijai, jeigu žinoma:

a) puslaidininkių elementų struktūras sudarančios medžiagos (regionai),

b) reikalavimai medžiagų erdviniams ryšiams.

Tuomet, pritaikant algoritmą esamai situacijai, reikia:

c) aprašyti medžiagas atitinkančias spalvų RGB reikšmes bei tų spalvų žymėjimus,

d) pagal reikalavimus medžiagų erdviniams ryšiams, aprašyti RCC taisykles.

```
RegionColorValue[1] = 255,0,0;
RegionColorValue[2] = 0,255,0;
...
RegionColorValue[n] = xxx,yyy,zzz;

RegionColorCode[1] = 001;
RegionColorCode[2] = 002;
...
RegionColorCode[n] = iii;

RULE_NAME[1] = CON(1,001);
RULE_NAME[2] = EC(001,002);

RULE_NAME[m] = RULE(j,k);
```

Sistemos veikimo greitis.

Atlikus eksperimentinius tyrimus paaiškėjo, kad atpažinti vieną puslaidininkį elementą užtrunka apie 100 milisekundžių. Tačiau sistemos veikimo greičiui labai daug įtakos turi operacinės sistemos apkrautumas (operacinės sistemos

vykdomos funkcijos kompiuterio veikimo nepertraukiamumui užtikrinti ir pan.), todėl šis įvertinimas gana sąlyginis, nes kai kuriais atvejais skaičiavimai trunka daugiau nei dvigubai greičiau.

Kompiuterio parametrai sistemos testavimo metu buvo:

Procesorius: Intel(R) CoreTM 2 CPU, 6600 @ 2,4 GHz, 2 Cores, 2 Logical Processors; 8192 Kb cache memory

Darbinė atmintis: (RAM): 2,00 GB

Operacinė sistema: Microsoft(R) Windows WistaTM Ultimate

Naudojantis pasiūlytu puslaidininkių elementų atpažinimo metodu, buvo sukurta savaime besiformuojančių puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo programinė įranga. Taip pat buvo atlikti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo eksperimentiniai tyrimai taikant du skirtingus ryšių taisyklių atvejus.

Atlikus eksperimentinius tyrimus galima daryti išvadą, kad sukurta ir disertacijoje aprašyta programinė įranga tinkama savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui. Sukurta programinė įranga gali būti pritaikoma bet kokioms savaimingai (ir ne tik) besiformuojančioms dvimatėms struktūroms atpažinti, jei objektų kokybę galima vertinti pagal jų struktūras sudarančias medžiagas ir medžiagų tarpusavio ryšius. Puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas ir jo pagrindu realizuotos kompiuterizuotos priemonės gali atverti naujas galimybes pagreitinant savaiminio formavimosi sistemų atpažinimo darbus ir gaunant aukštesnės kokybės atrankos rezultatus.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Naudojantis trečiame skyriuje sukurtu atpažinimo modeliu ir algoritmu, buvo realizuota savaimingai besiformuojančių puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo kompiuterinė programa, kuri tinkama kokybiškai vertinti puslaidininkių elementų struktūras.
2. Atlikti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo eksperimentiniai tyrimai dviem ryšių taisyklių atvejais. Tokiu būdu buvo patikrintas programinės įrangos lankstumas.

3. Atlikus eksperimentinius tyrimus galima daryti išvadą, kad disertacijoje aprašyta programinė įranga yra tinkama savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui.
4. Sukurta programinė įranga yra lanksti ir tinkama bet kokioms savaimingai (ir ne tik) besiformuojančioms dvimatėms struktūroms atpažinti, jei elementų kokybę galima vertinti pagal jų struktūras sudarančias medžiagas ir tų medžiagų tarpusavio ryšius.

Bendrosios išvados

1. Atsižvelgiant į analizuojamų savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų specifiką ir apžvelgus kitų autorių darbus, daroma išvada, kad tinkamiausias būdas puslaidininkių elementų struktūroms atpažinti yra formali sistema kokybiniams erdviniams skaičiavimams – regionų-ryšių teorija (RCC).
2. Sukurtas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas, leidžiantis kokybiškai vertinti puslaidininkių elementų struktūras.
3. Naudojantis puslaidininkių elementų atpažinimo metodu ir algoritmu buvo sukurta savaimingai besiformuojančių puslaidininkinių elementų struktūrų atpažinimo kompiuterinė programa.
4. Atlikti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo eksperimentiniai tyrimai. Eksperimentiškai patikrinus metodo (programinės įrangos) veiksmingumą galima daryti išvadą, kad disertacijoje aprašytas metodas yra tinkamas savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimui.
5. Sukurta programinė įranga pritaikoma bet kokiems dvimačiams šablonams atpažinti, jei šablonų kokybę galima vertinti pagal jų struktūras sudarančias medžiagas ir tų medžiagų tarpusavio ryšius.

6. Puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas ir jo pagrindu sukurta programinė įranga leidžia sumažinti inžinierių darbo laiko sanaudas ir pagreitinti savaimingo formavimosi sistemų atpažinimo darbus. Kompiuterinė programa per 1 sekundę apdoroja 10 – 20 puslaidininkių elementų struktūrų.
7. Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas ir jo pagrindu realizuota programinė įranga gali atverti naujas galimybes:
   a. pagreitinant savaiminio formavimosi sistemų atpažinimo darbus;
   b. gaunant aukštesnės kokybės atrankos rezultatus.

Literatūros sąrašas

Abrantes, A.; Marques, J. 1996. A class of constrained clustering algorithms for object boundary extraction, *IEEE Transactions on Image Processing* 5(11): 1507–1521.

Alexandrov, A. D.; Ma, W. Y.; Abbadt, A.- E.; Manjunath B. S. 1995. Adaptive filiering and indexing for image databases, in *Proceedings of SPIE Conference on Storage and Retrieval for Image and Video Databases, San Jose, 1995,* 12–23.

Allen, J. F. 1983. Maintaining knowledge about temporal intervals, *Communications of the ACM* 26(11): 832–843.

Ballard, D. 1981. Generalizing the Houph transform to detect arbitrary shapes, *Patrern Recognition* 13(2): 111–122.

Balossino, N.; Lucenteforte, M.; Siracusa, S. 2001. Some practical remarks about pattern recognition techniques appliedto biomedical images, in *Proceedings of the 2nd International Symposium on*, 2001, 662–665.

Beeftink, F. 1995. Bipolar Device Modeling for VLSI Layout Verification, *Proceedings of the ProRISC/IEEE Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing*.

Beeftink, F. 1997. Advanced Subgraph Isomorphism for the Identification of Complex Device Structures, *Technical Report ET-CAS 1997*.

Bezdek, J. 1980. A convergence theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithms, *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1(2): 1–8.

Biacino, L.; Gerla, G. 1991. Connection structures, *Notre Dame Journal of Formal Logic* 32(2): 242–247.

Biederman, I. 1987. Recognition-by-components: A theory of human image understanding, *Psychological Review* 94(2): 115–147.

Brand, J. D.; Mason, J. S. D. 2001. Skin probability map and its use in face detection, in *Proceedings of International Conference on Image Processing* 1(1): 1034–1037.

Bruguera, J. D.; Guil, N.; Lang, T.; Villalba, J.; Zapata, E.L. 1996. CORDIC based parallel / pipelined architecture for the Hough transform, *The Journal of VLSI Signal Processing* 12(3): 207–221.

Cai, J.; Goshtasby, A. 1999. Detecting Human Faces in Colour Images, *Image and Vision Computing* 18(1): 63–75.

Cesarini, F.; Francesconi, E.; Gori, M.; Marinai, S.; Sheng, J.; Soda, G. 1997. A neural based architecture for spot-noisy logo recognition, in *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition*, *IEEE Computer Society Washington, USA, 1997.* 175–179.

Cesarini, F.; Gori, M.; Marinai, S.; Soda, G. 1996. A hybrid system for locating and recognizing low level graphic items, *Graphics Recognition Methods and Applications* 1072: 135–147.

Chen, W.; Chen, C.; Tsai, C.; Ho, T. 2006. The Neural Nwtwork Implementation in Pattern Recohnition of Semiconductor Etching Process, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers* 23: 269–279.

Cinque, L.; Yasuda, D.; Shapiro, L. G.; Tanimoto, S.; Allen, B. 1996. An improved algorithm for relational distance graph matching, *Pattern Recognition* 29(2): 349–359.

Clarke, B. L. 1981. A calculus of individuals based on 'connection', *Notre Dame Journal of Formal Logic* 22(3): 204–218.

Cohen, L. 1991. On active contour models and balloons, *CVGIP: Image Understanding* 53(2): 211–218.

Cohn, A. G.; Bennett, B.; Gooday, J.M.; Gotts, N.M. 1997. Representing And Reasoning With Qualitative Spatial Relations About Regions, *Spatial and Temporal Reasoning, Springer Netherlands, 1997.*

Cortelazzo, G.; Mian, G. A.; Vezzi, G.; Zamperoni, P. 1994. Trademark shapes description by string-matching techniques, *Pattern Recognition* 27(8): 1005–1018.

Crowley, J. L.; Berard, F. 1997. Multi-Modal Tracking of Faces for Video Communications, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*: 640–645.

Čaplinskas, A. 1998. Programų sistemų inžinerija II dalis, *Vilnius: Matematikos ir informatikos institutas, 1998.*

Dinesh, P.; Teoh, K. K. 1989. An intelligent vision system for inspection of packaged ICs. *TENCON '89, Fourth IEEE region 10 international conference* 22(24): 1003–1006.

Doermann, D.; Rivlin, E.; Weiss, I. 1993. Logo recognition using geometric invariants, in *Proceedings of the Second International Conference on Document Analysis and Recognition* 894–897.

Dunn, J. 1973. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact wellseparated clusters. *Journal of Cybernetics* 3(3): 32–57.

Düntsch, I.; Wang, H.; McCloskey, S. 2001. A relation — algebraic approach to the region connection calculus, *Theoretical Computer Science* 255(1-2): 63–83.

Durbin, R.; Willshaw, D. 1987. An analogue approach to the travelling salesman problem using an elastic net method, *Nature* 326(16): 689–691.

Egenhofer, M. J., Al-Taha, K. K. 1992. Reasoning about gradual changes of topological relationships, *Theories and Methods of Spatio-temporal Reasoning in Geographic Space*, *Berlin: Springer-Verlag, 1992,* 639: 196–219.

Engel, A. G.; Banker, B. Q. 1994. Ultrastructural changes in diseased muscle, in *Myology: Basic and Clinical, A. G. Engel and C. F. Armstrong, Eds. New York: McGraw-Hill*, *1994:* 889–1017.

Engel, A. G. 1994. Quantitative morphological studies of muscle, in *Myology: Basic and Clinical, A. G. Engel and C. F. Armstrong, Eds. New York: McGraw-Hill, 1994:* 1018–1045.

Fahlman, S. E. 1988. Fast learning variations on back-propagation: An empirical study, in *Proceedings of the 1988 connectionist models summer school, Pittsburgh*, *1988.*

Francesconi, E. ; Frasconi, P.; Gori, M.; Marinai, S.; Sheng, J. Q.; Soda, G.; Sperduti, A. 1998. Logo recognition by recursive neural networks, *Graphics Recognition Algorithms and Systems* 1389: 104–117.

Freeman, J. J.; Skapura, D. M. 1993. Neural networks: algorithm applications and programming techniques, *Addison-Wesley, 1993*.

Freksa, C. 1992. Temporal reasoning based on semi-intervals, *Artificial Intelligence* 54: 199–227.

Friedman, M.; Kandel, A. 1999. Introduction to Pattern Recognition. *World Scientific,* 329 p.

Fukushima, K. 2004. Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechan. of pattern recognition unaffected by shifts in position, *Biological Cybernetics, Berlin: Springer* 36(4): 193–202.

Galton, A. 1995. Towards a qualitative theory of movement. *Spatial Information Theory | Proceedings of the international conference COSIT'95*, *Sorubger, Austria* 998: 377–396.

Ge, X.; Smyth, P. 2000. Segmental semi-Markov models for change-point detection with applications to semiconductor manufacturing, *Technical Report UCI-ICS 00-08*, 2000.

Hachimura, K.. 1992. Decomposition of hand-printed patterns, *Pattern Recognition* 3: 417–429.

Haken, H. 1978. *Synergetics; An Introduction to non-equilibrium Phase Transitions and Self-Organisation in Physics, Chemistry and Biology*. Berlin: Springer Verlag. 404 p.

Hanahara, K.; Maruyama, T.; Uchiyama, T. 1988. A real time processor for the Hough transform, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10(1): 121–125.

Hsieh, I. Fan, K.. 2001. Multiple Classifiers for Color Flag and Trademark Image Retrieval, *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING* 10(6): 938–950.

Huang, K. Y.; Fu, K. S.; Sheen, T. H.; Cheng, S. W. 1985. Image processing of seismograms: (a) Hough transformation for the detection of seismic patterns; (b) thinning processing in the seismogram, *Pattern Recognition* 18(6): 429–440.

Huang, T. S.; Yang, G. Z. 1994. Human Face Detection in a Complex Background, *Pattern Recognition* 27(1): 53–63.

Hummel, J. E. 1998. Where view-based theories break down: The role of structure in shape perception and object recognition, *Cognitive Dynamics: Conceptual Change in Humans and Machines, MIT Press, Cambridge, MA, 1998*. 157–185.

Husain, A.; Shigeru, S. 2000. Use of neural networks for feature based recognition of liver region on CT images. *Neural Networks for Signal Processing X, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE Signal Processing Society Workshop* 2: 831–840.

Ibrahim, H. A. H.; Kender, J. R.; Shaw, D. E. 1997. The analysis and performance of two middle-level vision tasks on a fine grained SIMD tree machine, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 8(3): 292–309.

Janusonis, S. 2004. Self-formation of the Artificial Planar Systems. What is it? in *Self-formation Theory and Applications. Proceedings of the 6th International Conference* Self-formation Theory and Applications held in Vilnius, Lithuania, November 26-28, 2003, Solid State Phenomena, 97-98: 13–20.

Kalitzin, S. N.; Staal, J. J.; ter Haar Romeny, B. M.; Viergever, M. A. 2000. Image Segmentation and Object Recognition by Bayesian Grouping, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing* 3: 580–583.

Kass, M.; Witkin, A.; Terzopoulos, D. 1987. Snakes: Active contour models, *International Journal of Computer Vision* 4(1): 321–331.

Kass, M.; Witkin, A.; Terzopoulos, D. 1988. Snakes: Active Contour Models. *International Journal of Computer Vision* 1(4): 321–331.

Kohonen, T. 1982. Clustering, taxonomy, and topological maps of patterns, *In Proceedings of the 6th International Conference on Pattern Recognition*: 114–128.

Leonas, L. Janusonis, S. 2004. Simulation of Self-formation in Solar cell Technology. in *Self-formation Theory and Applications. Proceedings of the 6th International Conference* Self-formation Theory and Applications held in Vilnius, Lithuania, November 26-28, 2003, Solid State Phenomena, 97-98: 103–108.

Ma, W. Y.; Manjunath, B. S. 1998. A texture thesaurus for browsing large aerial photographs, *Journal of the American Society for Information Science (JASIS)* 49(7): 633–648.

Maharatna, K.; Banerjee, S. 2001. A VLSI array architecture for Hough transform, *Pattern Recognition* 34(7): 1503–1512.

Meijs van der, N. P.; Genderen van, A. J. 1992. Space-efficient extraction algorithms. in *Proceedings IEEE 3rd European Design Automation Conference* 16(19): 520–524.

Moganti, M.; Ercal, F.; Dagli, C.H.; Tsunekawa, S. 1996. Automatic PCB inspection algorithms: A survey, *Computer Vision and Image Understanding* 63(2): 273–313.

Nakazawa, Y. Saito, T. 1994. Region Extraction with Standard Brain Atlas for Analysis of MRI Brain Images, *International Conference on Image Processing* 1(13): 387–391.

Nicolis, G.; Prigogine, J. 1977. *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. New York: Wiley. 512 p.

Nevatia, R. 1986. Image segmentation. Handbook of pattern recognition and image processing, *Academic Press*: 215–330.

Okanioto, K. et al. Automatic Structure Identification of Brain NMR Images - First Step of In Vivo Quantitative Measurement of Brain, *Journal of Medical Imagings* 5: 676–681.

Pattichis, M.; Pattichis, C.; Avraam, M.; Bovik, A.; Kyriakou, K. 2000. AM-FM texture segmentation in electron microscopic muscle imaging, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 19(12): 1253–1258.

Petrov, A.; Shams, S. 2004. Microarray Image Processing and Quality Control, *Journal of VLSI Signal Processing Systems* 38(3): 211–226.

Philip, K. P.; Dove, E. L.; McPherson, D. D.; Gotteiner, N. L.; Stanford, W.; Chandran, K.B. 1994. The fuzzy Hough transform-feature extraction in medical images, *IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING* 13(2): 235–240.

Pilu, M.; Fisher, R. B. 1997. Model-driven grouping and recognition of generic object parts from single images, *Journal of Robotics and Autonomous Systems* 21: 107–122.

Prigogine, I. 1986. *Stengers. Order out of Chaos. Man's New Dialogue With Nature*. London: Heineman. 432 p.

Randell, D.A.; Cui, Z.; Cohn, A. G. 1992. A Spatial Logic Based on Regions and Connection, in *Proceedings 3rd International Conference on Knowledge Representation and Reasoning, Morgan Kaufmann*, San Mateo, 1992, 165–176.

Randell, D. A.; Cohn, A. G. 1989. Modelling Topological and Metrical Properties in Physical Processes, in *Proceedings 1st International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, edited by Brachman, R and Levesque, H and Reiter, R, Morgan Kaufmann, Los Altos, 1989, 357–368.

Rasmussen, S.; Baas, N.A.; Mayer, B.; Nilsson, M.; Olesen, M.W. 2001. Ansatz for Dynamical Hierarchies. *Artificial Life* 7(4): 329–353.

Rasmussen, S. ; Chen. L.; Nilsson, M.; Abe, S. 2003. Bridging Nonliving and Living Matter. *Artificial Life* 9(3): 269–316.

Riesenhuber, M.; Poggio, T. 1999. Hierarchical models of object recognition in cortex, *Neuroscience* 11(2): 1019–1025.

Riesenhuber, M.; Poggio, T. 1999. Are cortical models really bound by the "binding problem"?, *Neuron* 24(1): 87–93.

Ripley, B.D. 1996. Pattern recognition and neural networks. *Cambridge University press*.

Rumelhart, D. E.; Hinton, G. E.; Williams, R. J. 1986. Learning internal representations by error propagation, *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* 1: 67–65.

Sankowski, D.; Strzecha, K. 2001. Image segmentation algorithm based on statistical pattern recognition methods. *CAD Systems in Microelectronics, Proceedings of the 6th International Conference. The Experience of Designing and Application of.* Lviv-Slavsko, Ukraine, 2001, 239–242.

Saulis, A.; Vasilecas, O. 1998. Informacinių sistemų pagrindai. Mokomoji knyga. *Vilnius: Technika, 1998*.

Schochet, S. S.; Lampert, W. D. 1978. Diagnostic electron microscopy of skeletal muscle, in *Diagnostic Electron Microscopy, B. F. Trump and R. T. Jones, Eds. New York: Wiley, 1978*: 209–252

Shih, T. K.; Huang, J. Y.; Wang, C. ; Hung, J. C.; Kao, C. 2001. An Intelligent Content-based Image Retrieval System Based on Color, Shape and Spatial Relations, in *Proceedings of the National Science Council ROC(A)* 25(4): 232–243.

Smith, J. R.; Chang, S. F. 1996. VisualSEElk: A Fully Automated Content-base Image Query System, in *Proceedings of Fourth ACM International Multimedia Conference* 1: 87–98.

Sobottka, K.; Pitas, I. 1996. Looking for Faces and Facial Features in Colour Images, *Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications* 7(1): 124–137.

Sompolinsky, H.; Golomb, D.; Kleinfeld, D. 1990. Global processing of visual stimuli in a neural network of coupled oscillators, in *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87: 7200–7204.

Sperduti, A.; Starita, A. 1996. Supervised neural networks for the classification of structures, *IEEE Transaction on Neural Networks* 8(3): 714–735.

Stell, J. G. 2000. Boolean connection algebras: A new approach to the Region-Connection Calculus, *Artificial Intelligence* 122(1): 111–136.

Stell, J. G. 2000a. Boolean connection algebras: a new approach to the Region-Connection Calculus, *Artificial Intelligence* 122(1-2): 111–136.

Telksnys, L. 2004. Self-Formation Supported by Pattern Recognition. *Solide State Phenomena*. In *Proceedings of the 6th International Conference on Self-Formation Theory and Applications, ISSN 1012-0394* 97-98: 51–58.

Timmerman, D.; Hahn, H.; Hosticka, B. J. 1989.. Hough transform using Cordic method, *Electronics Letters* 25(3): 205–206.

Tsai, A.; Yezzi, A.; Willsky, A. S. 2001. Curve Evolution Implementation of the Mumford–Shah Functional for Image Segmentation. Denoising, Interpolation and Magnification, *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING* 10(8): 1169–1186.

Vapnik, V. N. 1995. The Nature of Statistical Learning Theory, *Berlin: Springer-Verlag, 1995.*

Walther, D.; Itti, L.; Riesenhuber, M.; Poggio, T.; Koch, C. 2002. Attentional selection for object recognition - a gentle way, *In Proceedings on Biologically Motivated Computer Vision*, *Springer,* 472–479.

Wanga, S. L.; Laua, W. H.; Leungb, S. H. 2004. Automatic lip contour extraction from color images, *Pattern Recognition* 37: 2375–2387.

Wolfram, S. 2002. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc. ISBN 1579550088, 1197 p.

Zhang, Y. L.; Guo, N.; Du, H.; Li, W. H. 2004. Automated defect recognition of C-SAM images in IC packaging using Support Vector Machines, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25(11-12): 1191–1196.

Zhou, H.; Kassim, A. A.; Ranganath, S. 1998. A fast algorithm for detecting die extrusion defects in IC packages, *Machine Vision and Applications* 11(1): 37–41.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Saulevičius, D.; Leonas, L. 2009a. Semiconductor Elements Self-formation based on Qualitative Spatial Reasoning, *Electronics and Electrical Engineering* 89(1): 15–20.

Saulevičius, D.; Telksnys. L. 2009b. Analysis of a Self-Formation Process of Semiconductor Elements, *Information Technology and Control* 38(1): 14–20.

Priedai

A priedas. Puslaidininkių elementų atpažinimo kompiuterinės programos „BMPRCCv1“ funkcijos

Pagrindinės „BMPRCCv1“ programos funkcijos yra skirtos paveikslų analizei. Čia nėra aprašomos darbinės funkcijos ar funkcijos skirtos paveikslams nuskaityti.

Pagrindinės nuskaitytų paveikslų analizės funkcijos yra:
SetRegions() funkcija regionų identifikavimui
InitialBuild Regions() – pirminio regionų išskyrimo funkcija
SetLinks() – ryšių tarp regionų nustatymo funkcija
ConsolidateRegions() – regionų apjungimo funkcija
CheckRules(); – funkcija RCC taisyklių tikrinimui identifikuotiems regionams

SetRegions (), InitialBuild Regions(), SetLinks(), ConsolidateRegions() funkcijos:

```
bool RCC_::SetRegions()
{
   mTree.RemoveAll();
   DropLabels();


   if (!InitialBuildRegions())
      return false;

   SetLinks();

   if (!ConsolidateRegions())
      return false;

   return true;
}

void RCC_::DropLabels()
{
   RCC_Node::mStaticLabelCount= 1;

   if (mImage.NRow() ==0 && mImage.NCol()==0)
      return;

   for (int iir= 0; iir < mImage.NRow(); iir++)
   {
      for (int iic= 0; iic< mImage.NCol(); iic++)
      {

         mImage.SetLabel (iir, iic, -1);

      }
   }


}

bool RCC_::InitialBuildRegions()
{

   if (mImage.NRow() ==0 && mImage.NCol()==0)
      return false;
```

```
    for (int iir= 0; iir < mImage.NRow(); iir++)
    {
        for (int iic= 0; iic< mImage.NCol(); iic++)
        {
            if (mImage.GetLabel (iir, iic) >= 0)
                continue;

            int label= -1;
            int ccolor= mImage.GetColor(iir, iic);

            for (int tr= -1; tr<= 1 && label<0; tr++)
            {   for (int tk= -1; tk<= 1 && label<0 ; tk++)
                {
                    if (tk==0 && tr==0)
                        continue;

                    int tmplabel= -1;
                    if (FindMatchByColor(iir+tr, iic+tk,
ccolor, tmplabel))//demesio: row/col gali iseiti is ribu
                    {
                        label= tmplabel;
                        mImage.SetLabel (iir, iic, label);
                        break;
                    }
                }//for tk
            }//for tr

            if (label< 0)
            {   //naujas regionas
                label= mTree.AddNewNode(ccolor);
                mImage.SetLabel (iir, iic, label);
            }

        }//for iic
    }//for iir




    return true;
}


void RCC_::SetLinks()
{
```

```
   if (mImage.NRow() ==0 && mImage.NCol()==0)
      return ;

   for (int iir= 0; iir < mImage.NRow(); iir++)
   {
      for (int iic= 0; iic< mImage.NCol(); iic++)
      {
         int clabel= mImage.GetLabel(iir, iic);

         for (int tr= -1; tr<= 1; tr++)
         {   for (int tk= -1; tk<= 1; tk++)
             {
                if (tk==0 && tr==0)
                   continue;
                int r1= iir+tr;
                int c1= iic+tk;
                if (r1<0 || c1<0 || r1>= mImage.NRow() ||
c1>= mImage.NCol())
                   continue;

                int label1= mImage.GetLabel (r1, c1);
                if (label1 != clabel)
                   mTree.AddLink(label1, clabel);
             }//for tk
         }//for tr

      }//for iic
   }//for iir


   return ;
}


bool RCC_::ConsolidateRegions()
{
   while(1)
   {
      if (!mTree.Consolidate())
         break;
   }
   return true;
                                 }
```

```
bool RCC_::FindMatchByColor(int row, int col, int color,
int &label)
{
//col,row gali buti iseje is ribu, butina tikrinti

   if (row < 0 || col < 0 ||
      row >= mImage.NRow() ||
      col >= mImage.NCol())
      return false;


   if (mImage.GetLabel(row,col) < 0)
      return false;

   if (mImage.GetColor (row,col) == color)
   {  label= mImage.GetLabel(row,col);
      return true;
   }

   return false;
}
```

CheckRules() funkcija:

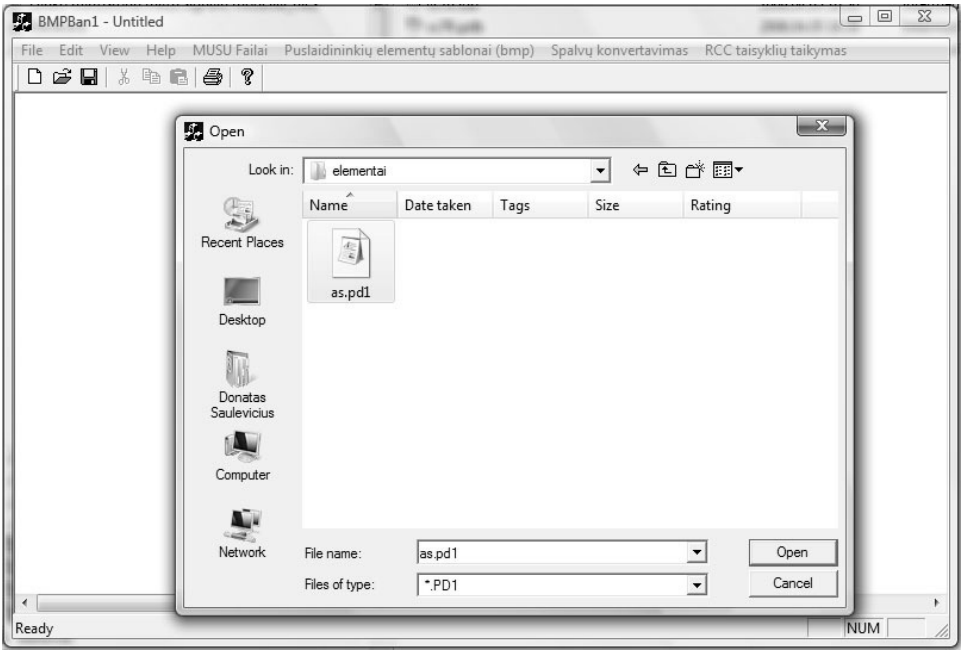
```
bool RCC_::CheckRules()
{
   int passedCount= 0;

   for (int i= 0; i< mRules.Count(); i++)
   {
      if (InterpretRule (mRules[i]))
         passedCount++;
   }

   return (passedCount == mRules.Count());
}


bool RCC_::InterpretRule (RCC_Rule &rule)
```

```
{
   bool bPassed= false;

   if (rule.code == RCC_Rule::EC)
   {
      for (int i= 0; i< mTree.mNodes.Count(); i++)
      {
         RCC_Node &node= mTree.mNodes[i];
         if (node.mColor == rule.param1 &&
node.IsLinkedByColor(rule.param2))
         {  bPassed= true;
            break;
         }
      }
   }
   else if (rule.code == RCC_Rule::NC)
   {
      for (int i= 0; i< mTree.mNodes.Count(); i++)
      {
         RCC_Node &node= mTree.mNodes[i];
         if (node.mColor == rule.param1 &&
!node.IsLinkedByColor(rule.param2))
         {  bPassed= true;
            break;
         }
      }
   }
   else if (rule.code == RCC_Rule::CON)
   {
      int n= mTree.CountRegionsByColor(rule.param1);
      if (n == rule.arg)
         bPassed= true;
   }
   else
   {
       assert(0);
   }

   rule.result= bPassed ? RCC_Rule::OK : RCC_Rule::ERR;
   return bPassed;
}
```

B priedas. Puslaidininkių elementų atpažinimo kompiuterinės programos „BMPRCCv1“ papildymas

Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo programa „BMPRCCv1“ analizuoja *bmp* formato paveiksliukus. Sistemoje realizuota *bmp* paveikslų RGB reikšmių perskaičiavimo (normalizavimo) funkcija, bei paveikslo su perskaičiuotomis reikšmėmis kopijavimo funkcija.

Paveikslų kopijavimo funkcija leidžia saugoti failą kitu – darbiniu *sd1* formatu. Tai yra supaprastintas paveikslo saugojimo būdas, kur saugoma tik paveikslo taškų RGB reikšmių informacija. Sistema geba nuskaityti tokius failus iš disko ir vykdyti tas pačias analizės funkcija kaip ir *bmp* paveikslų atveju:



1B pav. Darbo su pd1 formato failais langas

Donatas SAULEVIČIUS

SAVAIMINGAI BESIFORMUOJANČIŲ
PUSLAIDININKIŲ ELEMENTŲ ATPAŽINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
informatikos inžinerija (07T)

RECOGNITION OF SELF-FORMED
SEMICONDUCTOR ELEMENTS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Informatics Engineering (07T)

2009 05 15. 11,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11,
10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius
http://www.bmk.lt