ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: AUTOMATYKA z. 138 Nr kol. 1581

Artur BAL
Politechnika Śląska

POSZUKIWANIE ODPOWIEDNIOŚCI ELEMENTÓW OBRAZÓW Z WYKORZYSTANIEM NIEDOKŁADNEJ ODPOWIEDNIOŚCI GRAFÓW *

Streszczenie. W pracy przedstawiono dwa algorytmy — algorytm jednokrokowy i algorytm iteracyjny — pozwalające określić odpowiedniość obszarów obrazów stereo. Zadanie to realizowane jest poprzez poszukiwanie niedokładnej odpowiedniości grafów reprezentujących obrazy wejściowe. Do poszukiwania niedokładnej odpowiedniości grafów zastosowano zmodyfikowany algorytm poszukiwania największej kliki w odpowiednio zdefiniowanym grafie skojarzeniowym. Działanie algorytmów zaprezentowane zostało na symulowanych i rzeczywistych obrazach stereo.

CORRESPONDENCE OF IMAGE ELEMENTS USING INEXACT GRAPH MATCHING ALGORITHM

Summary. In this report two novel algorithms (one-step algorithm and iterative algorithm) for stereo image region matching are presented. Region matching is established by finding inexact matching of graphs that represented input images. For finding of inexact graph matching modified maximum clique finding algorithm is used. The tests results for simulated and real stereo images are also presented.

1. Wprowadzenie

Idea wykorzystania grafów jako reprezentacji struktur obrazów od dawna znajduje zastosowanie w przetwarzaniu i analizie obrazów, w tym m.in. w zagadnieniach wymagających: poszukiwania w obrazie określonych wzorców, określania odpowiedniości obrazów, klasyfikacji obiektów. W literaturze dotyczącej teorii grafów prezentowanych jest wiele

* Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego BW-428/Rau-1/02/3.

algorytmów pozwalających na określanie odpowiedniości między elementami dwóch różnych grafów. Do chwili obecnej większość prezentowanych wyników dotyczy zagadnień związanych z poszukiwaniem *dokładnej odpowiedniości* (*izomorfizmu*) *grafów*. W wielu praktycznych zastosowaniach (w których zachodzi potrzeba np. poszukiwania wzorca w obrazie, bazie danych bądź określenia odpowiedniości elementów obrazów) stosowanie metod dokładnych jest utrudnione lub niemożliwe. Typowym zadaniem, w którym należy uwzględnić możliwość wystąpienia zróżnicowania struktury obrazów, jest zadanie *poszukiwania odpowiedniości w parze obrazów stereo*. W takim przypadku zamiast poszukiwania dokładnej odpowiedniości konieczne jest stosowanie metod pozwalających na określenie *niedokładnej odpowiedniości*. Prezentacja dwóch nowych algorytmów, które mogą być zastosowane w takim przypadku, jest głównym tematem niniejszej pracy.

Wspomniane powyżej zagadnienia zostały przedstawione dokładniej w kolejnych rozdziałach. W rozdziale 2 zawarto ogólne informacje dotyczące problematyki poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów. Opracowane algorytmy zostały przedstawione w rozdziale 3, a przykłady ich zastosowania zaprezentowane zostały w rozdziale 4. W ostatnim rozdziale dokonano podsumowania dotychczasowych wyników badań oraz przedstawiono kierunki planowanych prac.

2. Przedstawienie problemu

2.1. Poszukiwanie odpowiedniości

W widzeniu maszynowym często zachodzi konieczność klasyfikowania obiektów na podstawie ich obrazów (np. [2, 5, 14]), poszukiwania w obrazie wybranych wzorców (np. [1, 5, 7, 9, 14]) czy też określania podobieństwa (odpowiedniości) między obrazami lub ich elementami (np. [3–5, 14]). Cechą wspólną wszystkich tych zastosowań jest to, że do ich rozwiązania konieczne jest określenie podobieństwa elementów jednego obrazu w stosunku do elementów innego obrazu.

Zadanie *poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów* jest zadaniem powszechnie uważanym za jedno z najtrudniejszych w dziedzinie widzenia maszynowego. Zagadnienie to w stosunku do pozostałych z przedstawionych wcześniej zadań jest również zadaniem najbardziej ogólnym.

Ze względu na to, że najczęściej poszukiwanie odpowiedniości elementów obrazów stosowane jest w stereowizji, jest ono określane również jako *poszukiwanie stereokorespondencji obrazów*. W przypadku stereowizji znajomość odpowiedniości elementów obrazów stereo pozwala na odtworzenie relacji przestrzennych zachodzących w rzeczywistej scenie. Rekonstrukcja tych relacji odbywa się zatem tylko na podstawie informacji zawartej w dwóch lub więcej różniących się między sobą obrazach będących dwuwymiarowymi odwzorowaniami analizowanej sceny. Obrazy te pozyskiwane są z różnych pozycji i często za pomocą różnych sensorów.

Podstawowe znaczenie dla rekonstrukcji relacji przestrzennych ma fakt pozyskania obrazów sceny z różnych pozycji. Pomimo tego, że zwykle, w stosunku do wielkości sceny, położenie poszczególnych sensorów w czasie akwizycji obrazów nie różni się zbytnio, różnice między pozyskanymi obrazami mogą być znaczące. Występowanie m.in. tych właśnie różnic w obrazach stereo powoduje, że zadanie stereokorespondencji jest takie trudne do rozwiązania. Pomimo podejmowanych od wielu lat prób nie udało się opracować uniwersalnej metody rozwiązania tego problemu, a otrzymywane do tej pory wyniki można stosować tylko w pewnych określonych przypadkach, co wiąże się z nałożeniem znacznych ograniczeń na sposób pozyskania obrazów (w tym rodzaj i ustawienie sensorów) i/lub rodzaj sceny 3D.

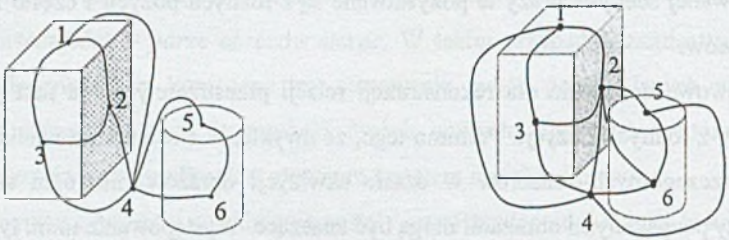
Poszukiwanie odpowiedniości obrazów stereo nie jest jedynym obszarem zastosowań poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów — innym jest np. dopasowywanie zdjęć lotniczych i satelitarnych. Należy zaznaczyć, że ze względu na ogólność prezentowanego problemu uzyskane wyniki mogą zostać zastosowane w innych zadaniach, w których występuje potrzeba określenia odpowiedniości elementów obrazów.

2.2. Zastosowanie grafów w poszukiwaniu odpowiedniości elementów obrazów

W teorii grafów (np. [7, 8]) zagadnienie odpowiedniości grafów obecne jest praktycznie od samego początku istnienia tego działu matematyki. Dzięki temu, że obraz można przedstawić w postaci odpowiednio zdefiniowanego grafu, istnieje możliwość wykorzystania metod znanych z teorii grafów w zadaniach widzenia maszynowego. Uwaga ta odnosi się zwłaszcza do zadań, w których konieczne jest określenie odpowiedniości między elementami obrazów.

Grafy szczególnie dobrze nadają się do przedstawienia struktur, jakie tworzą elementy obrazów. W widzeniu maszynowym elementy obrazów, takie jak np. obszary lub krawędzie

wyróżnione w obrazach, są zwykle reprezentowane przez wierzchołki grafów; w takim przypadku krawędzie grafów (linie grafów) reprezentują relacje zachodzące między tymi elementami. W zależności od potrzeb stosowane mogą być różne rodzaje grafów. Grafy utworzone na podstawie obrazów będących danymi wejściowymi dla danego problemu reprezentują pewne istotne z punktu widzenia danego zastosowania cechy tych obrazów.



a) *b)*

Rys.1. Przykłady utworzenia grafów obszarów sąsiadujących dla obrazów o różnych strukturach
Fig. 1. Example of creating region adjacency graphs for images with different structures

Przykład dekompozycji obrazu w graf przedstawiony został na rys. 1. W tym przypadku utworzone na podstawie obrazów grafy zachowują informacje w postaci obecności lub braku krawędzi między ich wierzchołkami o, odpowiednio, zachodzeniu lub niezachodzeniu relacji sąsiedztwa między poszczególnymi obszarami poszczególnych obrazów. Odpowiadające sobie na obrazach rys. 1*a* i rys. 1*b* obszary mają różne sąsiedztwo (np. obszary 1 i 5 pokazane na rys. 1*b* sąsiadują ze sobą; relacja ta nie zachodzi między odpowiadającymi im obszarami z rys. 1*a*) — wynikiem tego jest powstanie różnic w strukturach tych obrazów, które przenoszą się na ich grafy.

W praktyce elementom grafów reprezentujących obraz nadaje się określone zbiory atrybutów. Opisują one własności (cechy) elementów obrazów, którym odpowiadają dane elementy grafu. W prezentowanym przykładzie wierzchołkom grafu może zostać przypisana np. wartość określająca pole odpowiedniego obszaru, a krawędziom można przypisać np. odległość miedzy środkami sąsiadujących obszarów. Dzięki takiemu zabiegowi graf zawiera nie tylko informacje o strukturze obrazu, ale również o jego semantyce. Graf taki określany jest mianem *grafu atrybutowego* lub *sieci*, a jego formalna definicja podana jest poniżej:

Definicja 1. *Graf G jest uporządkowaną czwórką* $G=(V,E,\vartheta,\varepsilon)$, *gdzie:*

- $V=\{v_i\}$ *jest zbiorem wierzchołków grafu,*
- $E=\{e_j\}\subseteq V\times V$ *jest zbiorem krawędzi grafu,*
- $\vartheta: V\to A_V$ *i* $\varepsilon: E\to A_E$ *są funkcjami przypisującymi wierzchołkom i krawędziom grafu odpowiadające im wartości atrybutów.* □

W teorii grafów w zakresie poszukiwania odpowiedniości grafów najlepiej do tej pory zostało przebadane zagadnienie poszukiwania *dokładnej odpowiedniości grafów*, która formalnie jest definiowana następująco:

Definicja 2. *Izomorfizmem grafów* $G_1=(V_1,E_1,\vartheta_1,\varepsilon_1)$ *i* $G_2=(V_2,E_2,\vartheta_2,\varepsilon_2)$ *nazywamy wzajemnie jednoznaczne odwzorowanie* $f: V_1\to V_2$ ($f^{-1}: V_2\to V_1$) *takie, że:*

- *dla każdego* $v_i\in V_1$ *zachodzi* $\vartheta_1(v_i)=\vartheta_2(f(v_i))$,
- *dla każdego* $v_j\in V_2$ *zachodzi* $\vartheta_2(v_j)=\vartheta_1(f^{-1}(v_j))$,
- *dla każdego* $e_1=(v_a,v_b)\in V_1$ *istnieje* $e_2=(f(v_a),f(v_b))\in E_2$ *takie, że zachodzi* $\varepsilon_1(e_1)=\varepsilon_2(e_2)$,
- *dla każdego* $e_2=(v_x,v_z)\in V_2$ *istnieje* $e_1=(f^{-1}(v_x),f^{-1}(v_z))\in E_1$ *takie, że zachodzi* $\varepsilon_1(e_1)=\varepsilon_2(e_2)$. □

Określenie izomorfizmu między grafami jest równoznaczne z określeniem relacji odpowiedniości między poszczególnymi elementami grafów, dla których izomorfizm był poszukiwany. W praktyce częściej niż izomorfizm w podanym powyżej sensie między grafami zachodzi *izomorfizm w sensie podgrafu* (*izomorfizm podgrafu*) lub *izomorfizm w sensie podgrafów* (*izomorfizm podgrafów*). Definicje tych relacji odpowiedniości zostaną przedstawione dalej, ich przedstawienie należy jednak poprzedzić wprowadzeniem pojęcia *podgrafu*.

Definicja 3. *Podgrafem* g *grafu* $G=(V,E,\vartheta,\varepsilon)$ *nazywamy graf* $g=(V_g,E_g,\vartheta_g,\varepsilon_g)$, *taki że*:

- $V_g \subseteq V$ *i* $\vartheta_g(v_i)=\begin{cases} \vartheta(v_i) & gdy \quad v_i \in V_g \\ niezdefiniowane & gdy \quad v_i \notin V_g \end{cases}$,
- $E_g \subseteq E \cap (V_g \times V_g)$ *oraz* $\varepsilon_g(e_j)=\begin{cases} \varepsilon(e_j) & gdy \quad e_j \in E_g \\ niezdefiniowane & gdy \quad e_j \notin E_g \end{cases}$. □

Często do oznaczenia, iż g jest podgrafem G, stosowany jest zapis $g \subseteq G$.

Definicja 4. *Jeżeli podgraf* g_1 *grafu* G_1 *jest izomorficzny z* G_2, *to grafy* G_1 *i* G_2 *są izomorficzne w sensie podgrafu.* □

W takim przypadku G_2 jest podgrafem G_1.

Definicja 5. *Jeżeli podgrafy* g_1 *i* g_2 *grafów* G_1 *i* G_2 *są izomorficzne, to grafy* G_1 *i* G_2 *są izomorficzne w sensie podgrafów.* □

Należy zaznaczyć, że przypadkami szczególnymi izomorfizmu w sensie podgrafów są izomorfizm podgrafu i izomorfizm grafów.

Tak, jak to już zostało zaznaczone wcześniej, metody dokładne tylko w niewielkim stopniu nadają się do poszukiwania odpowiedniości elementów w rzeczywistych obrazach. Odpowiedzią na tę niedogodność jest poszukiwanie metod pozwalających na określanie *niedokładnej odpowiedniości grafów*. Warto zaznaczyć, że zagadnienie poszukiwania niedokładnej odpowiedniości grafów stanowi uogólnienie problemu poszukiwania dokładnej odpowiedniości grafów.

Rys. 2 przedstawia wyniki poszukiwania odpowiedniości obszarów dla symulowanego obrazu stereo (rys. 2*a* i rys. 2*b*) w zależności od ograniczeń nałożonych na strukturę grafów obszarów sąsiadujących utworzonych w poszczególnych obrazach dla obszarów, dla których zachodzi relacja odpowiedniości z obszarem należącym do drugiego obrazu. W przypadku wyników przedstawionych na rys. 2*c* i rys. 2*d* struktury, w podanym powyżej sensie, odpowiadających sobie obszarów na obu obrazach muszą być identyczne — ten rodzaj odpowiedniości elementów obrazów stereo jest określany dalej jako *odpowiedniość strukturalnie dokładna*. Wyniki przedstawione na rys. 2*e* i rys. 2*f* zostały uzyskane przy braku podanego powyżej ograniczenia — jest to *odpowiedniość strukturalnie niedokładna*. W obu

przypadkach dopuszczona została możliwość występowania różnic miedzy wartościami innych atrybutów opisujących wierzchołki i krawędzie grafów reprezentujących obrazy.

Do określenia niedokładnej odpowiedniości grafów stosuje się algorytmy realizujące ideę *edycji grafów*, która polega na wykonaniu ciągu operacji (jednostkowych przekształceń) w celu przekształcenia jednego grafu, np. reprezentującego obraz, w drugi, który np. reprezentuje wzorzec. Cel ten jest osiągnięty, gdy porównywane grafy po przekształceniach będą izomorficzne w sensie definicji 2, 4. lub 5. Określenie jednej z podanych relacji izomorfizmu między porównywanymi grafami jest równoznaczne z określeniem niedokładnej odpowiedniości między porównywanymi grafami. Wybór jako docelowej jednej z podanych relacji jest uzależniony od implementacji.

Należy zauważyć, że możliwych ciągów przekształceń prowadzących do określenia izomorfizmu w wybranej postaci jest wiele. Konieczne jest zatem określenie sposobu ustalenia, który ciąg przekształceń prowadzi do prawidłowego określenia niedokładnej odpowiedniości grafów. W tym celu z każdą jednostkową operacją związany jest koszt jej wykonania, a rozwiązaniem jest taka sekwencja operacji edycji, która minimalizuje całkowity koszt przekształcenia grafu do wymaganej postaci. Spotykane są również rozwiązania, w których przekształceniom poddawane są obydwa porównywane grafy — takie podejście nie zmienia jednak istoty idei edycji grafów. W najbardziej ogólnym przypadku wyróżnia się sześć podstawowych (jednostkowych) operacji edycji, są to: *i*) wstawienie, *ii*) podstawienie i *iii*) skasowanie wierzchołka oraz *iv*) wstawienie, *v*) podstawienie i *vi*) skasowanie krawędzi grafu. Definicja kosztu poszczególnych operacji, a także kolejność i sposób ich przeprowadzania są, oprócz docelowej formy relacji między grafami, cechami różniącymi poszczególne implementacje idei edycji grafów.

Warto zaznaczyć, że w przypadku, gdy przekształcenie ma na celu określenie między grafami izomorfizmu podgrafów, wystarczy określenie kosztu, a tym samym stosowanie tylko dwóch operacji, mianowicie: operacji podstawienia wierzchołka i operacji podstawienia krawędzi. Taki właśnie zestaw przekształceń jest wystarczający na potrzeby poszukiwania niedokładnej odpowiedniości grafów. Prezentowane w tej pracy nowe algorytmy są równoważne funkcjonalnie takiemu właśnie sposobowi poszukiwania niedokładnej odpowiedniości. Dokładniejszy opis tych algorytmów zawarty jest w kolejnym rozdziale.

3. Algorytm poszukiwania niedokładnej odpowiedniości obszarów

3.1. Inspiracja i uwagi wstępne

Prezentowane w pracy algorytmy przeznaczone są do poszukiwania odpowiedniości obszarów w parze obrazów stereo. W rozdziale 3.2 opisany został *algorytm jednokrokowy*, natomiast w rozdziale 3.3 przedstawiono *algorytm iteracyjny*, będący rozwinięciem algorytmu jednokrokowego. Inspiracją do opracowania obu prezentowanych algorytmów był pomysł poszukiwania izomorfizmu podgrafów poprzez poszukiwanie największej kliki w odpowiednio zdefiniowanym grafie. Pomysł ten został upowszechniony w kilku artykułach opublikowanych w pierwszej połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku (informacje na ten temat znaleźć można np. w [9, 10, 12]).

W tym miejscu, na potrzeby dalszych rozważań, konieczne jest wprowadzenie kilku definicji.

Definicja 6. *Graf pełny to taki graf, w którym każdy wierzchołek jest bezpośrednio połączony za pomocą krawędzi z każdym innym wierzchołkiem tego grafu.* □

Definicja 7. *Klika jest to taki podgraf danego grafu, w którym jest grafem pełnym.* □

W ogólnym przypadku w grafie można wyróżnić wiele różnych klik. Kliki te różnią się wierzchołkami grafu, które do nich należą. Ze względów praktycznych w teorii grafów rozróżnia się różne rodzaje klik; poniżej przedstawiono definicje pojęć stosowanych w pracy.

Definicja 8. *Klika maksymalna q jest to taka klika grafu $G=(V,E)$, która pododaniu do niej dowolnego wierzchołka v_i, takiego że $v_i \in V$ i $v_i \notin q$, przestaje być grafem pełnym.* □

Definicja 9. *Największa klika grafu G jest to taka klika maksymalna tego grafu, która zawiera największą liczbę wierzchołków.* □

W literaturze przedmiotu znanych jest kilka, uznanych już za klasyczne, algorytmów realizujących zadanie poszukiwania izomorfizmu podgrafów poprzez znajdowanie największej kliki. Jednym z nich jest, opublikowany w 1972 roku, algorytm, którego autorem jest G. Levi. Opis tego algorytmu można znaleźć m.in. w pracy 9.

Oryginalny algorytm Leviego przeznaczony jest do poszukiwania dokładnej odpowiedniości grafów poprzez poszukiwanie izomorfizmu podgrafów. W prezentowanym w niniejszej pracy algorytmie wykorzystane zostały niektóre idee stosowane w algorytmie Leviego. Odpowiednia ich implementacja oraz dodanie pewnych nowych rozwiązań pozwoliło na poszukiwanie odpowiedniości elementów obrazów rzeczywistych poprzez poszukiwanie niedokładnej odpowiedniości grafów.

3.2. Opis algorytmu

3.2.1. Krok 1 — operacje wstępne

Pierwszym krokiem prezentowanego algorytmu jest transformacja obrazów O_1 i O_2 tworzących parę stereo, do postaci grafów atrybutowych $G_1 = (V_1, E_1, \vartheta_1, \varepsilon_1)$ i $G_2 = (V_2, E_2, \vartheta_2, \varepsilon_2)$. Atrybutami tych grafów są wektory cechy ${}^{V}\Delta_i^l$ i ${}^{E}\Delta_{jk}^l$, $l \in \{1,2\}$. Opisują one właściwości i-tego elementu l-tego obrazu oraz cechy jk-tej relacji między parą elementów tego obrazu; w przypadku prezentowanego algorytmu elementami obrazów są obszary wyróżnione w obrazach w wyniku segmentacji. Atrybuty te przypisane są odpowiednio do i-tego wierzchołka i jk-tej krawędzi l-tego grafu. Do utworzenia grafów G_1 i G_2 wykorzystany został znany z literatury *graf obszarów przylegających* (ang. *region adjacency graphs — RAG*). Sposób tworzenia takiego grafu został opisany w rozdziale 2.2, a przykłady tworzenia RAG dla konkretnych obrazów przedstawione są na rys. 1.

3.2.2. Krok 2 — utworzenie grafu skojarzeniowego

Kolejnym krokiem algorytmu jest utworzenie *grafu skojarzeniowego* $G_A = (V_A, E_A, \vartheta_A, \varepsilon_A)$. Graf ten tworzony jest na podstawie grafów G_1 i G_2, reprezentuje on wszystkie możliwe skojarzenia (relacje odpowiedniości) między wierzchołkami tych grafów. Ponadto zawiera on informacje o tym, jakie skojarzenia wierzchołków, np. ze względu na ich wzajemne relacje, nie mogą równocześnie wystąpić w rozwiązaniu zadania poszukiwania niedokładnej odpowiedniości grafów.

Wszystkie możliwe skojarzenia między wierzchołkami grafów G_1 i G_2 zawarte są w zbiorze wierzchołków $V_A = \{v_i\} = V_1 \times V_2$ grafu G_A. Każdy wierzchołek $v_i = (v_a^1, v_b^2)$ tego

grafu reprezentuje zachodzenie relacji odpowiedniości między wierzchołkiem $v_a^1 \in V_1$ i wierzchołkiem $v_b^2 \in V_2$. Brak krawędzi $e_{ij} = (v_i, v_j)$, $e_{ij} \in E_A$, między wierzchołkami $v_i = (v_a^1, v_b^2)$ i $v_j = (v_x^1, v_y^2)$, gdzie $v_i, v_j \in V_A$, $v_a^1, v_x^1 \in V_1$ i $v_b^2, v_y^2 \in V_2$, oznacza, że nie może równocześnie zachodzić odpowiedniość wierzchołków (v_a^1, v_b^2) i (v_x^1, v_y^2).

W pracy przyjęto, że poszukiwana będzie odpowiedniość wierzchołków typu *jeden do jeden*. Konsekwencją tego jest fakt, że krawędź $e_{ij} = (v_i, v_j)$, gdzie $v_i = (v_a^1, v_b^2)$ i $v_j = (v_x^1, v_y^2)$, istnieje wtedy, gdy $v_a^1 \neq v_x^1$ i $v_b^2 \neq v_y^2$.

Graf G_A oprócz informacji strukturalnej zawiera informacje ilościowe potrzebne do wyznaczenia błędu związanego z kolejnymi, dopuszczanymi przez strukturę grafu G_A, rozwiązaniami problemu poszukiwania niedokładnej odpowiedniości grafów G_1 i G_2. Informacje te zawarte są w atrybutach przypisanych wierzchołkom i krawędziom grafu skojarzeniowego. Do każdego wierzchołka $v_i = (v_a^1, v_b^2)$ przypisany jest atrybut Δ_i^V, czyli łączny błąd dopasowania wierzchołków (v_a^1, v_b^2). Z każdą krawędzią $e_{ij} = (v_i, v_j)$, którą łączy wierzchołki $v_i = (v_a^1, v_b^2)$ i $v_j = (v_x^1, v_y^2)$, związany jest błąd dopasowania Δ_{ij}^E, opisujący łączną różnicę w relacjach między parami obszarów reprezentowanych przez pary wierzchołków $\{v_a^1, v_x^1\}$ i $\{v_b^2, v_y^2\}$.

Błąd Δ_i^V przypisany do wierzchołka $v_i = (v_a^1, v_b^2)$ zdefiniowany jest jako

$$\Delta_i^V = \sum_k w_k \left(\delta_i^k\right)^{\omega_k}, \tag{1}$$

gdzie

$$\delta_i^k = \begin{cases} \tilde{\delta}_i^k & \text{dla } \tilde{\delta}_i^k < \delta_{max}^k \\ \infty & \text{dla } \tilde{\delta}_i^k \geq \delta_{max}^k \end{cases} \tag{2}$$

jest wartością oceny różnicy między wartościami cech parametrów opisujących obszary reprezentowane przez poszczególne wierzchołki; parametry te są identyfikowane przez indeks k — indeks ten wskazuje również na pozycję poszczególnych parametrów w wektorze cech wierzchołków v_a^1 i v_b^2. W zależności od rodzaju cechy funkcja $\tilde{\delta}_i^k$ przyjmuje różną

postać. Wartość δ^k_{max} jest minimalną wartością błędu $\tilde{\delta}^k_i$, dla której nie jest możliwe zachodzenie odpowiedniości między wierzchołkami v^1_a i v^2_b, a tym samym zachodzenie odpowiedniości odpowiadających tym wierzchołkom obszarów obrazów O_1 i O_2.

Funkcja δ^k_i może przyjąć wartości z zakresu $\langle 0,\infty)$, natomiast $\tilde{\delta}^k_i$ przyjmuje wartości ze znormalizowanego zakresu $\langle 0,1\rangle$. Im wartości tych funkcji są mniejsze, tym lepiej dopasowane są wierzchołki grafów G_1 i G_2, których odpowiedniość reprezentowana jest przez wierzchołek v_i. Błąd równy nieskończoności oznacza, że wierzchołki v^1_a i v^2_b nie mogą sobie odpowiadać. W takim przypadku wierzchołek v_i nie jest brany pod uwagę przy wykonywaniu dalszych kroków algorytmu.

Jeżeli porównywane są wartości parametrów opisujących powierzchnię (a), obwód (p) lub współczynnik kształtu (a/p) porównywanych obszarów, to

$$\tilde{\delta}^k_i = \frac{\left|{}^k x^1_a - {}^k x^2_b\right|}{{}^k x^1_a + {}^k x^2_b}, \tag{3}$$

gdzie ${}^k x^1_a$, ${}^k x^2_b$ są wartościami tego parametru dla regionów reprezentowanych przez wierzchołki v^1_a i v^2_b; $w_k \geq 0$ jest wartością wagi, natomiast $\upsilon_k > 0$ jest wartością wykładnika. Obie te wartości przypisane są do parametru identyfikowanego przez k. Podany wcześniej zakres wartości w_k i υ_k obowiązuje również w przypadku pozostałych wzorów, w których parametry te występują.

W przypadku gdy porównywane są cechy kolorymetryczne obszarów, wartość $\tilde{\delta}^k_i$ wyznaczana jest według wzoru

$$\tilde{\delta}^k_i = \sqrt[(\upsilon_k)]{|s|^{-1} \cdot \sum_s \left|{}^{k_s} x^1_a - {}^{k_s} x^2_b\right|^{\upsilon_k}}. \tag{4}$$

Zmienna $|s|$ jest długością wektora zastosowanego do opisu barwy obszaru — przykładowo dla przestrzeni RGB $|s| = 3$, dla obrazów monochromatycznych $|s| = 1$; czynnik $|s|^{-1}$ normalizuje zakres uzyskiwanych wyników, indeks s jest numerem elementu (składowej) wektora barwy; składowe wektora barwy przyjmują wartości ${}^{k_s} x^1_a, {}^{k_s} x^2_b \in \langle 0,1\rangle$.

Błąd Δ_{ij}^{E} przypisany do krawędzi $e_{ij}=\left(v_i,v_j\right)$, gdzie $v_i=\left(v_a^1,v_b^2\right)$ i $v_j=\left(v_x^1,v_y^2\right)$, jest zdefiniowany jako

$$\Delta_{ij}^{E}=\sum_k w_k\left(\delta_{ij}^k\right)^{\upsilon_k}. \tag{5}$$

Zmienna δ_{ij}^k jest funkcją, która określa różnice między parą parametrów ${}^k x_{ij}^1$ i ${}^k x_{ij}^2$, będących cechami opisującymi relacje między odpowiednim parami krawędzi w grafach G_1 i G_2. Funkcja δ_{ij}^k, podobnie jak δ_i^k, przyjmuje wartości z zakresu $\langle 0,\infty)$. Wartość tej funkcji jest błędem dopasowania odpowiednich relacji — mała (duża) wartość δ_{ij}^k oznacza występowanie małej (dużej) różnicy między relacjami par wierzchołków połączonych przez krawędź e_{ij}. Błąd równy nieskończoności oznacza, że w rozwiązaniu nie może równocześnie zachodzić odpowiedniość par wierzchołków $\left(v_a^1,v_b^2\right)$ i $\left(v_x^1,v_y^2\right)$, określa to warunek (11).

Jeżeli relacja k reprezentuje odległość między środkami obszarów lub też długość wspólnego obwodu obszarów, to funkcja δ_{ij}^k jest zdefiniowana przez następujące równanie

$$\delta_{ij}^k=\begin{cases}\tilde{\delta}_{ij}^k & \text{dla} \quad \tilde{\delta}_{ij}^k<\delta_{max}^k\\ \infty & \text{dla} \quad \tilde{\delta}_{ij}^k\geq\delta_{max}^k\end{cases}, \tag{6}$$

gdzie δ_{max}^k jest progiem określającym zakres dopuszczalnych wartości funkcji

$$\tilde{\delta}_{ij}^k=\frac{\left|{}^k x_{ij}^1-{}^k x_{ij}^2\right|}{{}^k x_{ij}^1+{}^k x_{ij}^2}. \tag{7}$$

W przypadku gdy relacja k reprezentuje kąt, jaki tworzą linie łączące środki obszarów i poziome granice obrazów, wartość δ_{ij}^k jest zdefiniowana jako

$$\delta_{ij}^k=\begin{cases}\dfrac{\alpha_{ij}}{\alpha_{max}} & \text{dla} \quad \alpha_{ij}<\alpha_{max}\\ \infty & \text{dla} \quad \alpha_{ij}\geq\alpha_{max}\end{cases}, \tag{8}$$

gdzie α_{max} określa zakres dopuszczalnych wartości funkcji

$$\alpha_{ij}=\min\left\{\left|\alpha_{ij}^1-\alpha_{ij}^2\right|,\ 2\pi-\left|\alpha_{ij}^1-\alpha_{ij}^2\right|\right\} \tag{9}$$

będącej oceną różnicy między kątami α_{ij}^1 i α_{ij}^2.

Termin *dopuszczalne wartości funkcji* stosowany przy opisie wartości δ^k_{max} i α_{max} oznacza wartości funkcji (7) i (9) mniejsze niż wartości progowe δ^k_{max} i α_{max}. Dla takiego zakresu wartości błędów możliwe jest zachodzenie, w sensie rozważanej k-tej cechy opisującej relacje, odpowiedniości między właściwymi relacjami. Stosowanie warunków (6) i (8) wraz z odpowiednio dobranymi wartościami δ^k_{max} i α_{max} w połączeniu z opisaną w następnym rozdziale procedurą poszukiwania optymalnej kliki pozwala odrzucić te spośród potencjalnych rozwiązań, w których występuje zbyt duża różnica w relacjach między parami odpowiadających sobie obszarów. Proces ten odbywa się w trakcie poszukiwania rozwiązania przez wykorzystanie struktury G_A, a jego przeprowadzenie redukuje liczbę potencjalnych rozwiązań, jakie należy sprawdzić — wpływa to na skrócenie czasu poszukiwania odpowiedniości. Wpływ wartości δ^k_{ij} na strukturę grafu G_A został uzyskany poprzez usuwanie z G_A krawędzi , dla których $\Delta^E_{ij} = \infty$.

3.2.3. Krok 3 — poszukiwanie kliki i określenie rozwiązania w dziedzinie obrazów

Po utworzeniu grafu G_A realizowana jest procedura poszukiwania optymalnej kliki $c_{q_{opt}}$ w grafie G_A. W tym celu dla każdej kliki $c_q = \left\{v_i, v_j, \ldots, v_{|c_q|}\right\}$ znajdywanej w G_A wyznaczany jest całkowity błąd dopasowania Δ_q. Błąd ten określa, jak dokładnie dopasowane są reprezentowane przez daną klikę obszary należące do obrazów wejściowych. Błąd Δ_q dla kliki c_q definiowany jest przez wyrażenie

$$\Delta_q = \sum_{v_i \in c_q} \left(\Delta^V_i + \sum_{v_j \in c_q,\, j<i} \Delta^E_{ij} \right). \tag{10}$$

Rozwiązanie zadania poszukiwania niedokładnej odpowiedniości grafów, a tym samym również zadania poszukiwania odpowiedniości obszarów obrazów stereo, zakodowane jest w ciągu wierzchołków tworzących klikę optymalną $c_{q_{opt}} = \left\{v_{i_{opt}}, v_{j_{opt}}, \ldots, v_{|c_{q_{opt}}|}\right\}$. Poszukiwanie kliki optymalnej wymaga poszukiwania kliki spełniającej następujący warunek

$$\Delta_{q_{opt}} = \min_{c_q \in Q}\left(\Delta_q\right), \tag{11}$$

gdzie Q jest zbiorem wszystkich największych klik w G_A, dla których $\Delta_q < \infty$.

Otrzymanie rozwiązania w dziedzinie etykiet obszarów wymaga podstawienia za wierzchołki należące do G_A odpowiadających im par wierzchołków należących do G_1 i G_2. Ponieważ zachodzi wynikająca z zasady tworzenia grafów obszarów przylegających wzajemnie jednoznaczna odpowiedniość między numerami wierzchołków grafów G_1 i G_2 a etykietami obszarów obrazów O_1 i O_2, w celu otrzymania rozwiązania zadania poszukiwania odpowiedniości obszarów obrazów stereo wystarczy podstawić za numery wierzchołków grafów odpowiadające im etykiety obszarów obrazów. Całkowity błąd dopasowania $\Delta_{q_{opt}}$ związany z kliką $c_{q_{opt}}$ jest również całkowitym błędem, z jakim została ustalona odpowiedniość między elementami obrazów.

3.3. Algorytm iteracyjny

Opisany w rozdziale 3.2 algorytm jest algorytmem jednokrokowym — odpowiedniość obszarów znajdowana jest bowiem w wyniku jednokrotnego przejścia przez wszystkie kroki algorytmu. Prezentowany algorytm działa jednak stosunkowo wolno. Najbardziej czasochłonną procedurą jest poszukiwanie największych klik w grafie G_A. Ze względu na to, że przeszukiwaniu podlega cały graf, sprawdzane są wszystkie możliwe hipotezy dotyczące odpowiedniości poszczególnych wierzchołków, co skutkuje znacznym wydłużeniem czasu poszukiwania kliki optymalnej.

Metodą na skrócenie czasu niezbędnego na poszukiwanie kliki jest, obok zmniejszenia grafu G_A, jego podział na części, które będą przeglądane osobno. Zmniejszenie grafu jest wynikiem stosowania progów w postaci wartości δ^k_{max} w (2). Podział grafu jest efektem doboru odpowiednich parametrów υ_k, w_k oraz δ^k_{max} w celu wyliczenia ocen δ^k_i i δ^k_{ij}.

Dzięki takiemu rozwiązaniu w pierwszej kolejności poszukiwana jest odpowiedniość wśród najlepiej dopasowanych par wierzchołków grafów G_1 i G_2. Spośród znalezionych w tak ograniczonym grafie G_A największych klik wybierana jest, zgodnie z warunkiem (11), klika optymalna $c_1^{q_{opt}}$. Znalezienie kliki $c_1^{q_{opt}}$ kończy pierwszy krok iteracji.

W każdym kolejnym kroku na podstawie nowego zestawu parametrów $p_n \in P$ do grafu G_A przypisywane są nowe wartości atrybutów. W tak zmodyfikowanym grafie poszukiwana jest nowa klika optymalna $c_n^{q_{opt}}$. Klika optymalna znajdowana w n-tym kroku iteracji musi dodatkowo spełniać następujący warunek

$$c_n^{q_{opt}} \supseteq c_{n-1}^{q_{opt}} \supseteq \ldots \supseteq c_1^{q_{opt}}. \tag{12}$$

Proces iteracyjnego poszukiwania klik zostaje zakończony w dwóch przypadkach, mianowicie gdy: *i*) zostaną wykorzystane wszystkie zestawy parametrów p_n lub gdy *ii*) zostanie znaleziona odpowiedniość wszystkich możliwych wierzchołków grafów G_1 i G_2.

Procedura przeniesienia rozwiązania z dziedziny wierzchołków grafu G_A do dziedziny etykiet obszarów obrazów jest realizowana tak jak w przypadku algorytmu jednokrokowego. Rolę kliki $c_{q_{opt}}$ spełnia klika $c_n^{q_{opt}}$ znaleziona w ostatnim kroku iteracji. Błąd dopasowania obszarów $\Delta_{q_{opt}}$ w metodzie iteracyjnej jest zdefiniowany jako

$$\Delta_{q_{opt}} = \sum_n \Delta_n^{q_{opt}}, \tag{13}$$

gdzie $\Delta_n^{q_{opt}}$ jest wartością błędu z jakim zostały dopasowane wierzchołki w n-tym kroku iteracji.

4. Przykładowe wyniki

Przedstawione w poprzednim rozdziale algorytmy zostały zastosowane do poszukiwania odpowiedniości obszarów symulowanych, jak i rzeczywistych obrazów stereo. Niektóre z uzyskanych wyników pokazane zostały na rys. 2–rys. 4, a informacje dotyczące warunków ich uzyskania zostały przedstawione w niniejszym rozdziale.

Informacjami tymi są przede wszystkim zastosowane wartości parametrów w równaniach (1)–(9), tzn. wartości: wag w_k, wykładników υ_k i progów δ_{max}^k. W opisach występują ponadto następujące oznaczenia: δ_{max}^{cp} — maksymalna dopuszczalna wartość oceny różnicy długości wspólnego obwodu obszarów (7); w_{RGB}, υ_{RGB} oraz δ_{max}^{RGB} są odpowiednio wartością wagi, wykładnika i progu funkcji (4) oceniającej różnice barw obszarów.

Prezentowane w pracy algorytmy zostały zaimplementowane w systemie MATLAB 6.0, natomiast testy zostały przeprowadzone na komputerze klasy IBM PC z procesorem Intel Celeron 633MHz z 128MB pamięci RAM.

Przykład 1

Cel Porównanie wyników poszukiwania *odpowiedniości strukturalnie dokładnej* (OSD; rys. 2*c* i rys. 2*d*) oraz *odpowiedniości strukturalnie niedokładnej* (OSN; rys. 2*e* i rys. 2*f*) obszarów pary obrazów stereo.

Obraz stereo: Symulowany obraz stereo (rys. 2*a* i rys. 2*b*).

Algorytm: Zastosowany został algorytm jednokrokowy.

Parametry: W ocenie dopasowania nie uwzględniano barw obszarów. Wartości progów: $\delta_{max}^{cp} = 1$ — dla OSD, $\delta_{max}^{cp} = \infty$ — dla OSN; niezależnie rodzaju odpowiedniości $\alpha_{max} = 85^{\circ}$, dla pozostałych cech $\delta_{max}^{k} = \infty$. Pozostałe parametry: $w_k = 1$, $\upsilon_k = 0,5$.

Prezentacja wyników: Na rys. 2*c* i rys. 2*d* prezentowany jest wynik poszukiwania odpowiedniości strukturalnie dokładnej; wynik poszukiwania odpowiedniości strukturalnie niedokładnej prezentowany jest na rys. 2*e* i rys. 2*f*.

Czas poszukiwania rozwiązania: OSD — ok. 0,4 s; OSN — ok. 0,6 s.

Przykład 2

Cel: Porównanie czasu i wyników poszukiwania odpowiedniości obszarów algorytmem jednokrokowym (rys. 3*c* i rys. 3*d*) i iteracyjnym (rys. 3*e* i rys. 3*f*).

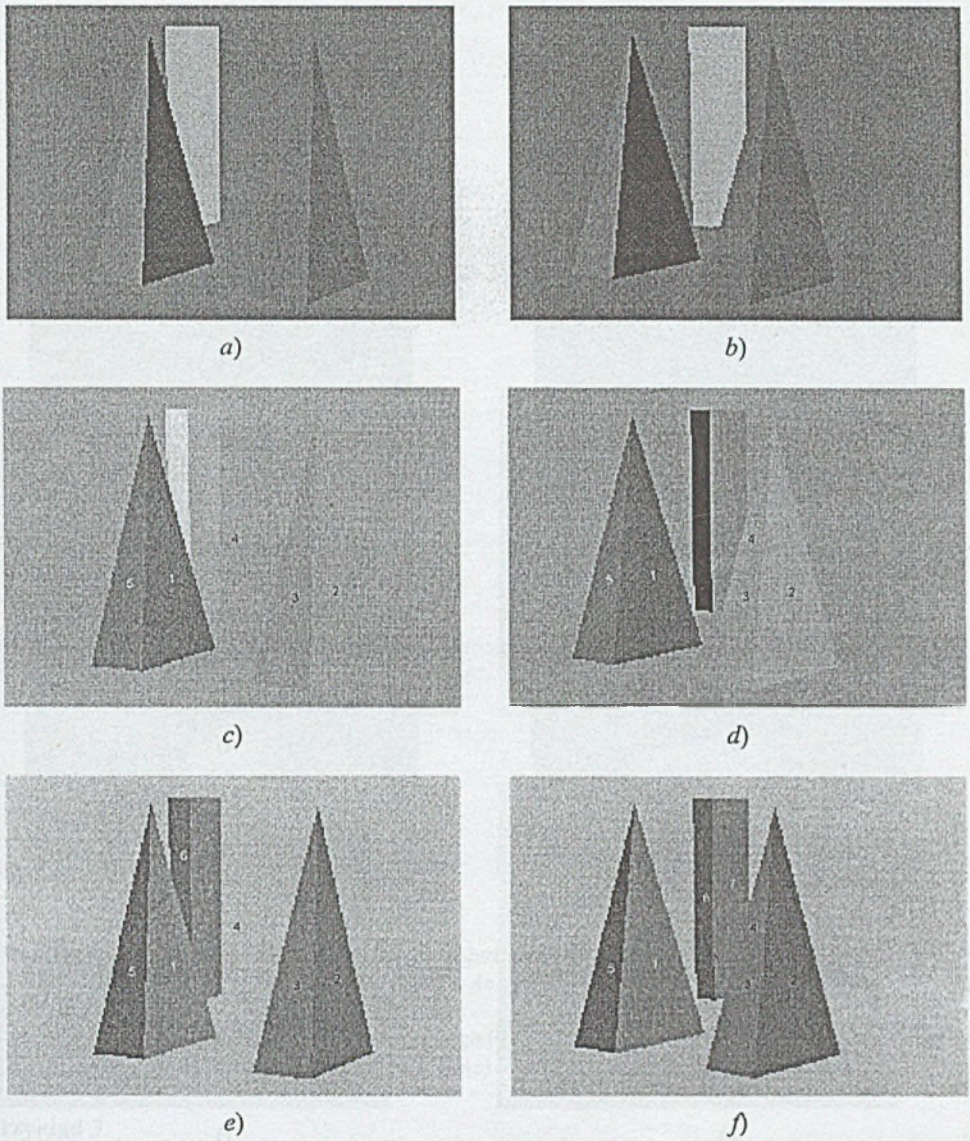
Obraz stereo: Symulowany obraz stereo (rys. 3*a* i rys. 3*b*).

Algorytm: Zastosowany został algorytm jednokrokowy (AJ) i algorytm iteracyjny (AI).

Parametry: W ocenie dopasowania nie uwzględniano barw obszarów. Progi: $\alpha_{max} = 60^{\circ}$ — AJ, $\alpha_{max} = \{15^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}\}$ — AI, pozostałe parametry niezależnie od zastosowanego algorytmu $\delta_{max}^{k} = \infty$, $w_k = 1$ i $\upsilon_k = 0,5$.

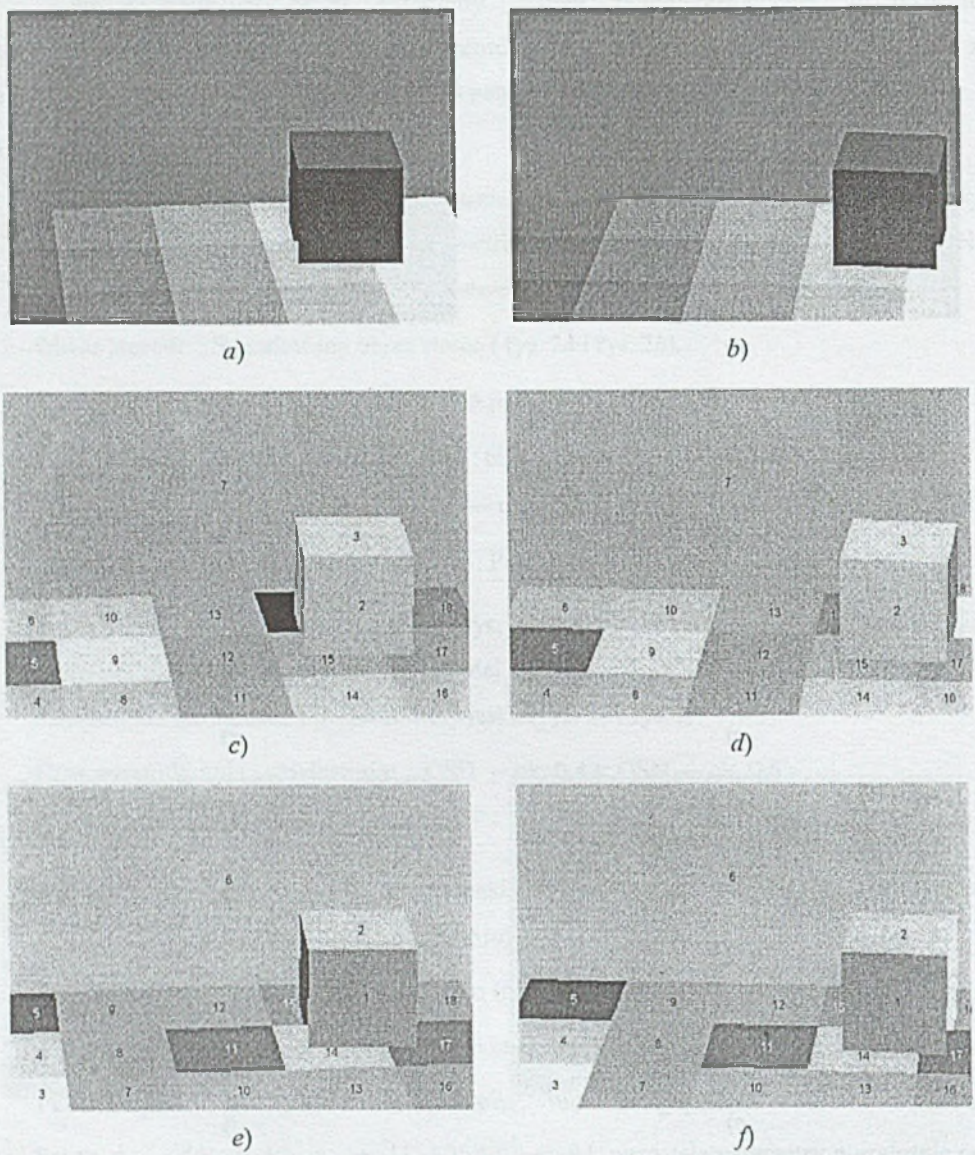
Prezentacja wyników: Wynik zastosowania AJ prezentowany jest na rys. 3*c* i rys. 3*d*, wynik uzyskany dla AI prezentowany jest na rys. 3*e* i rys. 3*f*.

Czas poszukiwania rozwiązania: Algorytm jednokrokowy — ok. 13 550 s (ok. 3 godz. 45 min). Algorytm iteracyjny — ok. 23 s.



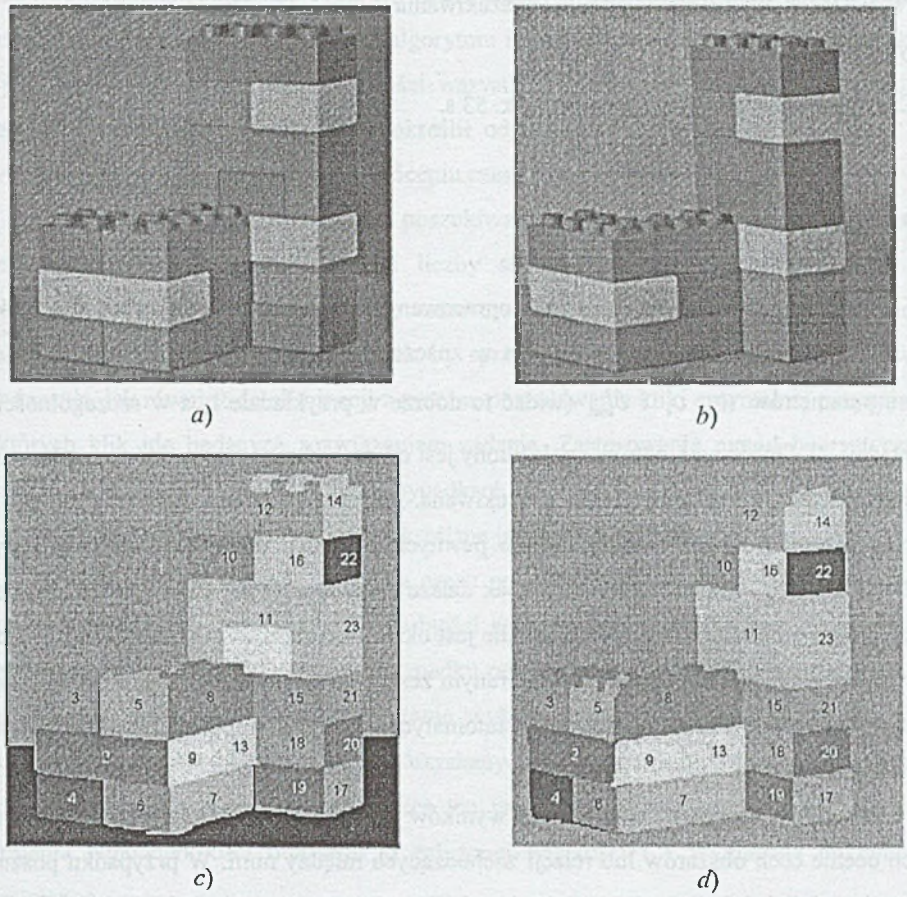
Rys. 2. Porównanie wyników poszukiwania odpowiedniości obszarów obrazów stereo (rys. 2*a* i rys. 2*b*) metodą strukturalnie dokładną (rys. 2*c* i rys. 2*d*) i niedokładną (rys. 2*e* i rys. 2*f*) na przykładzie symulowanego obrazu stereo

Fig. 2. Comparison of simulated stereo image (Fig. 2*a* and Fig. 2*b*) region matching using structural exact (Fig. 2*c* and Fig. 2*d*) and inexact matching (Fig. 2*e* and Fig. 2*f*)



Rys. 3. Porównanie wyników poszukiwania odpowiedniości obszarów symulowanego obrazu stereo (rys. 2*a* i rys. 2*b*) z wykorzystaniem algorytmu jednokrokowego (rys. 2*c* i rys. 2*d*) i iteracyjnego (rys. 2*e* i rys. 2*f*)

Fig. 3. Comparison of simulated stereo image (Fig. 2*a* and Fig. 2*b*) region matching using one-step matching algorithm (Fig. 2*c* and Fig. 2*d*) and iterative matching algorithm (Fig. 2*e* and Fig. 2*f*)



Rys. 4. Przykład poszukiwania odpowiedniości obszarów dla rzeczywistego obrazów stereo rys. 4*a* i rys. 4*b* (źródło INRIA, Francja). Na rys. 4*c* i rys. 4*d* prezentowane są wyniki poszukiwania odpowiedniości

Fig. 4. The example of matching real stereo image Fig. 4*a*) and Fig. 4*b*) (source INRIA, France). The results of matching are presented on Fig. 4*c*) and Fig. 4*d*)

Przykład 3

Cel: Poszukiwanie odpowiedniości obszarów rzeczywistego obrazu stereo.

Obraz stereo: Rzeczywisty obraz stereo; źródło INRIA Francja (rys. 4*a* i rys. 4*b*). Do segmentacji zastosowano nowy algorytm wykorzystujący idee rozrostu obszarów.

Algorytm: Zastosowany został algorytm iteracyjny.

Parametry: Dla wszystkich cech zastosowano $w_k = 1$; $\upsilon_{RGB} = 2$, dla oceny pozostałych cech $\upsilon_k = 0,5$; $\alpha_{max} = \{5°, 30°, 60°\}$, $\delta^{\varphi}_{max} = \{1, 1, \infty\}$, dla innych cech $\delta^{k}_{max} = \infty$.

Prezentacja wyników: Wyniki poszukiwania odpowiedniości prezentowane są na rys. 4*c* i rys. 4*d*.

Czas poszukiwania rozwiązania: ok. 53 s.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone do tej pory testy opracowanych algorytmów wykazują dużą dokładność otrzymywanych rozwiązań. Jest ona w znacznym stopniu zależna od odpowiedniego doboru parametrów w_k, υ_k i δ^k_{max} (widać to dobrze w przykładzie 1, a w szczególności w przykładzie 2). Dobór parametrów uzależniony jest od cech obrazu stereo, którego odpowiedniość elementów jest w danej chwili poszukiwana. Badania, jakie do chwili obecnej zostały przeprowadzone, pozwoliły na określenie pewnych ogólnych prawidłowości dotyczących zasad tego doboru — nieodzowne są jednak dalsze badania zmierzające do dokładniejszego poznania tego problemu. Szczególnie istotne jest określenie zależności między własnościami algorytmów, rodzajem obrazu stereo i dobranym zestawem parametrów. Być może uzyskana tą drogą wiedza pozwoli na opracowanie automatycznego systemu poszukiwania odpowiedniości obszarów.

Inną drogą poprawy uzyskiwanych wyników jest poszukiwanie nowych kryteriów służących ocenie cech obszarów lub relacji zachodzących między nimi. W przypadku poszukiwania odpowiedniości obszarów rzeczywistych obrazów stereo ważną informacją jest barwa obszarów (wyniki badań na ten temat zawierają np. prace [11, 13]) — stąd też planowane jest przeprowadzenie badań dotyczących przydatności różnych przestrzeni barw i różnych miar do oceny różnicy barwy obszarów.

W przypadku algorytmów wykorzystujących grafy do poszukiwania odpowiedniości poważnym problemem jest zwykle długi czas, jaki potrzebny jest na znalezienie rozwiązania. W prezentowanej pracy poprzez zastosowanie odpowiedniej implementacji opracowanych algorytmów oraz zastosowanie idei podziału przestrzeni poszukiwań w algorytmie iteracyjnym możliwe było uzyskiwanie rozwiązań w stosunkowo krótkim czasie.

Przykład 2 pokazuje szczególnie wyraźnie przewagę algorytmu iteracyjnego nad algorytmem jednokrokowym. Opracowanie i implementacja algorytmu iteracyjnego pozwoliły osiągnąć dwa, zwykle trudne do pogodzenia, cele, mianowicie *i*) poprawę dokładności

poszukiwania odpowiedniości przy *ii*) równoczesnym skróceniu czasu potrzebnego do znalezienia rozwiązania. Zastosowanie algorytmu iteracyjnego pozwoliło dla tego przykładu na prawidłowe określenie odpowiedniości wszystkich możliwych par obszarów (algorytm jednokrokowy, niestety, niewłaściwie określił odpowiedniość dwóch par obszarów) przy równoczesnym, ponad 580-krotnym, skróceniu czasu poszukiwania rozwiązania.

W celu dalszego skrócenia czasu poszukiwania odpowiedniości możliwe jest zastosowanie heurystycznych metod redukcji liczby stanów, jakie należy sprawdzić w celu określenia rozwiązania. Takie podejście zastosować można zarówno do określenia heurystycznych zasad doboru parametrów, tak by sprzyjały one skróceniu czasu poszukiwania rozwiązania, jak również do eliminacji z procesu poszukiwania kliki optymalnej przynajmniej niektórych klik nie będących rozwiązaniem zadania. Zastosowanie metod heurystycznych prowadzić może jednak w niektórych przypadkach do znajdowania rozwiązania przybliżonego, a nie rozwiązania dokładnego, jakie określane jest w chwili obecnej.

Inną rozważaną metodą skrócenia czasu poszukiwania odpowiedniości jest poszukiwanie odpowiedniości przy różnej dokładności segmentacji obrazów stereo. Poszukiwanie odpowiedniości zaczyna się w takim przypadku od segmentacji obrazów na duże obszary, a znaleziona dla nich odpowiedniość zostanie wykorzystana w kolejnym kroku iteracji do poszukiwania odpowiedniości obszarów uzyskanych w wyniku mniej zgrubnej segmentacji analizowanej pary obrazów stereo. Proces ten może być powtarzany wielokrotnie aż do określenia odpowiedniości obszarów o założonej wielkości i z wymaganą dokładnością przestrzenną.

Należy zaznaczyć, że zastosowane w prezentowanych algorytmach rozwiązania można, po niewielkich zmianach, wykorzystać również do poszukiwania odpowiedniości innych elementów obrazów takich, jak np. krawędzie lub kontury obszarów. W przypadku takiej adaptacji w pierwszej kolejności modyfikacji muszą zostać poddane kryteria służące ocenie podobieństwa elementów i relacji między nimi. Prezentowane algorytmy mogą zostać również stosowane do innych zadań, w których wykorzystywana jest odpowiedniość elementów, czyli np. w zadaniu poszukiwania wzorca.

Możliwe jest również wykorzystanie zaprezentowanych algorytmów jako pierwszego etapu w algorytmie poszukującym odpowiedniości np. krawędzi lub konturów. W takim przypadku wiedza o odpowiedniości obszarów będzie dodatkową cechą pomocną przy poszukiwaniu odpowiedniości tych elementów obrazów.

LITERATURA

1. Andrade-Cetto J., Kak A. C., Object Recognition in Wiley Encyclopedia of Electrical Engineering, John Wiley & Sons, Sup. 1, 2000, pp. 449–470.

2. Cappelli R., Lumini A., Maio D., Maltoni D., Fingerprint Classification by Diectional Image Partitioning, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 5, 1999, pp. 402–421.

3. Cinque L., Yasuda D., Shapiro L. G., Tanimoto S., Allen B., An Improved Algorithm for Relational Distance Graph Matching, Pattern Recognition, vol. 29, no. 2, 1996, pp. 349–359.

4. Hellwich O., Faig W., Graph–Based Feature Matching Using Descriptive and Relational Parameters, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 60, no. 4, 1994, pp. 443–450.

5. Jain R., Kasturi R., Schunck B. G., Machine Vision, McGraw-Hill International Editions, 1995.

6. Korzan B., Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania, WNT, Warszawa 1978.

7. Lladós J., Combining Graph Matching and Hough Transform for Hand-drawn Graphical Document Analysis. Application to Architctural Drawings, Ph.D. Thesis, Universitat Autňnoma de Barcelona, 1997.

8. Mayeda W., Graph Theory, Wiley & Sons, 1972.

9. Messmer B. T., Efficient Graph Matching Algorithms for Preprocesed Model Graphs, Ph.D. Thesis, University of Bern, 1995.

10. Myers R. O., Genetic Algorithms for Ambiguous Labelling Problems, Ph.D. Thesis, The University of York, 1999.

11. Palus H., Barwne stereowidzenie: przegląd metod i analiza możliwości, Prace IPI PAN, nr 747, Warszawa 1994.

12. Pelillo M., Siddigi K., Zucker S. W., Matching Hierarchical Structures Using Association Graphs, 5th European Conference on Computer Vision, Freiburg, June 1998.

13. Sangwine S. J., Horne R. E. N. (edytorzy), The Colour Image Processing Handbook, Chaman & Hall, 1998.

14. Schalkoff R. J., Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neutral Approaches, Wiley & Sons, 1992.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Marek KURZYŃSKI

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 września 2002 r.

Abstract

In this paper two novel, *one-step* and *iterative*, algorithms for correspondence finding of stereo image regions are presented.

ONE-STEP ALGORITHM. For each of the input images, O_1 and O_2, attributed graph, as follow, G_1 and G_2, is derived. The graphs attributes are used for describing of regions features and relations between regions. Because G_1 and G_2 represent image regions finding correspondence of image region could be done by matching graph vertexes. For inexact graph matching the modified maximum clique finding algorithm is used. The result of the inexact graph matching is an optimal clique $c_{q_{opt}}$, which is searching in an attributed association graph G_A. The attribute Δ_i^V of G_A vertex $v_i = \left(v_a^1, v_b^2\right)$ represent correspondence error between vertexes $v_a^1 \in G_1$ and $v_b^2 \in G_2$. Each edge in G_A between $v_i = \left(v_a^1, v_b^2\right)$ and $v_j = \left(v_x^1, v_y^2\right)$ is attributed by Δ_{ij}^E, which represent relations difference between vertexes $\left\{v_a^1, v_x^1\right\}$ and $\left\{v_b^2, v_y^2\right\}$ in graph G_1 and G_2. The optimal clique $c_{q_{opt}}$ is a maximum clique (clique with largest number of vertexes) with minimum total cost $\Delta_{q_{opt}}$, which is inducted by $v_{i_{opt}} \in c_{q_{opt}}$.

ITERATIVE ALGORITHM. In this algorithm the clique $c_{q_{opt}}$ is being found by iterative usage of one-step algorithm. The clique that is found in kth iteration stage is used as a input clique in $(k+1)^{th}$ stage. The iterative algorithm, in general, is faster and gives better results than one-step algorithm.