

Artur BAL

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI

Metoda poszukiwania strukturalnie niedokładnej odpowiedniości elementów obrazów poprzez poszukiwanie klik optymalnych

Dr inż. Artur BAL

Absolwent Politechniki Śląskiej, rozprawę doktorską obronił w 2005 roku. Jego zainteresowania badawcze obejmują m.in. zagadnienia dotyczące widzenia maszynowego i komputerowego, a zwłaszcza: stereowizji, segmentacji obrazów, wizualnej archiwizacji obiektów, odwzorowania i reprodukcji barw. Prywatnie: miłośnik zabytków techniki, muzyki dawnej, w wolnej chwili fotografuje i zwiedza.



e-mail: Artur.Bal@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono idee nowych, wykorzystujących informacje o strukturze obrazów, metod poszukiwania niedokładnej odpowiedniości elementów obrazów. W prezentowanych metodach poszukiwanie odpowiedniości elementów obrazów sprowadzono do zadania ustalenia niedokładnej odpowiedniości odpowiednio zdefiniowanych grafów. Na potrzeby rozwiązania tego zadania opracowano metodę poszukiwania odpowiedniości grafów przez poszukiwanie klik optymalnych. Jako przykład zastosowania prezentowanych metod przedstawiono ich wykorzystanie w zadaniu poszukiwania stereokorespondencji.

Słowa kluczowe: odpowiedniość elementów obrazów, odpowiedniość grafów, niedokładna odpowiedniość, graf skojarzeniowy, stereokorespondencja.

Method of structural inexact image element matching by optimal clique finding

Abstract

In this paper the ideas of novel methods for finding inexact correspondence of image elements, using structural information, are presented. Task of matching image elements is reduced to the problem of inexact graph matching in accordingly defined graphs. For solving this problem method of finding graph matching by optimal clique finding was developed. As an example of practical usage of the described methods, their application in problem of stereomatching is presented.

Keywords: image elements matching, graph matching, inexact matching, association graph, stereomatching.

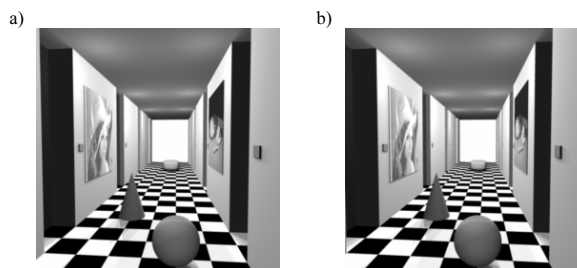
1. Wstęp

Do najważniejszych problemów widzenia maszynowego należy problem poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów [3, 10]. Jego rola wynika z praktycznego znaczenia rzeczywistych zadań, jakie są rozwiązywane poprzez jego rozwiązanie — są to m.in. zadania: klasyfikacji, poszukiwania wzorca, stereokorespondencji, przeszukiwania obrazowych baz danych. Najbardziej ogólnym spośród wymienionych zadań jest zadanie poszukiwania stereokorespondencji. Zadanie to jest również jednym z najtrudniejszych zadań widzenia maszynowego [4].

Na przykładzie rozwiązania tego zadania w pracy zaprezentowana została nowa rodzina metod, które mogą zostać zastosowane do rozwiązania szerokiej klasy zadań wymagających poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów. W metodach tych zadanie poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów zostało sprowadzone do zadania poszukiwania odpowiedniości elementów odpowiednio zdefiniowanych grafów. Do określenia ich odpowiedniości zastosowano nowe podejście będące uogólnieniem metody poszukiwania odpowiedniości grafów przez poszukiwanie największych klik w odpowiednio zdefiniowanym grafie.

2. Zarys problemu stereokorespondencji

Celem poszukiwania *stereokorespondencji* (*stereoodpowiedniości*, ang. *stereomatching*) jest określenie odpowiedniości elementów należących do pary obrazów O_1 i O_2 tworzących tzw. *stereoparę* (rys. 1). Elementy obrazów O_1 i O_2 odpowiadają sobie, jeżeli są rzutem tego samego elementu sceny 3D — tzn. np. punktu, krawędzi, obszaru — na płaszczyzny tych obrazów. Ponieważ obrazy tworzące parę stereo pozyskiwane są z różnych punktów przestrzeni otaczającej analizowaną scenę 3D pomiędzy obrazami O_1 i O_2 zachodzą różnice, które umożliwiają rekonstrukcję części relacji przestrzennych występujących w tej scenie. Aby dokonanie takiej rekonstrukcji było możliwe konieczne jest ustalenie relacji odpowiedniości między elementami obrazów O_1 i O_2 ; przegląd proponowanych w literaturze rozwiązań tego zagadnienia prezentują m.in. prace [2, 5, 7]. Występowanie różnic między obrazami O_1 i O_2 jest niezbędne do odtworzenia relacji przestrzennych zachodzących w analizowanej scenie, równocześnie jednak te same różnice powodują, że ustalenie stereokorespondencji między elementami obrazów O_1 i O_2 jest tak trudnym zadaniem.



Rys. 1. Przykładowa stereopara CORRIDOR — a) obraz lewy, b) obraz prawy
Fig. 1. Example of stereoimage CORRIDOR — a) left image, b) right image

Jedną z konsekwencji akwizycji obrazów z różnych punktów przestrzeni 3D jest to, że ten sam element analizowanej sceny inaczej wygląda na każdym z obrazów O_1 i O_2 . Zróżnicowaniu podlegają jednak nie tylko obrazy poszczególnych elementów sceny — zmianom podlegają również otoczenia tych elementów. Inną konsekwencją takiego sposobu akwizycji obrazów stereo jest występujące z różnym nasileniem na obu obrazach zjawisko wzajemnego, zarówno częściowego jak i pełnego, przesłaniania się poszczególnych elementów sceny 3D. Jakościowym skutkiem różnej realizacji na poszczególnych obrazach pełnego przesłaniania się elementów sceny oraz tego, że w ogólnym przypadku na obu obrazach reprezentowane są częściowo różne fragmenty analizowanej sceny jest brak wiedzy o tym, które elementy jednego obrazu mają swoich odpowiedników w drugim obrazie.

Występowanie wspomnianych powyżej zjawisk powoduje, że rozwiązanie zadania stereokorespondencji w ogólnym przypadku wymaga dużego nakładu obliczeniowego. Stosunkowo często spotykaną metodą jego zmniejszenia jest stosowanie założeń upraszczających [2]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że ich stosowanie nie zawsze jest możliwe. Konieczne jest zatem poszukiwanie metod pozwalających na określenie odpowiedniości elementów obrazów dla jak najbardziej ogólnych przypadków. Prezentowane w niniejszej pracy metody poszukiwania odpowiedniości zostały opracowane zgodnie z takim paradygmatem.

3. Wykorzystanie informacji o strukturze w zadaniu poszukiwania odpowiedniości

Dokładna analiza różnic występujących między obrazami O_1 i O_2 tworzącymi parę stereo pozwala stwierdzić, że zmiany występujące w otoczeniach odpowiadających sobie elementów tych obrazów tylko w stosunkowo niewielkim stopniu wpływają na odpowiednio zdefiniowane struktury tych obrazów. Pod pojęciem *struktura obrazu* rozumiany jest tutaj zbiór wybranych elementów obrazu (np. obszarów) wraz z pewnym zbiorem wybranych relacji zachodzących między nimi. Przeprowadzone obserwacje wykazały również, że zróżnicowanie między obrazami O_1 i O_2 dotyczy raczej pewnych ich cech lokalnych niż globalnych. Powyższe wnioski zostały wykorzystane przy opracowywaniu prezentowanych w pracy metod poszukiwania odpowiedniości na etapie doboru struktur obrazów O_1 i O_2 , na podstawie których prowadzony będzie proces poszukiwania odpowiedniości.

Dogodną reprezentacją struktury obrazu jest graf. Elementy obrazu reprezentowane są zwykle przez wierzchołki grafu a relacje między elementami reprezentują krawędzie grafu, dodatkowo do wierzchołków i krawędzi mogą zostać przypisane odpowiednio zdefiniowane atrybuty. Takie przeformułowanie zadania poszukiwania odpowiedniości z dziedziny obrazów do dziedziny grafów jest stosunkowo częstym podejściem prezentowanym w literaturze [6, 10]. Podstawowym problemem, przy takim podejściu, jest poszukiwanie tzw. (*strukturalnie*) *niedokładnej odpowiedniości grafów* (ang. *structural inexact graph matching*) tj. poszukiwanie odpowiedniości elementów grafów w przypadku, gdy grafy te różnią się swoją strukturą jak i wartościami przypisanymi do nich atrybutów. W przypadku grafów G_1 i G_2 reprezentujących strukturę obrazów O_1 i O_2 tworzących parę stereo takie zróżnicowanie grafów jest konsekwencją zróżnicowania tych obrazów. Do poszukiwania odpowiedniości grafów o różnych strukturach w literaturze proponowane są metody bazujące na idei *edycji grafów* (ang. *graph edit*) [9, 11, 12]. Poszukiwanie odpowiedniości grafów zgodnie z tym podejściem polega na przekształceniu jednego lub obu analizowanych grafów, poprzez operacje zamiany, kasowania i wstawiania zarówno wierzchołków jak i krawędzi, do takiej postaci, aby grafy te były izomorficzne lub izomorficzne były ich podgrafy. Istotnymi wadami poszukiwania odpowiedniości poprzez edycję grafów jest brak dedykowanych (a zatem szybkich) metod rozwiązania tego problemu oraz konieczność znacznej modyfikacji stosowanych algorytmów w zależności od zastosowania.

4. Nowe metody poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów

W wyniku prowadzonych prac opracowane zostały trzy metody poszukiwania odpowiedniości tj. metoda: *jednokrokowa*, *iteracyjna* i *wieloletapowa*. Dla skupienia uwagi w pracy przyjęto, że elementami obrazów, dla których poszukiwana będzie odpowiedniości będą obszary. Proces poszukiwania odpowiedniości wymaga poprzedzenia go segmentacją analizowanej pary obrazów O_1 i O_2 , a jej wynikiem jest para obrazów $O_1 = \{o_i^1\}$ i $O_2 = \{o_j^2\}$, gdzie o_i^1 i o_j^2 są wyróżnionymi obszarami. Ponieważ poszukiwanie odpowiedniości elementów obrazów w proponowanych metodach realizowane jest w dziedzinie grafów kolejnym krokiem jest utworzenie modeli obrazów O_1 i O_2 w postaci pary grafów. W opisywanych metodach są to *grafy atrybutowe* G_1 i G_2 , zawierające informacje o wybranych cechach obszarów o_i^1 i o_j^2 oraz o cechach wybranych relacji zachodzących między parą obszarów (o_k^1, o_l^1) , gdzie $I = \{1, 2\}$ jest numerem obrazu. W odróżnieniu od rozwiązań prezentowanych w literaturze grafy G_1 i G_2 są grafami pełnymi, co wynika z tego, że zawierają one informacje o relacjach zachodzących między wszystkimi, a nie tylko wybra-

nymi parami obszarów obrazów O_1 i O_2 . Konsekwencją tego jest znacznie mniejszy wpływ lokalnych zmian relacji między obszarami na wynik niż to ma miejsce w rozwiązaniach, w których nie uwzględnia się relacji między wszystkimi elementami obrazów.

Punktem wyjścia do opracowania prezentowanych w pracy nowych metod poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów był opracowany przez G. Leviego algorytm poszukiwania odpowiedniości dla pary dowolnych grafów G_α i G_β [8]. Poszukiwanie odpowiedniości grafów zostało w tym algorytmie sprowadzone do poszukiwania *największej klikki* (tj. podgrafu pełnego danego grafu o największej liczbie wierzchołków) w odpowiednio zdefiniowanym grafie skojarzeniowym G_A . Metoda ta jednak nie pozwala na poszukiwanie niedokładnej odpowiedniości grafów.

W *metodzie jednokrokowej* poszukiwanie odpowiedniości grafów na potrzeby zadania poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów realizowane jest poprzez poszukiwanie w atrybutowym grafie skojarzeniowym G_A *klikki optymalnej* q_{opt} — jej znalezienie jest równoznaczne ze znalezieniem rozwiązania zadania poszukiwania odpowiedniości elementów obrazów. Opracowane rozwiązanie pozwala na poszukiwanie niedokładnej odpowiedniości elementów grafów, a tym samym pozwala na poszukiwanie niedokładnej odpowiedniości elementów obrazów. Graf G_A tworzony jest na podstawie grafów G_1 i G_2 , a jego wierzchołki v_i reprezentują parę potencjalnie odpowiadających sobie wierzchołków (v_a^1, v_b^2) tych grafów. Atrybuty Δ_i^V i Δ_{ij}^E przypisane, odpowiednio, do wierzchołków v_i i krawędzi e_{ij} grafu G_A reprezentują różnicę wartości cech przypisanych do odpowiednich wierzchołków i krawędzi grafów G_1 i G_2 . Utworzenie dowolnej klikki $q = \{v_i\}$ w grafie G_A związane jest następującym kosztem

$$\Delta(q) = \sum_{v_i \in q} \Delta_i^V + \sum_{e_{ij} \in q} \Delta_{ij}^E. \quad (1)$$

Wartość $\Delta(q)$ można traktować jako ocenę błędu dopasowania par wierzchołków G_1 i G_2 reprezentowanych przez $v_i \in q$.

Rozwiązanie zadania poszukiwania odpowiedniości, czyli klikki q_{opt} , minimalizuje następujący funkcjonał

$$q_{opt} = \arg \min_{\hat{q} \in \hat{Q}} [\Delta(\hat{q})], \quad (2)$$

gdzie

$$\hat{Q} = \{\hat{q} : \forall_{q \neq \hat{q}} |\hat{q}| > |q| \mid \Delta(\hat{q}) < \infty \wedge \Delta(q) < \infty\}; \quad (3)$$

$|q|$ liczba wierzchołków tworzących daną klikkę; $q, \hat{q} \subset G_A$. Na zakończenie uzyskany wynik poszukiwania odpowiedniości jest przenoszony z dziedziny grafów do dziedziny obrazów.

Rozwinięciem metody jednokrokowej jest *metoda iteracyjna*. W metodzie tej poprzez rekurencyjne powtarzanie procesu poszukiwania odpowiedniości metodą jednokrokową i odpowiedni dobór w każdym kroku parametrów wymaganych przy wyznaczeniu wartości Δ_i^V i Δ_{ij}^E uzyskano efekt propagacji rozwiązania na kolejne obszary. Należy podkreślić, że propagacja rozwiązania w tym przypadku nie jest ograniczona relacjami geometrycznymi występującymi w obrazach. Rozwiązania q_{opt_i} otrzymane dla kolejnych kroków iteracji spełniają następujący warunek

$$\forall_{i \in \{1, \dots, I_{max}-1\}} q_{opt_i} \subseteq q_{opt_{i+1}}, \quad (4)$$

gdzie wartość i określa numer iteracji, a I_{max} liczba iteracji.

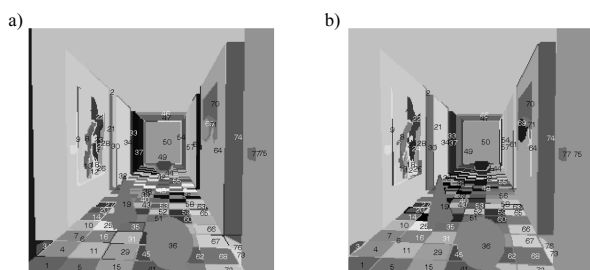
W ostatniej z opracowanych metod, tj. *metodzie wieloletapowej*, wykorzystano możliwość segmentacji obrazów O_1 i O_2 z różną *dokładnością segmentacji* (cecha ta określa zdolność danej realizacji segmentacji do zachowania w obrazach wynikowych infor-

macji o określonej wielkości szczegółach występujących w oryginalnym obrazie). Istotą metody wieloetapowej jest rekurencyjne stosowanie, na kolejnych jej etapach, wiedzy o odpowiedności obszarów na poziomie h do poszukiwania odpowiedności obszarów na poziomie $h+1$ (wzrost h oznacza wzrost dokładności segmentacji, wartość h reprezentuje również numer etapu metody wieloetapowej). Dzięki takiej organizacji procesu poszukiwania odpowiedności nakład obliczeniowy jaki potrzebny jest do poszukiwania odpowiedności na poziomie h (dla $h > 1$) w metodzie wieloetapowej jest znacznie mniejszy niż to ma miejsce w metodzie iteracyjnej. Realizacja takiego podejścia była możliwa dzięki zastosowaniu, opisanego w [1], *iteracyjnej równoległej metody segmentacji*, której wyniki spełniają następujący warunek

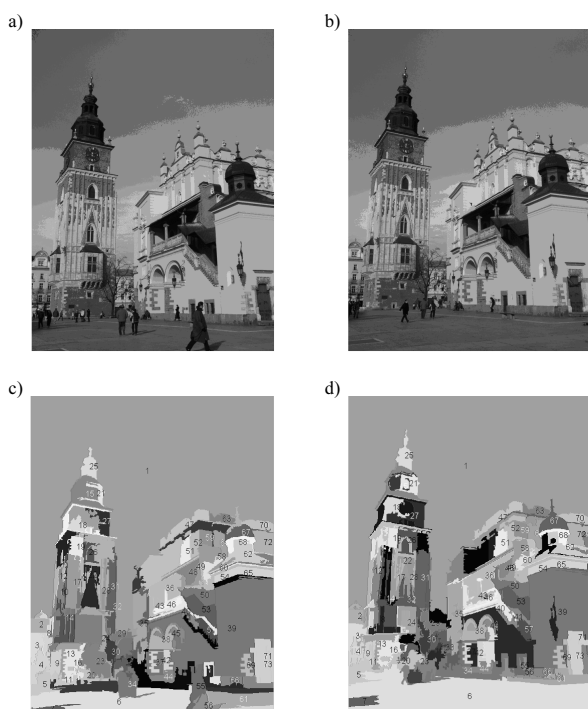
$$\forall_{h \in \{1, \dots, H\}} \forall_{o_i^h \in O_i^h} \exists_{o_j^{h-1} \in O_j^{h-1}} o_i^h \subseteq o_j^{h-1}, \quad (5)$$

gdzie o_i^h obszar należący do obrazu O_i^h będącego wynikiem segmentacji obrazu O_i z poziomem dokładności h ; zapis $o_i^h \subseteq o_j^{h-1}$ oznacza, że wszystkie piksele obrazu O_i , które należą do obszaru o_i^h należą również do obszaru o_j^{h-1} . Do poszukiwania odpowiedności na kolejnych etapach metody wieloetapowej stosowana jest metoda iteracyjna.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono przykładowe wyniki poszukiwania odpowiedności metodą wieloetapową. Obszarom, których odpowiedność została ustalona przydzielony został ten sam numer, a do ich przedstawienia zastosowano ten sam poziom szarości.



Rys. 2. Wynik poszukiwania odpowiedności dla stereopary CORRIDOR
Fig. 2. Result of image matching for stereopair CORRIDOR



Rys. 3. Wynik (c i d) poszukiwania odpowiedności dla obrazu KRAKÓW (a i b)
Fig. 3. Result (c i d) of image matching for image KRAKÓW (a i b)

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują na dużą skuteczność prezentowanych w pracy metod poszukiwania odpowiedności. Istotny wpływ na jakość i czas otrzymywanych wyników ma zastosowanie w opracowanych metodach trzech rozwiązań w postaci: *i*) wykorzystania wiedzy o strukturze obrazów w postaci relacji zachodzących między wszystkimi obszarami obrazu na zasadzie „każdy z każdym”, *ii*) nieograniczonej relacjami geometrycznymi zachodzącymi w obrazie propagacji rozwiązania oraz *iii*) wykorzystania zmiennej dokładności segmentacji obrazów.

Tak jak w innych metodach analizy obrazów, w których wykorzystywana jest segmentacja obrazów, również w przypadku opracowanych metod dokładność uzyskiwanych wyników znacząco zależy od jakości segmentacji obrazów. Stąd też poprawa jakości segmentacji będzie jednym z głównych celów dalszych badań.

Istotną zaletą prezentowanych metod jest możliwość zastosowania w nich szybkich, dedykowanych, algorytmów poszukiwania klik. W wyniku ich zastosowania czas poszukiwania odpowiedności elementów obrazów, w stosunku do stanu aktualnego, ulegnie znacznemu skróceniu przy równoczesnym zachowaniu wysokiej jakości uzyskiwanych rezultatów. Kolejną znaczącą zaletą prezentowanych metod jest łatwość ich dostosowania do aktualnych potrzeb oraz ich uniwersalność pozwalająca na ich bezproblemowe zastosowanie w innych zadaniach wymagających poszukiwania odpowiedności np. w zadaniu: poszukiwania wzorca, klasyfikacji lub przeszukiwania obrazowych baz danych.

Należy również zwrócić uwagę na potencjalne możliwości nowych zastosowań idei poszukiwania odpowiedności grafów jakie wynikają z opracowania uogólnionej, pozwalającej na określenie niedokładnej odpowiedności grafów, metody Leviego. Innym przykładem wykorzystania otrzymanych rezultatów jest możliwość wykorzystania idei poszukiwania odpowiedności w innych zadaniach niż poszukiwanie odpowiedności - przykładem takiego zadania jest problem poszukiwania przydziału w przypadku, gdy relacje zachodzą zarówno między elementami należącymi do przydzielanych do siebie grup jak i wewnątrz samych grup.

Praca finansowana z działalności statutowej RAU1 w roku 2007.

6. Literatura

- [1] Bal A.: Wyznaczanie odpowiedności elementów obrazów z wykorzystaniem informacji o ich strukturze, rozprawa doktorska, Gliwice 2005.
- [2] Cyganek B.: Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
- [3] Duda R. O., Hart P. E.: Pattern classification and scene analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1973.
- [4] Jain R., Kasturi R., Schunk B.: Machine Vision. McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [5] G. A. Jones.: Constraint, optimisation and hierarchy: Reviewing stereoscopic correspondence of complex features. Computer Vision and Image Understanding, 65(1):57–78, 1997.
- [6] Kälviäinen H., Oja E.: Comparisons of Attributed Graph Matching Algorithms for Computer Vision. Research Report 19, Lappeenranta University of Technology, Department of Information Technology, Lappeenranta (Finlandia), 1990.
- [7] Lane R. A., Thacker N. A.: Tutorial: Overview of stereo matching research. Research Report Tina Memo No. 1994-001, University of Manchester, Manchester, 1998.
- [8] Levi G.: A note on the derivation of maximal common subgraphs of two directed or undirected graphs, In Calcolo, volume 9, pages 341–352, 1972.
- [9] Sanfeliu A., Fu K. S.: A distance measure between attributed relational graph. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 13:353–362, 1983.
- [10] Schalkoff R. J.: Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [11] Shapiro L., Haralick R.: Structural description and inexact matching. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 3:504–519, 1981.
- [12] Wang C., Abe K.: Region correspondence by inexact attributed planar graph matching. In Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision (ICCV 95), pages 440–447, Cambridge (Massachusetts, USA), 1995.