

Szczecin, dnia 23/03/2016

dr inż. Paweł Forczmański
Katedra Systemów Multimedialnych
Wydział Informatyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
tel. +48 91 4495546
e-mail: pforczmanski@wi.zut.edu.pl
WWW: <http://pforczmanski.zut.edu.pl>

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: **Paweł Forczmański**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

1998 tytuł magistra inżyniera informatyki, Wydział Techniki Morskiej Politechniki Szczecińskiej (z wyróżnieniem)

2002 stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie informatyka, Wydział Informatyki Politechniki Szczecińskiej; rozprawa pt. „*Badanie korelacyjnych metod obliczania parametrów afinicznych przekształceń obrazu w zastosowaniu do rejestracji i rozpoznawania obrazów lotniczych i satelitarnych*”; promotor prof. dr hab. inż. Georgy Kukharev, Politechnika Szczecińska, recenzenci: prof. dr inż. Jerzy Sołdek, Politechnika Szczecińska; prof. dr hab. inż. Andrzej Stateczny, Akademia Morska w Szczecinie

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

1997 – 1998 asystent-stażysta (student) w Instytucie Informatyki Wydziału Techniki Morskiej Politechniki Szczecińskiej

1998 – 2002 asystent w Instytucie Grafiki Komputerowej i Systemów Multimedialnych, Wydział Techniki Morskiej (obecnie Wydział Informatyki) Politechniki Szczecińskiej (obecnie Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie)

2002 – obecnie adiunkt w Katedrze Systemów Multimedialnych (dawniej Instytut Grafiki Komputerowej i Systemów Multimedialnych), Wydział Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (dawniej Politechnika Szczecińska)

2011 – 2014 adiunkt na Wydziale Transportu Samochodowego Wyższej Szkoły Techniczno-Ekonomicznej w Szczecinie

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.), będącego podstawą złożenia wniosku

A) tytuł osiągnięcia naukowego

Metody reprezentacji danych w podprzestrzeniach liniowych oraz ich zastosowanie w zadaniach przetwarzania i rozpoznawania obrazów cyfrowych

B) osiągnięcie naukowe – jednotematyczny cykl publikacji naukowych

1. **Forcmański Paweł [100%]**, 2016, *Evaluation of Singer's Voice Quality by Means of Visual Pattern Recognition*, Journal of Voice vol. 30 no. 1, ss. 127.e21-127.e30
lista A, 25 pkt MNiSW; IF=1.242 (JCR 2014);
2. **Forcmański Paweł [70%]**, Maleika Wojciech, 2015, *Near-lossless PCA-based Compression of Seabed Surface with Prediction*, Proceedings 12th International Conference on Image Analysis and Recognition ICIAR 2015, Lecture Notes in Computer Science vol. 9164, ss.119-128
konferencja (seria LNCS) indeksowana w bazie Web of Science, 15 pkt MNiSW;
3. **Forcmański Paweł [60%]**, Łabędź Piotr, 2015, *Improving the Recognition of Occluded Faces by Means of Two-dimensional Orthogonal Projection into Local Subspaces*, Image Analysis and Recognition ICIAR 2015, Lecture Notes in Computer Science vol. 9164, ss. 229-238
konferencja (seria LNCS) indeksowana w Web of Science, 15 pkt MNiSW;
4. **Forcmański Paweł [100%]**, 2014, *2DKLT-based color image watermarking*, Proceedings International Conference Image Processing and Communications, Image Processing and Communications Challenges 5, Advances in Intelligent Systems and Computing vol. 233, ss. 107-114
seria IP&C (AISC) indeksowana w Web of Science; rozdział w monografii : 5 pkt MNiSW;
5. **Forcmański Paweł [100%]**, 2013, *Recognition of occluded traffic signs based on two-dimensional linear discriminant analysis*, Archives of Transport System Telematics, vol. 6, iss. 3, September 2013, ss. 10-13
lista B MNiSW; 6 pkt (2013); obecnie 11 pkt;
6. **Forcmański Paweł [33%]**, Kukharev Georgy, Shchegoleva Nadezdha, 2013, *Simple and Robust Facial Portraits Recognition under Variable Lighting Conditions Based on Two-Dimensional Orthogonal Transformations*, 17th International Conference on Image Analysis and Processing ICIAP 2013, Lecture Notes in Computer Science 8156, ss. 602-611
konferencja (seria LNCS) indeksowana w Web of Science, 10 pkt. MNiSW (obecnie 15 pkt.);
7. **Forcmański Paweł [100%]**, 2012, *Comparison of Tensor Unfolding Variants for 2DPCA-Based Color Facial Portraits Recognition*, Proceedings 6th International Conference on Computer Vision and Graphics ICCVG 2012, Lecture Notes in Computer Science vol. 7594, ss. 345-353
konferencja (seria LNCS) indeksowana w Web of Science, 10 pkt. MNiSW (obecnie 15 pkt).
8. **Forcmański Paweł [50%]**, Frejlichowski Dariusz, 2012, *Classification of elementary stamp shapes by means of reduced point distance histogram representation*, Proceedings Machine Learning and Data Mining MLDM 2012, Lecture Notes in Artificial Intelligence vol. 7376 , ss. 603-616
seria LNAI indeksowana w bazie Web of Science; rozdział w monografii : 5 pkt MNiSW;

9. **Forcmański Paweł [33%]**, Kukharev Georgy, Kamenskaya Ekaterina, 2011, *Application of cascading two-dimensional canonical correlation analysis to image matching*, Control and Cybernetics 40 (3), ss. 833-848

artykuł indeksowany w bazie JCR; IF=0,3 (JCR 2010); obecnie lista B, 14 pkt MNiSW

10. Kukharev Georgy, Tujaka Andrzej, **Forcmański Paweł [33%]**, 2011, *Face recognition using two-dimensional CCA and PLS*, International Journal of Biometrics, 3 (4), ss. 300-321

lista B, 8 pkt MNiSW (obecnie 9 pkt);

11. **Forcmański Paweł [50%]**, Kukharev Georgy, 2007, *Comparative analysis of simple facial features extractors*, Journal Of Real-Time Image Processing, vol 1, Iss. 4, ss. 239-255

lista A, 25 pkt MNiSW; artykuł indeksowany w bazie JCR; IF=0.962 (JCR 2010);

12. Kukharev Georgy, **Forcmański Paweł [50%]**, 2007, *Facial images dimensionality reduction and recognition by means of 2DKLT*, Machine Graphics and Vision, 16 (3-4), ss. 401-425

lista B, 9 pkt MNiSW (obecnie 8 pkt);

13. Kukharev Georgy, **Forcmański Paweł [50%]**, 2004, *Data dimensionality reduction for face recognition*, Machine Graphics and Vision 13 (1-2), ss. 99-121

lista B, 9 pkt MNiSW (obecnie 8 pkt);

C) omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

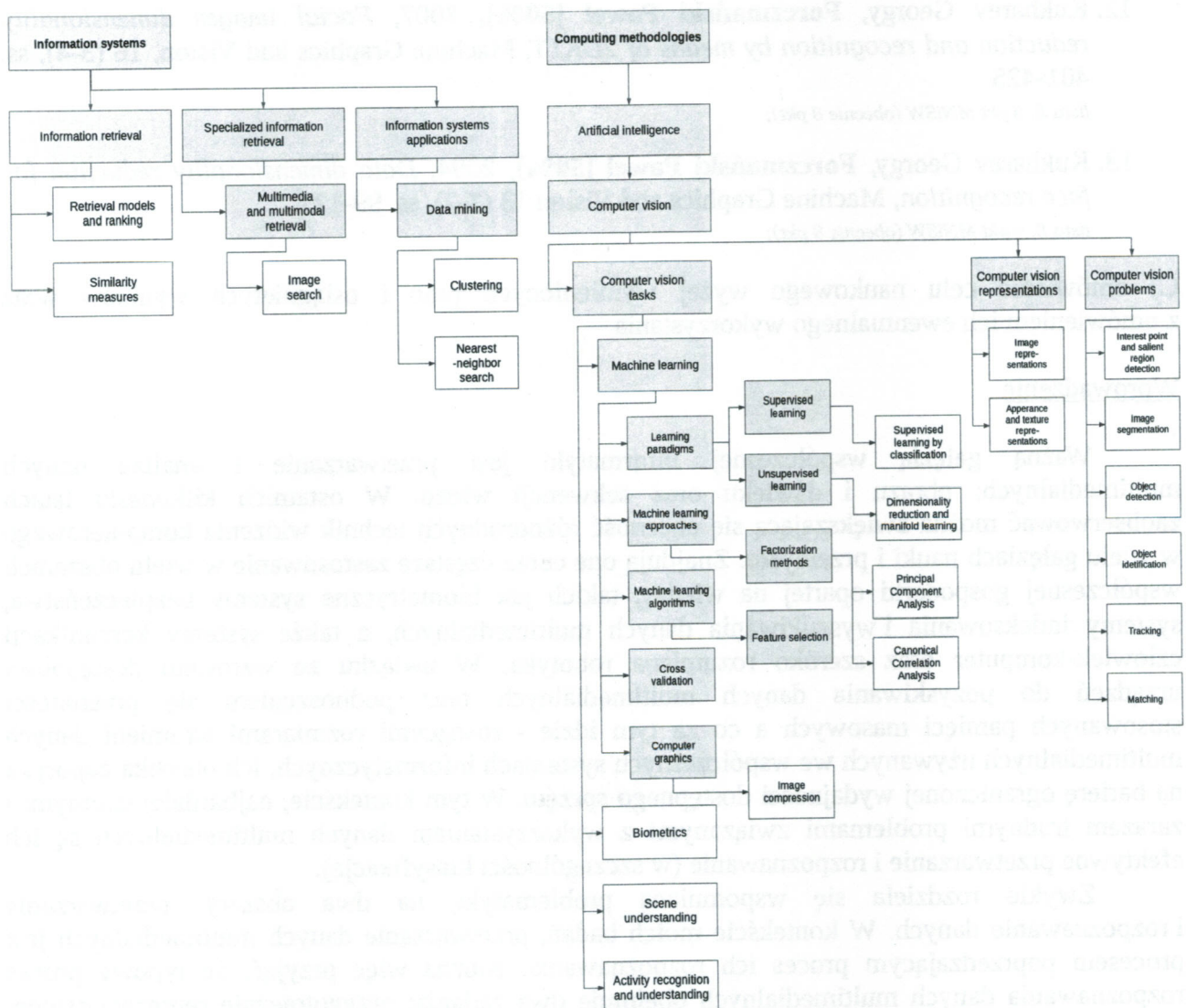
Ważną gałęzią współczesnej informatyki jest przetwarzanie i analiza danych multimedialnych: obrazu i dźwięku oraz sekwencji wideo. W ostatnich kilkunastu latach zaobserwować można zwiększającą się obecność różnorodnych technik widzenia komputerowego w wielu gałęziach nauki i przemysłu. Znajdują one coraz częstsze zastosowanie w wielu obszarach współczesnej gospodarki opartej na wiedzy, takich jak biometryczne systemy bezpieczeństwa, systemy indeksowania i wyszukiwania danych multimedialnych, a także systemy komunikacji człowiek-komputer oraz szeroko rozumiana robotyka. W związku ze wzrostem dostępności urządzeń do pozyskiwania danych multimedialnych oraz podnoszeniem się pojemności stosowanych pamięci masowych a co za tym idzie - rosnącymi rozmiarami strumieni danych multimedialnych używanych we współczesnych systemach informatycznych, ich obróbka napotyka na barierę ograniczonej wydajności dostępnego sprzętu. W tym kontekście, najbardziej istotnymi i zarazem trudnymi problemami związanymi z wykorzystaniem danych multimedialnych są ich efektywne przetwarzanie i rozpoznawanie (w szczególności klasyfikacja).

Zwykle rozdziela się wspomnianą problematykę na dwa obszary: przetwarzanie i rozpoznawanie danych. W kontekście moich badań, przetwarzanie danych multimedialnych jest procesem poprzedzającym proces ich rozpoznawania. Można więc przyjąć, że typowy proces rozpoznawania danych multimedialnych obejmuje dwa zadania: przygotowanie reprezentatywnej bazy danych oraz proces klasyfikacji. Budowa bazy (zbioru uczącego, referencyjnego) jest procesem czasochłonnym i może obejmować stworzenie reprezentacji wszystkich potencjalnych obiektów wzorcowych. W procesie klasyfikacji obiekt podlegający rozpoznawaniu poddawany jest kilkietapowemu przetwarzaniu: ekstrakcji cech prowadzącej do uzyskania obiektywnego opisu, opcjonalnej redukcji wymiarowości zestawu cech dla stworzenia ich kompaktowej reprezentacji oraz końcowej identyfikacji obiektu poprzez przypisanie go do odpowiedniej klasy w zbiorze referencyjnym (bazie danych). Wobec powyższego, duże znaczenie przypisuje się konieczności stosowania bardziej efektywnych modeli obliczeniowych, które cechują się m.in. możliwością redukcji wymiarowości danych. Są to zagadnienia o dużym znaczeniu zarówno teoretycznym, jak i praktycznym, nie tylko w kontekście dynamicznie rozwijających się systemów komputerowych

ale w każdym obszarze, w którym muszą być podejmowane decyzje bez udziału człowieka lub z jego minimalnym uczestnictwem.

Przedstawiony do oceny dorobek stanowi podsumowanie prowadzonych przez mnie badań nad zastosowaniem metod widzenia komputerowego w obszarze rozpoznawania i klasyfikacji obrazów cyfrowych, które dodatkowo reprezentować mogą różnorakie obiekty multimedialne. W zakresie mojego zainteresowania leżą w tym kontekście obrazy statyczne, sekwencje wideo i sygnały akustyczne. Przeprowadzone eksperymenty badawcze wykorzystywały portrety twarzy, odciski pieczęci, wizualizacje powierzchni dna morskiego, cyfrowy zapis głosu śpiewaczego oraz obiekty w monitoringu wizyjnym.

Podejmowana przeze mnie tematyka badawcza mieści się w kilku podobszarach zdefiniowanych w systemie ACM CSS 2012 (Association for Computing Machinery Computing Classification System), przedstawionych na Rys. 1.



Rys. 1 Zakres podejmowanej tematyki badawczej, zgodnie z klasyfikacją ACM.

Obszar moich zainteresowań naukowych, objęty przedstawionym do oceny cyklem publikacji, w dużej ogólności można zdefiniować jako metody projekcji obrazów do podprzestrzeni. Celowo użyty został w tym kontekście obraz, jako obiekt wizualny (macierz obrazu) reprezentujący ww. dane multimedialne. Cele takiej projekcji to przede wszystkim aproksymacja danych przy minimalizacji błędów rekonstrukcji, poprawa klasteryzacji danych w podprzestrzeniach oraz zwiększenie korelacji pomiędzy danymi w podprzestrzeniach cech.

Handwritten signature

W konsekwencji, pozwala to na skuteczniejsze realizowanie zadań przetwarzania i rozpoznawania obrazów (lub innych obiektów multimedialnych). W tym kontekście, można mówić o metodach „niezależnych” od danych, czy też metodach ukierunkowanych na dane „dynamiczne”, które to metody nie dokonują wstępnej analizy danych oraz o metodach „zależnych” od danych - metodach operujących na danych „niedynamicznych”, które to metody wymagają przeprowadzania wstępnej analizy oraz, często, operują na danych strukturyzowanych (uporządkowanych). Do pierwszej grupy zaliczyć należy wszelkiego rodzaju transformacje ortogonalne, np. Dyskretną Transformatę Kosinusową (DCT), Dyskretną Transformatę Fouriera (DFT) i Szybką Transformatę Fouriera (FFT), a także konwersje pomiędzy przestrzeniami opisującymi kolor czy też próbkowanie przestrzeni obrazu (zarówno deterministyczne, jak i stochastyczne). Druga grupa obejmuje transformacje ortogonalne takie jak Analiza Głównych Składowych (PCA) realizowana za pomocą Transformacji Karhunen-Loevego (KLT), Liniowa Analiza Dyskryminacyjna (LDA), Kanoniczna Analiza Korelacyjna (CCA) i Metoda Częstkowych Najmniejszych Kwadratów (PLS).

W mojej działalności naukowej zawsze duży nacisk kładłem na praktyczne aspekty opracowywanych metod. Zaprojektowane algorytmy we wszystkich przypadkach były przeze mnie implementowane (lub byłem współautorem tych implementacji) i sprawdzane na rzeczywistych danych testowych (często na uznanych bazach benchmarkowych), co dawało możliwość obiektywnej oceny ich skuteczności i przydatności. Wiele z opracowanych metod znalazło praktyczne zastosowanie w projektach innowacyjnych realizowanych w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka finansowanego z funduszy UE.

Ewolucja metod liniowej projekcji danych bazujących na PCA/KLT

W swojej pracy jako podstawę moich poszukiwań naukowych przyjąłem klasyczną metodę PCA, opracowaną przez Karla Pearsona (1901)¹ w celu obróbki danych jednowymiarowych. Dalszy, niezależny, rozwój tej metody przypisuje się Haroldowi Hotellingowi (1936)². Pierwsze prace z zakresu rozpoznawania obrazów (portretów twarzy ludzkich) zostały opublikowane w 1987 przez Sirovicha i Kirbiego³ i w 1991 przez Turka i Pentlanda⁴. Podejścia te jednak zakładają przekształcenie dwuwymiarowej macierzy obrazu do jednowymiarowego wektora (zwykle poprzez konkatenację wierszy lub kolumn). Co istotne, w ten sposób można niestety utracić ważną informację wynikającą z dwuwymiarowego rozłożenia pikseli obrazu. Dodatkowo, w powyższych podejściach powstaje problem tzw. Small Sample Size (SSS), gdzie wielkość pojedynczej próbki (długość wektora cech) jest znacząco większa od liczby próbek w pojedynczej klasie, co uniemożliwia efektywną realizację procesu rozpoznawania. Dlatego w swoich badaniach skupiłem się nad opracowaniem algorytmów, które rozwiązują wyżej wymienione problemy.

Po raz pierwszy idea reprezentowania macierzy obrazu jako obiektu dwuwymiarowego (w tym przypadku zestawu jej wierszy i kolumn) została zaprezentowana przez Tsapatsoulisa i in.⁵ w zastosowaniu do rozpoznawania portretów twarzy. Została nazwana VKLT (Vector-based approximation of Karhunen-Loeve Transform). Metoda VKLT rozwiązuje problemy dużych nakładów pamięciowych i osobliwości macierzy kowariancji, które stanowią podstawową wadę klasycznej metody PCA/KLT. Autorzy stwierdzili, że metoda VKLT lepiej radzi sobie w zadaniu rozpoznawaniu portretów twarzy w obecności zmiennego oświetlenia, przesunięcia i zmian ekspresji, w porównaniu do klasycznej już metody Turka i Pentlanda – „Eigenface”. Traktowanie macierzy obrazu jako kolekcji jej wierszy i kolumn prowadzi do uproszczenia obliczeń

1 Pearson K. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. Philosophical Magazine 2 (11), ss. 559-572 (1901)

2 Hotelling H., Relations between two sets of variates. Biometrika 28, ss. 21-377 (1936)

3 Sirovich L., Kirby M., Low-dimensional Procedure for the Characterization of Human Faces, Journal of the Optical Society of America A - Optics, Image Science and Vision, Vol. 4, No. 3, ss. 519-524 (1987)

4 Turk M., Pentland A., Eigenfaces for Recognition, Journal of Cognitive Neuroscience, Vol. 3, No. 1, ss. 71-86 (1991)

5 Tsapatsoulis N., Alexopoulos V., Kollias S., A Vector Based Approximation of KLT and Its Application to Face Recognition. Proc. IX European Signal Processing Conf. EUSIPCO'98, Greece, Vol. III, ss.1581-1584 (1998)

prorowadzonych na stosunkowo dużych objętościowo danych. Dodatkowo, może ona zostać użyta w praktycznie wszystkich metodach bazujących na statystykach drugiego rzędu (tj. wykorzystujących macierze rozrzutu – scatter matrices), np. PCA, LDA, CCA, PLS, pozwalając na unifikację sposobu prowadzenia obliczeń.

Bazując na wspomnianej pracy Tsapatsoulisa i in.⁵, w pracy [13]* oraz częściowo we wcześniejszej pracy⁶, których byłem współautorem (w zespole prof. dr. hab. inż. Georgy Kukhareva), zaproponowana została szczegółowa forma ww. metody, nazwana 2DPCA (w nawiązaniu do terminologii zastosowanej w pracy Yanga i in.⁷), uwzględniająca wymiarowość macierzy obrazów twarzy. W omawianej pracy zaprezentowaliśmy pełen algorytm dwuwymiarowej metody PCA, który uwzględnia strukturę i parametry opisujące zbiory (bazy danych) obrazów twarzy $\{K, L, Q-L, M \times N\}$, gdzie K jest liczbą klas (osób) w systemie, L oznacza liczbę obrazów uczących w każdej z klas, $Q-L$ to liczba obrazów testowych a $M \times N$ to wymiary macierzy obrazu twarzy. W pracy zaprezentowaliśmy zastosowanie opracowanego algorytmu w powiązaniu z jednowymiarową metodą LDA w problemach rozpoznawania zniekształconych portretów twarzy oraz obrazów lotniczych i satelitarnych. Rozwiązanie to nawiązuje do pracy Swetsa i Wenga⁸, w której jednak pierwszy etap przetwarzania wykorzystuje jednowymiarową metodę PCA/KLT. Dodatkowo, w pracy zaprezentowany został oryginalny i czytelny sposób prezentacji obiektów w przestrzeni zredukowanych cech (po etapie PCA i PCA+LDA). W ramach badań opracowane zostało, przy moim aktywnym współudziale, oprogramowanie w środowisku Matlab, które posłużyło do prowadzenia eksperymentów obliczeniowych i wizualizacji wyników.

W pracy Kukhareva i Kuźmińskiego⁹ zaprezentowane zostało jawne rozdzielenie etapu analizy – 2DPCA – od transformacji – 2DKLT. W graficznej formie ukazano efekty działania obu etapów przetwarzania, które prowadzi do redukcji wymiarowości obrazu wejściowego ($M \times N$) do macierzy o wymiarach $p \times p$, gdzie $p \ll \min\{M, N\}$. Opracowana procedura została nazwana 2DPCA/2DKLT i zbadana pod kątem zmian skuteczności rozpoznawania w zależności od liczby klas (K), liczby obrazów w klasie (L), poziomu zaszumienia obrazów oraz ich skali. Wysoka skuteczność została potwierdzona w badaniach na standardowych bazach benchmarkowych. Ponieważ metoda 2DPCA/2DKLT bazuje na macierzach kowariancji obliczanych dla rozwinięcia wierszowego (row) i kolumnowego (column), została nazwana PCArc/KLTrc. Podstawową zaletą tej metody jest w tym kontekście prosta diagonalizacja obu macierzy kowariancji (dla reprezentacji wierszowej i kolumnowej). Implementacja tej metody dostępna jest w pakiecie FaReS-Mod opracowanym na Wydziale Informatyki ZUT. Badania na benchmarkowych bazach obrazów twarzy przeprowadzone z tym pakiecie zostały zaprezentowane również w pracy [13]. Obejmowały one zastosowanie metody PCArc/KLTrc połączonej z jednowymiarową LDA.

Kolejny etap rozwoju ww. metod to algorytm GLRAM (Generalized Low Rank Approximations of Matrices) opisany w pracach Ye i in.^{10,11} bazujący na iteracyjnej metodzie 2DLDA i niewykorzystujący bezpośredniej diagonalizacji całkowitej macierzy rozrzutu (total

* Publikacje oznaczone numerami w nawiasach kwadratowych są zawarte w jednotematycznym cyklu publikacji naukowych przedłożonym do oceny

6 Kukharev G., Forczmański P., Hierarchical Method of Reduction of Features Dimensionality for Image Recognition and Graphical Data Retrieval, Sixth International Conference on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'01), May 15-17, Minsk, Belarus, ss. 57-72 (2001)

7 Yang J., Zhang D., Frangi A. F., Yang J.-Y., Two-dimensional PCA: A new approach to appearance-based face representation and recognition, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(1), ss. 131-137 (2004)

8 Swets D. L., Weng J., Hierarchical Discriminant Analysis for Image Retrieval. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No.5, ss. 386-401 (1999)

9 Kukharev G., Kuźmiński A., Biometric Technology: Face Recognition Methods, Szczecin, Pracownia Poligraficzna WI PS (2003)

10 Ye J., Janardan R., Li Q., Two-Dimensional Linear Discriminant Analysis, Neural Information Processing Systems Foundation NIPS'2004 (2005)

11 Ye J., Generalized. Low Rank Approximations of Matrices, Machine Learning, 61 (1-3), ss. 167-191 (2005)

scatter matrix). Inspirując się nim, we współpracy z prof. Kukharevem¹², został opracowany po raz pierwszy algorytm 2DLDA/2DKLT, który wykorzystuje dwie macierze kowariancji (odpowiednio dla reprezentacji wierszowej i kolumnowej obrazu). Opracowany algorytm, bierze pod uwagę, w sposób bezpośredni, strukturę i cechy bazy danych obrazów twarzy. Zaprezentowana została w nim graficzna interpretacja opracowanej procedury 2DKLT, która dokonuje redukcji wejściowego obrazu w wymiarach $M \times N$ elementów do macierzy o wymiarach $s \times s$, gdzie $s \ll \min\{M, N\}$.

W pracy Jinga i in.¹³ zaprezentowano dwuetapowy algorytm 2DFisherfaces, w którym pierwszy etap przetwarzania obejmuje transformację jednego z wymiarów obrazu za pomocą PCA, natomiast drugi – przekształcenie LDA na drugim z wymiarów obrazu uzyskanego na pierwszym etapie. Niestety, przedstawiony opis nie jest do końca zgodny z koncepcją dwuwymiarowego przetwarzania macierzy obrazu, gdyż na rysunku umieszczonym w pracy, prezentującym metodę 2DFisherface blok, który powinien odpowiadać za metodę 2DPCA opisuje w rzeczywistości metodę LDA. Dodatkowo, drugi etap przetwarzania jest opisany jako 2DLDA lecz formuły matematyczne w pracy definiują procedurę jednowymiarową (LDA) zastosowaną dla wierszy pośredniego obrazu. Dlatego nie można uznać tej pracy jako wypełniającej postulat dwuwymiarowego przetwarzania obrazu.

Nawiązując do ww. osiągnięć, dążąc do spełnienia wspomnianego postulatu, w pracy [12] zaprezentowaliśmy metodę redukcji wymiarowości obrazów twarzy za pomocą 2DKLT w dwóch wariantach – transformacji wykonywanej na danych po analizie 2DPCA lub 2DLDA. Co istotne, proponowane podejście nie wymaga realizowania złożonych procedur wstępnej obróbki obrazu, tj. segmentacji, skalowania, czy też kadrowania. Są to elementy, które odróżniają wspomnianą pracę od prac publikowanych w tamtym czasie. W pracy dokonaliśmy analizy wpływu wybranych metryk minimalnoodległościowych na skuteczność rozpoznawania w zależności od przyjętej wymiarowości przestrzeni cech. Eksperymenty przeprowadzone zostały na benchmarkowych bazach FERET, ORL/AT&T, BioID, Face94 i Face95 w przypadku, gdy w zbiorze uczącym był więcej niż jeden obraz na klasę. Praca powyższa zawiera również numeryczną ocenę złożoności obliczeniowej metody 2DLDA/2DKLT oraz analizę parametrów FAR i FRR w omawianych systemach rozpoznawania portretów twarzy. Przeprowadzone eksperymenty uwzględniły wpływ typowych deformacji, takich jak rozmywanie i zaszumianie, a także autorskich metod symulacji niszczenia zdjęcia i jego przedzierania, na skuteczność rozpoznawania. Uzyskane wyniki były konkurencyjne w stosunku do publikowanych ówczesnie metod (w wielu przypadkach skuteczność rozpoznawania była wyższa niż 98%).

Podsumowując, cechą unikalną przedstawionych metod dwuwymiarowej projekcji jest obliczanie macierzy kowariancji bezpośrednio z macierzy obrazu. Jak pokazano w pracy Nhata i Lee¹⁴, metody tego typu można podzielić na jednostronne aproksymacje niskiego rzędu wykorzystujące macierze kowariancji obliczane dla reprezentacji bądź kolumnowej, bądź wierszowej oraz dwustronne aproksymacje niskiego rzędu wykorzystujące jednocześnie macierze kowariancji dla reprezentacji zarówno wierszowej jak i kolumnowej. Opracowane i przebadane w moich pracach algorytmy zaklasyfikować można jako nieiteracyjne metody dwustronnej aproksymacji niskiego rzędu. Zostały one przyjęte jako podstawa dalszych badań, co zostanie opisane w kolejnych podrozdziałach niniejszego Autoreferatu.

12 Kukharev, G., Forczmański, P., Face Recognition by Means of Two-Dimensional Direct Linear Discriminant Analysis, PRIP'05, Minsk, Republic of Belarus, vol. 2, ss. 63-67 (2005)

13 Jing X-Y., Wong H-S., Zhang D., Face recognition based on 2D Fisherface approach, Pattern Recognition 39, ss. 707 – 710 (2006)

14 Nhat V.D.M., Lee S.Y., Image-based Subspace Analysis for Face Recognition, in Delac, K., Grgic, M. (Eds) Face Recognition, I-Tech, Vienna, Austria, ss. 321-336 (2007)

Moja praca naukowa w dużej mierze poświęcona jest rozpoznawaniu obrazów cyfrowych, ze szczególnym ukierunkowaniem na portrety twarzy i inne obiekty graficzne a także na rozpoznawanie obiektów dźwiękowych reprezentowanych w formie wizualnej. Są to zadania bardzo złożone i jednocześnie bardzo istotne, zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Jak dotąd, kompleksowe rozwiązania w wielu obszarach z tego zakresu nie są dostępne, co sprawia, że warto się nimi zajmować. Tak więc, w dalszej części Autoreferatu zaprezentowane zostaną nowe algorytmy, które rozwiązują postawione problemy w sposób bardziej efektywny niż dotychczas publikowane podobne rozwiązania.

Moje zainteresowania naukowe wyewoluowały z zadania biometrycznej identyfikacji osób na bazie portretów twarzy i dlatego znaczna część mojego dorobku jest poświęcona tej tematyce. Jak wspomniano powyżej, do najpopularniejszych metod wykorzystywanych w zadaniu rozpoznawania portretów twarzy należą DCT, PCA, LDA, CCA i PLS. Ich zastosowanie w tych zagadnieniach było wielokrotnie prezentowane, jednak analiza literatury pokazuje, że opisywane algorytmy są często niepotrzebnie komplikowane przez ich autorów, co jednocześnie nie prowadzi do istotnego zwiększenia skuteczności ich działania. Dodatkowo, wiele prac opisuje jedynie rozpoznawanie obrazów, np. twarzy, w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych lub na danych, które są odpowiednio spreparowane. Dlatego też, w swoich pracach skupiłem się m.in. na opracowywaniu stosunkowo prostych metod, łatwych do zastosowania w praktycznych zadaniach oraz na nietrywialnym problemie rozpoznawania portretów twarzy w trudnych warunkach obrazowania, tzn. w obecności kierunkowego oświetlenia lub przesłonięcia.

Problem doboru relatywnie prostych niskopoziomowych cech i odpowiednich miar podobieństwa w modelach bazujących na wyglądzie (appearance-based) został podjęty przeze mnie w pracy [11]. Eksperymenty przeprowadzone zostały na benchmarkowych bazach, m.in. ORL/AT&T, BioID, FERET. Potwierdziły one, że stosunkowo proste cechy widmowe (bazujące na DCT lub DFT) są bardzo skuteczne w wielu przypadkach a ich wykorzystanie charakteryzuje się niewielką złożonością obliczeniową, co pozwala na implementację w prostych systemach komputerowych, np. urządzeniach bez arytmetyki zmiennoprzecinkowej. Co więcej, połączenie kilku prostych ekstraktorów cech bazujących na zredukowanej przestrzeni cech w sekwencje lub równoległe potoki pozwala na znaczące zwiększenie skuteczności rozpoznawania. Udowadnia to tezę, że proste algorytmy uzyskują skuteczność na poziomie algorytmów skomplikowanych.

Jak wspomniano, rozpoznawanie obrazów uwzględniające trudne i niekontrolowane warunki otoczenia jest dużym wyzwaniem. W przypadku niejednorodnego oświetlenia musimy poradzić sobie z dwoma rodzajami zniekształceń obecnych w obszarze twarzy. Są one związane z obecnością lokalnych i globalnych cieni. Pierwsze z nich zmieniają nie tylko formę indywidualnych elementów twarzy (oczy, usta, nos) ale wpływają na kształt jej obrysu. Z drugiej strony, cienie globalne wpływają negatywnie na twarz jako całość, utrudniając jej wykrycie i poprawną ekstrakcję. Powyższe problemy skutecznie obniżają jakość działania systemów rozpoznawania twarzy (FaReS – Face Recognition System). Jest to jednym z powodów ciągłego zainteresowania tą problematyką naukowców na całym świecie. Literatura pokazuje, że rozwiązanie tego typu problemów może polegać na: a) rozszerzaniu bazy danych FaReS przy pomocy obrazów reprezentujących określone zniekształcenie, b) analizie obrazów w celu znalezienia cech niezmienniczych (odpornych), c) przetwarzaniu obrazów w celu usunięcia zniekształceń, d) transformacji do przestrzeni cech widmowych (np. Eigenfaces, falki, transformacja kosinusowa) wraz z ekstrakcją komponentów niskoczęstotliwościowych.

Trzeba jednak zwrócić uwagę, że w praktyce często nie ma możliwości rozszerzania bazy obrazów, tak więc rozpoznawanie powinno odbywać się na bazie ograniczonego zbioru uczącego. W tym kontekście istotne wydaje się dobranie takich cech niezmienniczych aby maksymalizować skuteczność dyskryminacji. Wprawdzie istnieje wiele metod doboru takich cech, np. LBP czy cechy Gabora¹⁵, jednak ich stosowanie prowadzi do niepotrzebnego zwiększenia stopnia złożoności

15 Zhang T., Fang B., Tang Y.Y., Shang Z., Li D., Lang F., Multiscale facial structure representation for face

algorytmu.

W praktyce bardzo często stosuje się podejścia bazujące na reprezentacji typu „Eigen-”, m.in. PCA, LDA, CCA. Wiele z tych metod wykorzystuje DCT jako etap wstępnej obróbki. Istnieje też wiele stosunkowo złożonych metod, które jednakowoż nie pozwalają na osiągnięcie skuteczności rozpoznawania na poziomie metod operujących na obrazach w dobrej jakości. Wiele z nich stosuje za podstawę PCA i jej warianty, co nie pozwala na szybką aktualizację bazy danych w przypadku dodawania nowych obrazów. Dodatkowo, wiele metod operuje na wektorach będących prostym rozwinięciem macierzy obrazu, co skutkuje praktycznymi problemami związanymi z dekompozycją dużych macierzy kowariancji.

Dlatego też, we wspólnej pracy [6] skupiliśmy się na stosunkowo prostym algorytmie bazującym na dwuwymiarowej dekompozycji obrazu (wykorzystującym 2DPCA lub 2DDCT) jako jedynej transformacji obrazu, połączonej z kilkoma etapami obróbki mającej na celu obiektywną poprawę jakości (transformacja logarymiczna lub korekcja gamma pikseli obrazu). Obliczone cechy obrazu, w zależności od wyniku wstępnej ewaluacji siły zniekształcenia, są łączone i klasyfikowane za pomocą prostego kryterium minimalnoodległościowego. Uzyskana skuteczność jest na poziomie metod state-of-the-art, co zaprezentowano dokładniej w omawianej pracy, przy jednoczesnym znaczącym zmniejszeniu złożoności obliczeń. Ciekawą obserwacją wynikającą z przeprowadzonych badań było to, że użycie transformacji 2DDCT pozwala na uzyskanie lepszej skuteczności rozpoznawania niż w przypadku 2DPCA. Wynika to z faktu, że zbiór uczący był zbyt ograniczony, co nie pozwoliło na skonstruowanie optymalnej bazy przekształcenia 2DKLT. W przypadku DCT tego problemu nie było, ponieważ baza tego przekształcenia aproksymuje bazę 2DKLT stworzoną dla wszystkich możliwych obrazów rzeczywistych.

Kolejnym istotnym problemem w zadaniach rozpoznawania obrazów, w szczególności portretów twarzy, jest niekompletność danych. W praktyce objawiać się to może przesłonięciem znacznej części rozpoznawanego obrazu. W prowadzonych badaniach przyjąłem założenie, że jeśli człowiek jest w stanie rozpoznać ludzką twarz wykorzystując jedynie widoczną jej część (np. tylko oczy lub obrys twarzy, usta itp.) to odpowiedni algorytm komputerowy jest również w dużym stopniu do tego zdolny. W ramach swoich badań zaproponowałem oryginalny algorytm rozpoznawania twarzy bazujący na przekształceniach 2DPCA/2DKLT i 2DLDA/2DKLT przeprowadzanych dla elementarnych obszarów (elementów) twarzy, czyli oczu, nosa i ust. Wyniki swoich badań zaprezentowałem w publikacji [3] (wstępne wyniki zostały opublikowane w pracy ¹⁶). Pokazany w nich został równoległy system czterech lub pięciu (w zależności od wariantu) podsystemów rozpoznawania pracujących niezależnie. Każdy z nich odpowiada za rozpoznawanie wybranego obszaru twarzy i ich „właściciela”. Wyniki klasyfikacji uzyskane w ten sposób są poddawane analizie (przy wykorzystaniu statystyk dla bazy kalibrującej i systemu głosowania) w celu wyłonienia „właściciela” przedstawionej twarzy. Badania pokazały, że skuteczność rozpoznawania nawet w przypadku „trudnych” przypadków jest znacząco wyższa, niż w przypadku podejść holistycznych.

Problematyka rozpoznania twarzy w kontekście obrazów kolorowych nie jest często obecna w literaturze. Większość prezentowanych dotychczas algorytmów zakłada działania na obrazie jednokanałowym (zwykle określonym za pomocą wartości jedynie luminancji). Aby udowodnić tezę, że dodanie informacji o kolorze (chrominancji), lub już sama zmiana przestrzeni barwnej może zwiększyć skuteczność rozpoznawania, przeprowadziłem badania opisane w pracy [7]. W opracowanym autorskim algorytmie, portrety twarzy reprezentowane za pomocą tensorów (struktur trójwymiarowych), były rozwijane do macierzy i transformowane do zredukowanej przestrzeni cech za pomocą dwuwymiarowego przekształcenia 2DPCA/2DKLT. Jako porównanie, przeprowadzone zostały te same eksperymenty przy użyciu klasycznych metod jednowymiarowych. Wyniki eksperymentów pokazały, że odpowiedni dobór metody rozwijania i przestrzeni barwnej

recognition under varying illumination, Pattern Recognition, Vol. 42, Iss. 2, ss. 251-258 (2009)

16 Forczmański P., Łabędź P., Recognition of Occluded Faces Based on Multi-subspace Classification, Computer Information Systems and Industrial Management - 12th IFIP TC8 International Conference, CISIM, Kraków, Poland, September 25-27, LNCS 8104, ss. 148-157 (2013)

może zwiększyć skuteczność rozpoznawania o 30-40% w przypadku proponowanego podejścia. Wariantem, który pozwalał na ww. wzrost było użycie przestrzeni HSV i rozwijanie obrazu do macierzy o rozmiarach $MN \times D$, gdzie M i N to wymiary macierzy obrazu a D to liczba kanałów koloru (w tym przypadku $D=3$). Opracowane podejście charakteryzuje się mniejszą złożonością obliczeniową, niż znany algorytm HOSVD¹⁷, przy zachowaniu wysokiej skuteczności rozpoznawania.

Zadania biometrycznej identyfikacji osób obejmują również dopasowywanie do siebie obrazów pochodzących z różnych źródeł (np. urządzeń lub sposobów obrazowania) lub klas (np. obrazów skojarzonych ze sobą dwóch obcych osób). W pracach [9] i [10] została zbadana możliwość dopasowania takich obrazów (m.in. pochodzących z obrazowania w paśmie widzialnym i termicznym). W tym celu zostały zaprezentowane nowe wersje algorytmów CCA i PLS w wersjach dwuwymiarowych, przez analogię do PCArc/2DPCA nazwane CCARc i PLSrc oraz 2DCCA i 2DPLS. W pierwszym przypadku zastosowano oznaczenie „rc” aby podkreślić dekompozycję na kolekcje wierszy i kolumn, a w drugim, kaskadowy sposób obliczania wyniku transformacji, wykorzystujący jednowymiarowe operacje wykonywane względem wierszy i kolumn obrazu. Opracowane podejścia pozwalają na zwiększenie korelacji między cechami obiektów należących do różnych grup (kolekcji) danych (CCA) lub też zwiększają dyspersję między nimi (PLS). Dlatego też szczególnie nadają się one do kojarzenia ze sobą obrazów należących do tej samej klasy, jednak charakteryzujących się różnymi cechami (np. wynikającymi z różnych technik obrazowania). Dodatkowo, użycie wspomnianych metod pozwala na uniknięcie problemu SSS, wynikającego z niewielkiej liczby obrazów w zbiorze uczącym.

Pomimo istnienia wielu implementacji metod CCA i PLS, nie są one dokładnie opisywane w literaturze, co utrudnia ich zastosowanie dla danych obrazowych i porównanie publikowanych wyników badań. Dlatego też, w pracy [9] zostały pokazane szczegóły implementacji i wyniki eksperymentów na bazach FERET i Equinox (w paśmie termicznym), co symuluje działanie multimodalnego systemu rozpoznawania biometrycznego. Uzyskana skuteczność na poziomie 91%-98% stawia opracowane podejście wysoko w hierarchii podobnych metod. Rozwinięcie i przeniesienie wybranych zasad przetwarzania na metodę PLS zostało zaprezentowane w pracy [10]. Pokazane w niej eksperymenty związane z dopasowywaniem obrazów udowodniły możliwość praktycznego zastosowania w systemach biometrycznych.

W swojej pracy naukowej zajmowałem się również zadaniami rozpoznawania innych klas obrazów za pomocą metod przedstawionych powyżej. Jednym z licznej reprezentowanych kierunków jest detekcja i klasyfikacja odcisków pieczęci na obrazach skanowanych dokumentów papierowych. Papierowe dokumenty stanowią ciągle jeden z podstawowych środków komunikacji, często na poziomie oficjalnym. Każdy z tych dokumentów jest nośnikiem informacji zapisanej w różnych językach, strukturach, szablonach i charakteryzuje się różną wartością. Niezależnie od tych czynników dokumenty zawierają pewne wspólne elementy, takie jak pieczęci, podpisy, tabele, logotypy, bloki tekstu i tło. Aby zapobiec konieczności ich fizycznego gromadzenia i związanym z tym kosztem, ich cyfrowe kopie przechowuje się na komputerowych nośnikach danych. Pozwala to na dużo łatwiejszy i szybszy dostęp, zarządzanie i przesyłanie. Rozwiązanie proponowane w ramach pracy [8] jest próbą odpowiedzi na to zapotrzebowanie. Z uwagi na fakt, iż opracowany algorytm dokonuje segmentacji cyfrowych obrazów odcisków pieczęci na zeskanowanych dokumentach papierowych może on stanowić element innych, dużo bardziej złożonych mechanizmów takich jak optyczne rozpoznawanie znaków OCR. Opracowana metoda wykorzystuje deskryptor Point Distance Histogram¹⁸ rzutowany do zredukowanej przestrzeni cech za pomocą dwuetapowego algorytmu PCA+LDA. Jak wykazano, opracowane podejście pozwala na znaczącą redukcję wymiarowości uzyskanej przestrzeni cech przy jednoczesnym zwiększeniu

17 De Lathauwer L., De Moor B., Vandewalle J., A multilinear Singular Value Decomposition. SIAM 21(4), ss. 1253-1278 (2000)

18 Frejlichowski D., Shape Representation Using Point Distance Histogram, Polish Journal of Environmental Studies, vol. 16, no. 4A, ss. 90 – 93 (2007)



skuteczności rozpoznawania, która średnio wynosi ponad 80%. Moim osobistym wkładem w to osiągnięcie było opracowanie zmodyfikowanych na potrzeby PDH metod redukcji wymiarowości oraz realizacja eksperymentów badawczych. Porównanie z metodami nie wykorzystującymi redukcji wymiarowości (PDH, DCT, PDH/DCT) pokazało słuszność przyjętych założeń. Metody segmentacji interesujących obiektów z obrazów zeskanowanych dokumentów były przeze mnie rozwijane również w innych kierunkach, głównie w obszarze doboru cech niskopoziomowych i klasyfikatorów, co zostało wymienione w osiągnięciach spoza cyklu przedstawionego jako podstawa oceny dorobku.

Zaproponowane metody dwuwymiarowej analizy danych i redukcji ich wymiarowości znalazły również zastosowanie w zadaniu klasyfikacji danych dźwiękowych, tj. próbek głosu śpiewaczego. W pracy [1] przedstawiłem autorski algorytm oceny jakości głosu śpiewaczego wykorzystujący wybrane metody z zakresu przetwarzania i rozpoznawania obrazów cyfrowych. Przyjąłem w nim założenie, że próbka audio z nagraniem ćwiczeniem wokalnym może zostać zamieniona na reprezentację graficzną i przetwarzania dalej tak jak obraz. Podejście takie nie jest często stosowane w dziedzinie analizy audio. Zaprezentowana koncepcja bazuje na generowaniu spektrogramu (Short-Time Fourier Transform) próbki dźwiękowej w formie macierzy prostokątnej, poprawie jej obiektywnej jakości wizualnej na podstawie lokalnej zmiany jasności i kontrastu oraz skalowaniu do stałego rozmiaru. Następnie wykorzystywane jest dwuetapowe podejście: budowa reprezentatywnej bazy danych próbek wzorcowych oraz rozpoznawanie próbek testowych. Na etapie budowy bazy danych wykorzystywana jest dwuwymiarowa liniowa analiza dyskryminacyjna (2DLDA) i uśrednione wzorce po redukcji (jako referencja), natomiast operacja rozpoznawania odbywa się w zredukowanej przestrzeni cech, która uzyskana została w wyniku dwuwymiarowej projekcji Karhunen-Loevego (2DKLT). Klasyfikacja odbywa się za pomocą metody ν -SVC (Support Vector Classification). Eksperymenty przeprowadzone na benchmarkowej bazie danych (próbki pozyskane od Chóru Akademickiego ZUT w Szczecinie) wykazały wysoką skuteczność opracowanego algorytmu, wyższą niż publikowane wcześniej metody (poziom poprawnej klasyfikacji równy 0,935 w stosunku do średniego 0,85 dla innych metod).

Kolejnym zastosowaniem wyżej wymienionych metod jest automatyczne rozpoznawanie znaków drogowych. O ile rozwiązania typu Advanced Driver Assistance System (ADAS), czyli wspierające kierowcę podczas jazdy, są oferowane na rynku od pewnego czasu, to problem rozpoznawania możliwie dużej liczby klas znaków drogowych, szczególnie w trudnych warunkach obserwacji, nie jest rozwiązany. W pracy [5] zaproponowałem algorytm rozpoznawania (klasyfikacji) znaków drogowych w warunkach słabego oświetlenia i przesłonięcia. Przedstawione rozwiązanie bazuje na wstępnej obróbce wyekstrahowanych obiektów graficznych, redukcji wymiarowości i klasyfikacji w zredukowanej przestrzeni cech. Dzięki użyciu metod dwuwymiarowej projekcji (2DLDA/2DKLT) nie ma konieczności redukcji rozmiaru macierzy obrazu, co pozwala na uproszczenie podejścia i uniknięcie niepożądanego pogorszenia ich jakości. Jednocześnie niewielkie rozmiary macierzy kowariancji i macierzy transformacji pozwalają na implementację w stosunkowo prostych systemach osadzonych (embedded systems) stosowanych w samochodach. Opracowana metoda radzi sobie z każdą z ustandaryzowanych klas znaków drogowych, w przeciwieństwie do rozwiązań komercyjnych. W literaturze naukowej problem opisany w powyższej pracy nie jest podnoszony, co utrudnia porównanie. Raportowana w wielu pracach wysoka skuteczność rozpoznawania osiąga 99%, jednak nie dotyczy przypadków silnego przesłaniania lub zaszumiania, co zostało zaprezentowane w ww. pracy. Uzyskana skuteczność poprawnej klasyfikacji jest w tym przypadku na średnim poziomie 75%.

Kompresja i znakowanie wodne obrazów

W obszarze kompresji obrazów realizowanej za pomocą metod projekcji do podprzestrzeni zajmowałem się problemem przetwarzania danych reprezentujących powierzchnię dna morskiego.

Dane takie, z uwagi na swój charakter i zastosowanie, znacząco różnią się od typowych obrazów cyfrowych prezentujących otoczenie człowieka. Z uwagi na wymaganą dużą dokładność rekonstruowanych powierzchni wymagane jest realizowanie kompresji możliwie mało stratnej. W pracy [2], przy współpracy z dr. inż. Wojciechem Maleiką opracowałem metodę prawie-bezstratnej kompresji powierzchni opisujących dno morza. W opracowanym algorytmie powierzchnia poddawana kompresji dzielona jest na nienachodzące na siebie bloki (podobnie jak w przypadku algorytmu JPEG). Każdy z bloków jest kompresowany niezależnie. Dla wszystkich bloków „uczących” dokonuje się analizy na podstawie 2DPCA i oblicza się zestaw „powierzchni własnych” (analogia do „Eigenfaces”). W podejściu „naiwnym” kompresja realizowana jest w sposób iteracyjny. W każdej z iteracji dokonuje się rzutowania do przestrzeni cech wybierając pod-macierz współczynników 2DKLT. Transformacja odwrotna prowadzi do rekonstrukcji bloku. Jakość rekonstrukcji oceniana jest na podstawie maksymalnej różnicy bezwzględnej. Jeżeli błąd jest większy niż dopuszczalny, rekomendowany przez Międzynarodową Organizację Hydrograficzną (IHO), liczba komponentów 2DKLT jest zwiększana i wykonywana jest kolejna iteracja. W przeciwnym przypadku współczynniki dla danego bloku są zapamiętywane. W przeciwieństwie do powyższego, opracowana metoda przyspieszenia polega na predykcji liczby komponentów na podstawie nauczonego klasyfikatora i zestawu bloków uczących. W ten sposób algorytm kompresji nie startuje od maksymalnej liczby komponentów ale od liczby przewidzianej przez klasyfikator i dalsze działanie jest ukierunkowane na korekcję tej liczby (przeszukiwanie w otoczeniu tej liczby).

Podobne podejście, bazujące na dekompozycji obrazu na bloki i transformacji 2DKLT wykorzystane zostało przeze mnie w problemie znakowania wodnego. W pracy [4] przedstawiłem metodę osadzania znaku wodnego w widmie transformaty KLT. Do tego celu wykorzystywany był specjalny wzór (maska) i przekształcenie współczynników KLT. Osadzona informacja jest trwała (odporna w dużym stopniu na typowe ataki steganograficzne) oraz niewidoczna (obrazy były oceniane pod względem utraty jakości za pomocą typowych miar obiektywnych). Eksperymenty przeprowadzone na typowych obrazach cyfrowych, przy użyciu autorskiego oprogramowania potwierdziły zasadność przyjętych rozwiązań. Dodatkowo, osadzona informacja nie była wykrywana przez standardowe oprogramowanie do steganalizy – Stegedetect v0.4. Dodatkowe badania, związane z budową wirtualnego laboratorium steganograficznego, zostały opisane w dalszej części niniejszego opracowania, w kontekście moich innych osiągnięć naukowych.

Podsumowanie

W swojej pracy naukowej skupiłem się na badaniach nad metodami projekcji obrazów do podprzestrzeni. Podprzestrzeń rozumiana jest w tym ujęciu jako zredukowana reprezentacja danych wejściowych, często o znacząco mniejszej wymiarowości. Jak pokazałem, stosowane metody dwuwymiarowej projekcji działają na macierzach (głównie na obrazach, choć tylko w związku z ich wizualizacją), które reprezentują szeroką grupę obiektów multimedialnych. W swoich pracach postawiłem sobie za cel przede wszystkim skuteczną aproksymację danych przy minimalizacji błędów rekonstrukcji, poprawę klasteryzacji danych w podprzestrzeniach oraz zwiększenie korelacji pomiędzy danymi w podprzestrzeniach cech. Cele te zostały osiągnięte, co w konsekwencji, pozwoliło na skuteczniejsze realizowanie zadań przetwarzania i rozpoznawania obrazów (lub innych obiektów multimedialnych).

Za najważniejsze osiągnięte wyniki przedstawione w publikacjach zaliczonych do jednotematycznego cyklu uznaję:

- 1. Propozycje oryginalnych metod i algorytmów o niewielkiej złożoności, które służą do rozpoznawania portretów twarzy w trudnych warunkach obrazowania i dla mieszanych technik obrazowania, wykorzystujących ekstrakcję cech bazującą na DCT, PCA/2DPCA, LDA/2DLDA, CCA/2DCCA, PLS/2DPLS oraz projekcję (KLT/2DKLT)**



i klasyfikację w zredukowanej przestrzeni cech, ze szczególnym uwzględnieniem problemu SSS (Small Sample Size);

2. Opracowanie autorskich algorytmów detekcji, ekstrakcji i klasyfikacji odcisków pieczęci na skanowanych dokumentach oraz znaków drogowych w sekwencjach drogowych na bazie metod przetwarzania obrazów i projekcji KLT/2DKLT;
3. Zaproponowanie oryginalnej metody klasyfikacji próbek audio reprezentujących ćwiczenie wokalne w celu oceny stopnia wyszkolenia śpiewaka na bazie analizy zredukowanej metodą 2DLDA macierzowej reprezentacji widma i klasyfikacji SVC;
4. Opracowanie nowatorskiego algorytmu prawie-bezstratnej kompresji obrazów dna morskiego wykorzystującego metodę 2DKLT oraz predykcję liczby użytych współczynników widma transformaty;
5. Opracowanie oryginalnej metody niewidocznego i odpornego znakowania wodnego kolorowych obrazów cyfrowych na bazie 2DKLT.

Zagadnienia związane z przetwarzaniem i rozpoznawaniem obrazów wykorzystujące metody projekcji do podprzestrzeni były również przeze mnie poruszane w innych publikacjach o nieco mniejszym zasięgu. Dotyczyły one m.in. badań porównawczych nad benchmarkowymi bazami danych portretów twarzy w związku z zastosowaniem ich do testowania skuteczności metod bazujących na PCA.

Resumując, osiągnięte wyniki stwarzają szerokie możliwości dalszego rozwoju systemów widzenia maszynowego w zakresie ujętym powyżej. Ważny jest w tym wypadku aspekt praktyczny, który przewija się w większości moich prac.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Poza zagadnieniami związanymi z metodami reprezentacji obrazów w podprzestrzeniach, moje zainteresowania naukowe obejmują szeroko rozumianą tematykę widzenia komputerowego, między innymi, ekstrakcji i porównywania cech obiektów graficznych, przetwarzania obrazów statycznych oraz strumieni video.

Detekcja i klasyfikacja obiektów graficznych na skanowanych dokumentach papierowych

Do najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych spoza jednotematycznego cyklu publikacji zaliczam opracowanie oraz badanie autorskich metod detekcji i klasyfikacji obiektów graficznych spotykanych na cyfrowych wersjach dokumentów papierowych. Badania rozpocząłem od problemu detekcji odcisków pieczęci i w tym obszarze uzyskałem interesujące wyniki



naukowe¹⁹. W licznych publikacjach^{20, 21, 22, 23, 24} przedstawiłem metodę segmentacji kolorystycznej odcisków pieczęci, niezależną od ich kształtu i charakteru a także opracowałem zestaw heurystyk wspomagających ich ekstrakcję i wstępną klasyfikację. W swoich pracach skupiłem się również na opracowaniu zestawu cech dyskryminujących pieczęci pod kątem ich kształtu. Przeprowadzone eksperymenty pokazały słuszność przyjętych założeń. Skuteczność została potwierdzona w eksperymentach na bazie danych zawierającej faktyczne skany rzeczywistych dokumentów.

W kolejnej publikacji²⁵, napisanej wspólnie z moim dyplomantem, uogólniłem opracowaną metodę na większą liczbę klas obiektów graficznych występujących na skanowanych wersjach dokumentów papierowych (tj. pieczęci, logotypy, podpisy, obszary tekstu i tabele). Autorski zbiór treningowy pozwolił na opracowanie uniwersalnej metody detekcji i weryfikacji obiektów na bazie techniki AdaBoost i zestawu klasyfikatorów. Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące. Skuteczność segmentacji wybranych elementów graficznych na cyfrowanych dokumentach osiąga 60%-95% w zależności od klasy i jakości zbioru uczącego. Jest to jedna z niewielu prac naukowych poświęconych jednoczesnej detekcji tak dużej liczby klas obiektów graficznych. Wynika to z przyjętej przeze mnie koncepcji unifikacji podejść do detekcji każdej z omawianych klas obiektów w przeciwieństwie do indywidualnej detekcji każdej z klas prezentowanej w literaturze.

Wykrywanie, klasyfikacja i śledzenie obiektów w strumieniach wideo

Istotne wyniki naukowe i praktyczne osiągnąłem w obszarze przetwarzania strumieni video, głównie w zakresie detekcji obiektów ruchomych (segmentacja statycznego tła) oraz wyszukiwania i śledzenia obiektów zainteresowania (tj. postaci ludzkich i pojazdów). Jest to tematyka bardzo ważna z praktycznego punktu widzenia, często powiązana z bezpieczeństwem publicznym. Byłem członkiem zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w ramach POIG, których celem było opracowanie prototypowych systemów inteligentnego monitoringu wizyjnego (SmartMonitor, SmartMonitor4Public). Moim zadaniem było opracowanie algorytmów realizujących ww. zadania oraz przeprowadzenie wstępnych eksperymentów numerycznych. Wykorzystywane metody obejmowały zaadaptowane nowoczesne podejścia z tej dziedziny, m.in. klasyfikatory bazujące na cechach niskopoziomowych (pseudofalki Haara, HoG) i kaskadach klasyfikatorów (AdaBoost). Opracowałem algorytmy detekcji postaci ludzkich, śledzenia ich ruchu i analizy wybranych typów zachowań (np. porzucenie bagażu, dewastacja w przestrzeni publicznej, upadek, napad) a także śledzenia i analizy trajektorii ruchu pojazdów. W ramach ww. prac powstały rozwiązania, które zostały opisane w znaczących czasopismach z listy JCR^{26, 27} oraz zaprezentowane

- 19 Forcmański P., Stamp detection in scanned documents, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio AI Informatica, vol.XI. no. 2, ss. 59-65 (2010)
- 20 Forcmański P., Frejlichowski D., Robust Stamps Detection and Classification by Means of General Shape Analysis, 5th International Conference on Computer Vision and Graphics, ICCVG 2010, LNCS 6374, ss. 360-367 (2010)
- 21 Frejlichowski D., Forcmański P., General Shape Analysis Applied to Stamps Retrieval from Scanned Documents Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications, LNCS 6304, ss. 251-260 (2010)
- 22 Forcmański P., Frejlichowski D., Efficient Stamps Classification by Means of Point Distance Histogram and Discrete Cosine Transform, Computer Recognition Systems 4, AISC 95, ss. 327-336 (2011)
- 23 Forcmański P., Frejlichowski D., Principal Component Analysis of Point Distance Histogram for Recognition of Stamp Silhouettes, Image Processing and Communications Challenges 3, Advances in Intelligent and Soft Computing, Vol. 102, ss. 219-226 (2011)
- 24 Forcmański P., Markiewicz A., Low-Level image features for stamps detection and classification, Proceedings Of The 8th International Conference On Computer Recognition Systems CORES 2013, Advances in Intelligent Systems and Computing, 226, ss. 383-392 (2013)
- 25 Markiewicz A., Forcmański P., Detection and Classification of Interesting Parts in Scanned Documents by Means of AdaBoost Classification and Low-Level Features Verification, 16th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 2015, Valetta, Malta, LNCS 9257, ss. 529-540 (2015)
- 26 Frejlichowski D., Gościńska K., Forcmański P., Hofman R., Application of foreground object patterns analysis for event detection in an innovative video surveillance system, Pattern Analysis and Applications, vol. 18, iss. 3, ss. 473-484 (2015)
- 27 Frejlichowski D., Gościńska K., Forcmański P., Hofman R., "SmartMonitor"-An Intelligent Security System for the Protection of Individuals and Small Properties with the Possibility of Home Automation, Sensors Vol. 14 Iss. 6

podczas międzynarodowych dziedzinowych konferencji naukowych (ICIAR²⁸, ICCVG²⁹, CORES³⁰, CISIM³¹, IDEAL³²).

Adaptacyjna kompresja obrazów statycznych

Kolejnym kierunkiem naukowych dociekań eksplorowanym przeze mnie jest stratna lub prawie-bezstratna kompresja obrazu wykorzystująca różne formy adaptacji. W innej pracy³³ przedstawiłem opracowany z dr. hab. inż. Radosławem Mantiukiem algorytm adaptacyjnej kompresji obrazów naturalnych uwzględniający obiektywne miary jakości. Celem naukowym było opracowanie takiej metody doboru parametrów kompresji JPEG, aby w niewielkiej liczbie iteracji można było dojść do suboptymalnego punktu, który gwarantował kompromis pomiędzy jakością obrazu a jego wielkością (w ujęciu miejsca zajmowanego na dysku lub w pamięci). Takie rozwiązanie pozwoli internetowym serwisom fotograficznym na zaoszczędzenie przestrzeni dyskowej przy jednoczesnym zachowaniu możliwie najwyższej jakości archiwizowanych zdjęć. W pracach dokonałem powiązania parametrów kompresji JPEG z miarami jakości takimi jak PSNR, UIQ i SSIM oraz opracowałem model liniowej predykcji utraty jakości wraz ze wzrostem stopnia kompresji obrazu. Zastosowanie praktyczne opracowanego modelu (sprawdzonego na danych benchmarkowych) jest bardzo szerokie.

Innym osiągnięciem w tym obszarze było opracowanie przy współpracy z dr. inż. Wojciechem Maleiką adaptacyjnej metody kompresji obrazów reprezentujących profil dna morskiego wykorzystującej DCT, proste cechy statystyczne i wybrane klasyfikatory. Przetworzona we wspólnych pracach^{34, 35} metoda pozwala na uzyskanie wysokiej kompresji modelu dna morskiego przy jednoczesnym zachowaniu norm związanych z bezpieczeństwem żeglugi, narzucanych przez Międzynarodową Organizację Hydrograficzną IHO. Moim osobistym wkładem było opracowanie koncepcji kompresji oraz algorytmu predykcji liczby współczynników DCT na etapie transformacji bloków.

Metody wyszukiwania obrazów na podstawie zawartości (CBIR)

Ostatnim z przedstawionych kierunków moich badań jest szeroko rozumiana tematyka wyszukiwania obrazów na podstawie przykładów (ang. Content-based Image Retrieval). W swoich pracach skupiałem się nad modyfikacją znanych i opracowywaniem nowych deskryptorów koloru,

ss. 9922-9948 (2014)

- 28 Frejlichowski D., Gościewska K., Nowosielski A., Forczmański P., Hofman R., Detecting Parked Vehicles in Static Images Using Simple Spectral Features in the 'SM4Public' System, 12th International Conference on Image Analysis and Recognition ICIAR 2015, Niagara Falls, Kanada, LNCS 9164, ss. 489-498 (2015)
- 29 Frejlichowski D., Gościewska K., Forczmański P., Hofman R., Human Detection for a Video Surveillance Applied in the 'SmartMonitor' System, Computer Vision and Graphics, LNCS 8671, ss. 220-227 (2014)
- 30 Frejlichowski D., Gościewska K., Forczmański P., Nowosielski A., Hofman R., Extraction of the foreground regions by means of the adaptive background modelling based on various colour components for a visual surveillance system, Advances in Intelligent Systems and Computing, 226, ss. 351-360 (2013)
- 31 Frejlichowski D., Gościewska K., Forczmański P., Nowosielski A., Hofman R., The Removal of False Detections from Foreground Regions Extracted Using Adaptive Background Modelling for a Visual Surveillance System. Computer Information Systems and Industrial Management, LNCS 8104, ss. 253-264 (2013)
- 32 Frejlichowski D., Gościewska K., Nowosielski A., Forczmański P., Hofman R., Application of Cascades of Classifiers in the Vehicle Detection Scenario for the 'SM4Public' System. The 16th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning (IDEAL), LNCS 9375, ss. 207-215 (2015)
- 33 Forczmański P., Mantiuk R., Adaptive and Quality-Aware Storage of JPEG Files in the Web Environment, 7th International Conference on Computer Vision and Graphics, ICCVG 2014, LNCS 8671, ss. 212-219 (2014)
- 34 Forczmański P., Maleika W., Predicting the Number of DCT Coefficients in the Process of Seabed Data Compression, 16th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 2015, Valetta, Malta, LNCS 9256, ss. 77-87 (2015)
- 35 Maleika W., Forczmański P., Kompresja danych opisujących powierzchnię dna wykorzystująca KLT. VIII Międzynarodowa Konferencja Morska "Aspekty bezpieczeństwa nawodnego i podwodnego oraz lotów nad morzem", Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia (2005)

tekstury i kształtu oraz ich kombinacji^{36, 37, 38}, które pozwalają na skuteczne działanie algorytmów CBIR w wybranych zastosowaniach. Istotnym rozwiązaniem z tej dziedziny było opracowanie przy współpracy z dyplomantem zunifikowanego deskryptora obrazów statycznych działającego w dziedzinie skompresowanej (DCT, DWT) dla plików JPEG i JPEG2000^{39, 40}. Opracowany deskryptor bazuje na obserwacji, że określone współczynniki widma DCT i współczynniki DWT można grupować i porównywać w celu określenia podobieństwa obrazów bez konieczności pełnej dekompresji.

Dużą część moich badań z tego obszaru była poświęcona opracowaniu rozwiązań praktycznych w projekcie ukierunkowanym na budowę systemu rekomendacji dla przemysłu odzieżowego, realizowanym w ramach POIG. W ramach prac opracowałem zintegrowany deskryptor koloru i tekstury zastosowany do niskopoziomowego opisu części garderoby wyekstrahowanych z obrazów przedstawiających sylwetki ludzkie. Przeprowadziłem badania skuteczności na danych pozyskanych z serwisów społecznościowych. Wyniki zostały opublikowane m.in. podczas konferencji ICCVG^{41, 42}, IP&C⁴³ i CORES⁴⁴, w seriach Springer: Lecture Notes in Computer Science i Advances in Intelligent Systems and Computing.

W ramach badania zgodności wyników działania algorytmów CBIR z percepcją człowieka opracowany został system internetowy, który pozwala na zbieranie i porównywanie dużej liczby wyników eksperymentów percepcyjnych⁴⁵. Opracowany system został wykorzystany do porównania skuteczności działania opisanego powyżej deskryptora JPEG/JPEG2000 i potwierdził jego wysoką zgodność z oczekiwaniami użytkowników.

Aspekt sprzętowej implementacji wybranych algorytmów

Większość moich prac badawczych i implementacji ma ścisły związek z rozwiązaniami programowymi w uniwersalnych językach wysokiego poziomu (C, C++, Matlab), jednak w ostatnim czasie zauważalny jest duży nacisk na tworzenie implementacji sprzętowych opracowywanych algorytmów. W związku z tym prowadziłem badania teoretyczne i praktyczne,

- 36 Forcmański P., Frejlichowski D., Strategies of Shape and Color Fusions for Content Based Image Retrieval Computer Recognition Systems 2: Advances in Soft Computing, Volume 45, ss. 3-10 (2007)
- 37 Forcmański P., Frejlichowski D., Current challenges in content based image retrieval by means of low-level feature combining, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio AI Informatica, vol. XI no. 2, ss. 49-57 (2010)
- 38 Forcmański P., Improving Shape Retrieval and Classification Rates through Low-Dimensional Features Fusion, Image Processing & Communications Challenges 6, Advances in Intelligent Systems and Computing, ss. 37-44 (2015)
- 39 Forcmański P., Unified JPEG and JPEG-2000 color descriptor for content-based image retrieval, Metody Informatyki Stosowanej, nr 4, ss. 53-62 (2008)
- 40 Forcmański P., Bania A., Content-Based Image Retrieval in Compressed Domain, 15th International Multi-Conference on Advanced Computer Systems, Polish Journal of Environmental Studies, vol. 7, no. 4c, ss. 428-432 (2008)
- 41 Forcmański P., Czapiewski P., Frejlichowski D., Okarma K., Hofman R., Comparing clothing styles by means of computer vision methods, 7th International Conference on Computer Vision and Graphics, ICCVG 2014, LNCS 8671, ss. 203-211 (2014)
- 42 Okarma K., Frejlichowski D., Czapiewski P., Forcmański P., Hofman R., Similarity Estimation of Textile Materials Based on Image Quality Assessment Methods, 7th International Conference on Computer Vision and Graphics, ICCVG 2014, LNCS 8671, ss. 478-485 (2014)
- 43 Czapiewski P., Forcmański P., Frejlichowski D., Hofman R. Clustering-Based Retrieval of Similar Outfits Based on Clothes Visual Characteristics, Proceedings 6th International Conference Image Processing and Communications IP&C 2014, Image Processing & Communications Challenges 6, Advances in Intelligent Systems and Computing vol. 313, ss. 29-36 (2015)
- 44 Czapiewski P., Forcmański P., Okarma K., Frejlichowski D., Hofman R., Clothing Similarity Estimation Using Dominant Color Descriptor and SSIM Index, Proceedings of the 9th International Conference on Computer Recognition Systems CORES 2015, Advances in Intelligent Systems and Computing 403 (2015)
- 45 Forcmański P., Wojcieszak S., Web system for perceptive evaluation of CBIR algorithms, Information systems architecture and technology: advances in Web-Age Information Systems, eds. Leszek Borzemski [i in.], Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ss. 113-122 (2009)



które zostały ujęte w projekcie badawczym finansowanym przez NCN⁴⁶, którego byłem kierownikiem. Przy współpracy z dr. inż. Piotrem Dziurzańskim i dr. inż. Tomaszem Mąką z Zakładu Układów Cyfrowych i Telekomunikacji Katedry Architektury Komputerów i Telekomunikacji WI ZUT opracowałem kilka implementacji sprzętowych wcześniejszych własnych algorytmów ukierunkowanych na zadania typu CBIR. W pracach^{47, 48, 49} przedstawiliśmy realizacje sprzętowe typu multi-core System-on-Chip i Network-on-Chip. Przeprowadzone eksperymenty wykazały wyjątkową zasadność stosowania przedstawionych rozwiązań w zadaniach związanych z przetwarzaniem, klasyfikacją i rozpoznawaniem obiektów multimedialnych.

Pozostałe osiągnięcia naukowe

W ramach pozostałych, mniej licznie reprezentowanych w publikacjach, prac badawczych opracowałem m.in.:

- metodę scramblingu obrazów powiązaną z kompresją na bazie 2DKLT⁵⁰;
- wirtualne laboratorium steganograficzne dla obrazów cyfrowych (przy współpracy z dyplomantem)^{51, 52};
- metodę i oprogramowanie do automatycznej oceny poprawności biometrycznych zdjęć twarzy^{53, 54}.

Moje publikacje naukowe w czasopismach oraz rozdziałach w monografiach o szerokim zasięgu zostały zauważone przez środowisko międzynarodowe, czego wyrazem są liczne cytowania moich prac przez zagranicznych autorów, a także wykonane recenzje publikacji zgłaszanych do międzynarodowych czasopism oraz członkostwo w komitetach naukowych wielu uznanych konferencji. Za swoje osiągnięcia naukowe byłem kilkakrotnie nagradzany przez JM Rektora ZUT. Moi studenci i dyplomanci byli laureatami ogólnopolskich konkursów na najlepsze prace dyplomowe, natomiast sam otrzymałem też nagrodę „Best Paper” na międzynarodowej konferencji naukowej CISIM 2013.

Poza działalnością naukową prowadzę też aktywną działalność dydaktyczną, starając się angażować w pracę naukową studentów. Efektem tego jest promotorstwo ponad 70 prac inżynierskich i magisterskich, kilkanaście wspólnych publikacji naukowych (w materiałach konferencyjnych, czasopismach krajowych i zagranicznych). Prowadziłem także liczne wykłady promujące informatykę i badania z obszaru widzenia komputerowego wśród młodzieży szkół średnich.

46 Projekt badawczy finansowany z MNiSW/ NCN- - budżet 323 tys. zł –umowa nr 4755/B/T02/2011/40, do wniosku nr N N516 475540, pt. „Klasyfikacja danych multimedialnych wykorzystująca sprzętowe wspomaganie obliczeń” okres 04.2011 – 04.2014

47 Dziurzański P., Mąka T., Forczmański P., Hardware acceleration of data classifiers for multimedia processing tasks, *Pomiary, Automatyka, Kontrola* Vol. 60, nr 6, ss. 382-384 (2014)

48 Forczmański P., Dziurzański P., Mąka T., System-Level Implementation of the Algorithms Used in Content-Based Multimedia Retrieval, *Advanced Approaches to Intelligent Information and Database Systems, Studies in Computational Intelligence* 551, ss. 325-334 (2014)

49 Forczmański P., Dziurzański P., System-level hardware implementation of simplified Low-Level color image descriptor, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 226, *Proceedings of The 8th International Conference On Computer Recognition Systems CORES 2013*, ss. 461-468 (2013)

50 Forczmański P., 2DKLT-Based image compression and scrambling, *Congress of Young IT Scientists, Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 16, no. 4, ss. 86-89 (2007)

51 Forczmański P., Węgrzyn M., Virtual Steganographic Laboratory for Digital Images, *Information systems architecture and technology*, Wrocław, ss. 163- 173 (2008)

52 Forczmański P., Węgrzyn M., Open Virtual Steganographic Laboratory, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, nr 50(11), ss. 60-65 (2009)

53 Forczmański P., Web System for Biometric Verification of Facial Portraits, *IEEE 6th International Conference Perspective Technologies and Methods in Mems Design, MEMSTECH'2010*, Polyana, Ukraina, ss. 151-157 (2010)

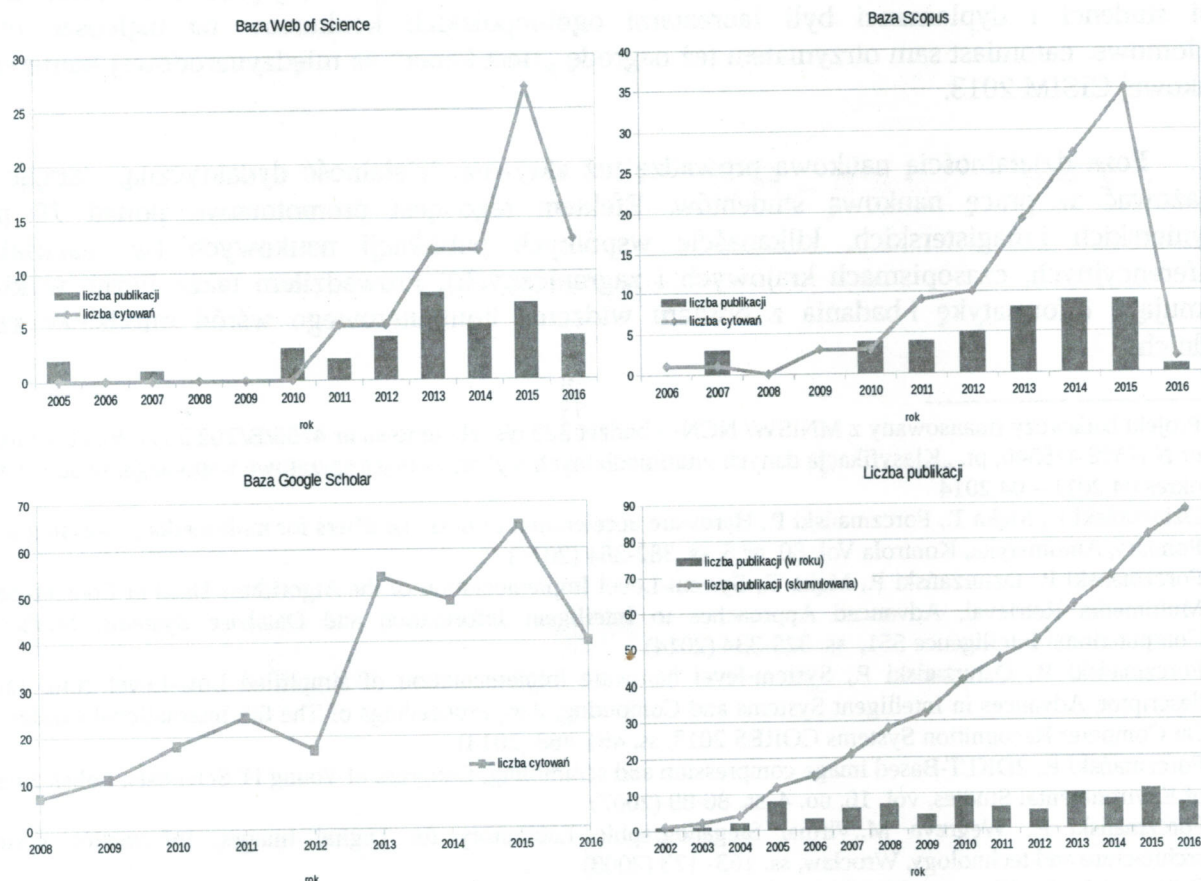
54 Forczmański P., Zołotuchin P., Automatic verification of facial images for the purpose of biometric passports, *Information systems architecture and technology*, Wrocław, ss. 251-261 (2008)

Niezależnie od działalności naukowej i dydaktycznej jestem aktywny na polu działań organizacyjnych. Wyraża się to organizowaniem i prowadzeniem studiów podyplomowych, aktywnym udziałem w kreowaniu nowych treści programowych na studiach informatycznych oraz zaangażowaniem w nawiązywanie współpracy naukowo-badawczej z podmiotami zewnętrznymi. Od wielu lat pełnię funkcję kierownika Katedry Systemów Multimedialnych (wcześniej również dyrektora Instytutu Grafiki Komputerowej i Systemów Multimedialnych) na Wydziale Informatyki ZUT (wcześniej Politechniki Szczecińskiej). Zasiadam od kilku kadencji w Radzie Wydziału Informatyki ZUT jako przedstawiciel pozostałych nauczycieli akademickich. Jestem w niej przewodniczącym Komisji Skrutacyjnej.

Łącznie po obronie pracy doktorskiej opublikowałem **88 prac** (w tym **59** z listy czasopism punktowanych MNiSW, z czego **36** w wydawnictwach indeksowanych w bazie Web of Science, w tym **7** w czasopiśmie z bazy JCR). Dynamikę zmian wskaźników bibliometrycznych (liczba publikacji i liczba cytowań, dla baz Web of Science, Scopus i Google Scholar) zaprezentowałem na Rys. 2. Dodatkowo, na ostatnim z wykresów, przedstawiłem dynamikę przyrostu liczby publikacji po uzyskaniu stopnia doktora.

Indeks Hirscha, wyznaczany dla publikacji indeksowanych w bazie WoS (cytowanych **74** razy z czego **18** - bez autocytowań) wynosi 5.

Sumaryczny Impact Factor wyznaczony dla moich prac (zgodnie z wykazem dorobku) wynosi aktualnie **6,399**



Rys. 2. Zmiany wskaźników bibliometrycznych

For

Peter Terenin