

# Autoreferat

## 1. Dane personalne

Imię i nazwisko: Tomasz Hachaj  
Data i miejsce urodzenia: 15 marca 1982 roku, Kraków

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

Stopień: **Doktor Nauk Technicznych w dyscyplinie Informatyka**  
Jednostka: Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie,  
Rok: 2010  
Tytuł rozprawy: Techniki rozpoznawania obrazów w zadaniach interpretacji znaczeniowej zmian perfuzji krwi tkanki mózgowej

Tytuł: **Magister inżynier Informatyk, specjalność Systemy Teleinformatyczne**  
Jednostka: Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki  
Rok: 2006  
Tytuł pracy: Zastosowanie nieeuklidesowych funkcji odległości w sieciach neuronowych

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

### 3.1 W jednostkach naukowych

12.02.2007 – obecnie – **Uniwersytet Pedagogicznym im. Komisji Edukacji Narodowej** (do listopada 2008 roku Akademia Pedagogiczna), **Instytut Informatyki** (do kwietnia 2016 roku Katedra Informatyki i Metod Komputerowych), **wydział Matematyczno – Fizyczno – Techniczny** na stanowisku **asystenta** a od 2010 roku na stanowisku **adiunkta**. Od 1 kwietnia 2016 zastępca Dyrektora Instytutu Informatyki

### 3.2 W innych przedsiębiorstwach

1.09.2004 – 28.02.2006 - praca w firmie **Korelacja sp. z.o.o.** na stanowisku programisty.  
1.04.2006 – 24.02.2007 – praca w firmie **R-Data sp. z.o.o** (do 12.09.06 R-Data Piotr Rams) na stanowisku programisty.

### 3.3 W grantach

2010-2012 – Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, główny wykonawca grantu p.t. „Kognitywne techniki analizy i interpretacji znaczeniowej map perfuzji mózgowia”, kierownik profesor Marek R. Ogiela, N N516 511939.

2016-2018 - Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej, kierownik projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Sonata p.t. „Opracowanie nowych metod uczenia maszynowego na potrzeby rozpoznawania oraz oceny aktywności ruchowej człowieka” 2015/17/D/ST6/04051

## 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.)

### 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

**Metody inteligencji obliczeniowej w analizie zobrażeń medycznych, aktywności ruchowych i dużych zbiorów danych**

### 4.2 Wyszczególnione pozycje osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji składa się z dwunastu prac naukowych w tym rozdziałów jednej monografii, siedmiu prac w żurnalach znajdujących się na liście Journal Citation Reports, rozdziału w pracy zbiorowej oraz czterech prac konferencyjnych. Na poniższej liście w nawiasie podany został procentowy udział współautorów w prowadzonych badaniach.

#### Monografia

1. Marek R. Ogiela, Tomasz Hachaj, **Natural User Interfaces in Medical Image Analysis**, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2015, ISBN 978-3-319-07799-4 (MO 25%, TH 75%); do oceny przedstawiono rozdział 1 - paragraf "Median Filtering" i "Fast Implementation of Median Filtering" wraz z rysunkiem 1.12 oraz paragraf 1.4 zawierający implementacje, Rozdział 3 - od paragrafu 3.2 do końca rozdziału 3, rozdział 4 oraz rozdział 5

#### Publikacje JCR

2. Tomasz Hachaj, Danuta Baraniewicz, **Knowledge Bricks - educational immersive reality environment**, International Journal of Information Management, 35 (2015), pp. 396-406, DOI information: 10.1016/j.ijinfomgt.2015.01.006 (MNIŚW: 35p, impact factor 1.55) (TH 85%, DB 15%)

3. Tomasz Hachaja, Marek R. Ogiela, **Full body movements recognition – unsupervised learning approach with heuristic R-GDL method**, Digital Signal Processing, Volume 46, November 2015, Pages 239–252, doi:10.1016/j.dsp.2015.07.004 (MNiSW: 30, impact factor: 1.256) (TH 80%, MO 20%)
4. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, Katarzyna Koptyra, **Application of Assistive Computer Vision Methods to Oyama Karate Techniques Recognition**, Symmetry 2015, 7(4), pp. 1670-1698; doi:10.3390/sym7041670 (MNiSW: 30p, impact factor 0.826) (TH 70%, MO 15%, KK 15%)
5. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, **The adaptation of GDL motion recognition system to sport and rehabilitation techniques analysis**, Journal of Medical Systems, Vol. 40, Issue 6, June 2016, article:137, DOI: 10.1007/s10916-016-0493-6 (MNiSW: 25, impact factor: 2.213) (TH 80%, MO 20%)
6. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, **Human actions recognition on multimedia hardware using angle-based and coordinate-based features and multivariate continuous hidden Markov model classifier**, Multimedia Tools and Applications, First online: 05 September 2015, DOI: 10.1007/s11042-015-2928-3, (MNiSW: 30, IF: 1.346) (w druku, dostęp online) (TH 80%, MO 20%)
7. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, **Clustering of trending topics in microblogging posts: a graph – based approach**, Future Generation Computer Systems, Available online 28 April 2016, doi:10.1016/j.future.2016.04.009 (MNiSW: 40, impact factor: 2.786) (praca w druku, dostęp online) (TH 80%, MO 20%)

#### Rozdział w pracy zbiorowej

8. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, **Application of Neural Network for Human Actions Recognition**, Computational Intelligence and Intelligent Systems, Vol. 575, CCIS - Communications in Computer and Information Science, Vol. 575, pp 183-191, 2016, DOI: 10.1007/978-981-10-0356-1\_18 (TH 75%, MO 25%)

#### Prace konferencyjne

9. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, Katarzyna Koptyra, **Human actions modelling and recognition in low-dimensional feature space**, BWCCA 2015, 10th International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications, November 4-6, 2015, Krakow, Poland, pp. 247-254, DOI 10.1109/BWCCA.2015.15 (TH 70%, MO 15%, KK 15%)
10. Tomasz Hachaj, Paweł S. Hachaj, Marek R. Ogiela, **A novel approach to geocaching event prognosis using spatiotemporal data**, 2016 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, 978-1-5090-2461-2/16, pp. 31-34, 2016 IEEE, DOI 10.1109/WAINA.2016.30 (TH 70%, PH 15%, MO 15%)
11. Tomasz Hachaj, **Creating dynamically changing world map for computer games with advanced image processing – a use case**, 8-th International Conference on Intelligent

Networking and Collaborative Systems INCoS-2016, 7-9 września 2016, Ostrava, Republika Czeska, DOI 10.1109/INCoS.2016.27, pp. 155-160, 2016

12. Tomasz Hachaj, **How to solve common human actions recognition use cases with Gesture Description Language**, 8-th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems INCoS-2016, 7-9 września 2016, Ostrava, Republika Czeska, DOI 10.1109/INCoS.2016.26, pp. 263-269, 2016

### **4.3 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Podstawowym celem naukowym prac habilitanta było zaproponowanie nowych metod z obszaru inteligencji obliczeniowej na potrzeby rozwiązywania istotnych problemów z zakresu znaczeniowej analizy obrazów medycznych, rozpoznawania aktywności ruchowych człowieka oraz analizy dużych zbiorów danych, jak również adaptacja metod już istniejących. Nowe algorytmy zaproponowane przez dr Hachaja mają uniwersalny charakter i znajdują zastosowanie również w innych zadaniach, znacząco różniących się od tych, do których zostały pierwotnie użyte. Przykładem jest tu algorytm szybkiego filtru medianowego czy klasyfikator GDL opisany w dalszej części tego autoreferatu. Metody te tworzą kompletną, spójną metodykę obejmującą proces przetwarzania, analizy, klasyfikacji danych i wizualizacji wyników. Prace dotyczą następujących zagadnień naukowych:

#### **4.3.1 Zastosowanie zaawansowanych metod przetwarzania obrazów w zadaniach segmentacji naczyń krwionośnych w tym w szczególności obszaru rozgałęzienia tętnicy szyjnej (praca 1<sup>1</sup>) oraz innych praktycznych zastosowaniach (praca 11).**

Wstępne przetworzenie sygnału (poprawienie jakości) jest najczęściej pierwszym krokiem przed analizą (oceną ilościową – generacją cech) czy finalnie jego klasyfikacją przy pomocy algorytmów z obszaru metod inteligencji obliczeniowej. Metody przetwarzania sygnałów mają zazwyczaj charakter uniwersalny, dzięki czemu istnieje szeroka gama ich praktycznych zastosowań. Elementy tych metod powtarzały się na przestrzeni większości badań prowadzonych przez dr Hachaja. Pierwsze chronologicznie prace przedstawione w ramach tego osiągnięcia dotyczą segmentacji naczyń krwionośnych w tym szczególnie obszaru tętnic szyjnych. Habilitant zdecydował się podjąć tą tematykę, ponieważ choroby układu krwionośnego są jednym z największych zagrożeń dla społeczeństw krajów rozwijających się. Po dokonaniu akwizycji danych tomograficznych, segmentacja światła naczyń jest nieodłączną procedurą poprzedzającą wizualizację i dokonanie diagnozy poprzez klasyfikację ewentualnych zmiany patologicznych. W zależności od techniki akwizycji danych, jej parametrów oraz analizowanego obszaru układu krwionośnego, naczynia na obrazowaniu tomograficznym mogą różnić się średnicą i zawierać różnego rodzaju zaszumienia lub artefakty.

---

<sup>1</sup> Literatura, do której odwołuje się habilitant w paragrafie 4.3 autoreferatu znajduje się w paragrafie 4.2 autoreferatu.

Z tego też powodu segmentacja naczyń jest zadaniem trudnym i będącym przedmiotem międzynarodowych badań naukowych. Wszystkie zaproponowane przez dr Hachaję algorytmy, omówione w tym paragrafie autoreferatu zostały z powodzeniem przetestowane na zestawie danych klinicznych.

Habilitant zaproponował trzy metody segmentacji naczyń krwionośnych, w których oprócz znanych wcześniej zaawansowanych metod z obszaru przetwarzania obrazów znajdują się autorskie modyfikacje jak również całkowicie nowe pomysły.

Pierwsza z ww. metod to algorytm segmentacji naczyń krwionośnych przy pomocy filtru Frangiiego wraz z analizą najbliższych sąsiadów, która jest autorskim pomysłem habilitanta. Metoda ta została omówiona w sekcji 3.2.2 monografii [1]. Filtr Frangiiego pozwala na detekcję podłużnych struktur dzięki analizie wartości własnych macierzy Hessego. Nie jest to jednak tożsamy z detekcją naczyń krwionośnych, ponieważ filtr Frangiiego jest podatny na zaszumienia i artefakty, które są często obecne na zobrazowaniach angiograficznych. Dr Hachaj zaproponował kolejny etap filtracji, który polega na analizie sąsiedztwa. Filtr analizujący sąsiedztwo wyklucza z wynikowego obrazu te woksele (trójwymiarowe piksele), w których bezpośrednim sąsiedztwie znajduje się mniejsza ilość wokseli o wartościach (mierzonych w skali Hounsfielda) znajdujących się w zakładanym przedziale, niż przyjęty próg. Przykładowe wyniki zastosowania tego algorytmu przy różnych wartościach progowych pokazano na rysunku 3.7, 3.8 i 3.10 monografii [1].

Druga zaproponowana metoda opiera się na algorytmie rozrostu obszaru z nowym kryterium przynależności stworzonym przez habilitanta. Dokładny opis algorytmu znajduje się w paragrafie 3.2.3 monografii [1]. Kryterium to jest zbliżone do tego, które zostało zastosowane na etapie analizy sąsiedztwa poprzedniego algorytmu. Zastosowanie tego podejścia w niektórych przypadkach pozwala na segmentację znacznych obszarów układu krwionośnego przy użyciu nawet jednego punktu startowego dla algorytmu rozrostu. Przykładowe wyniki zastosowania tego algorytmu pokazano na rysunku 3.11 monografii [1].

Trzecim osiągnięciem habilitanta w obszarze segmentacji naczyń krwionośnych, jest stworzenie szkieletowego algorytmu, przy pomocy którego możliwe jest zastosowanie różnorodnych algorytmów z grupy aktywnych konturów, na potrzebę detekcji struktur będących przedmiotem zainteresowania. Wyniki badań opisane są w paragrafach z zakresu 3.2.4 - 3.3 (paragraf 3.3 zawiera implementację popularnego algorytmu ACWE sporządzoną przez habilitanta). Podejście to wykorzystuje autorski algorytm wykrywający ścieżkę znajdującą się wewnątrz naczynia, łączącą dwa punkty, pomiędzy którymi ma zostać dokonana segmentacja. Algorytm wykrywania ścieżki jest dwuetapowy. W pierwszym etapie wykorzystywany jest algorytm rozrostu obszaru, w drugim znaleziona ścieżka pomiędzy punktem początkowym i końcowym jest zwężana tak, aby jej szerokość wynosiła jeden woksel. Uzyskany w ten sposób zestaw punktów służy inicjalizacji algorytmów aktywnych konturów, których rolą jest segmentacja poprzecznych przekrojów naczynia. W paragrafie 3.2.6 habilitant porównał działania kilku algorytmów rozrostu obszaru rozwiązując problem segmentacji rozgałęzienia tętnicy szyjnej i porównując otrzymane wyniki z segmentacją wykonaną przez eksperta.

Metody z obszaru przetwarzania sygnałów mają niezwykle uniwersalny charakter. Dowodem na to jest zaproponowany przez dr Hachaję algorytm szybkiego filtru medianowego, który został przedstawiony w monografii [1] w części paragrafu 1.1.2.2 oraz na rysunku 1.12 (w paragrafie 1.4.3

znajduje się jego implementacja). Algorytm ten opiera się na założeniu, że obraz, który ma zostać przefiltrowany zawiera skończoną ilość dyskretnych wartości pikseli, które mogą być przedstawione w tablicy histogramu. Poprzez odpowiednią kolejność aktualizacji wartości w oknie filtru, problem sortowania wartości pikseli w celu wykrycia mediany, został zastąpiony problemem znajdowania mediany w posortowanej tablicy wartości. W praktyce, jeśli przedmiotem filtracji jest obraz z 8-mio lub 16-to bitową paletą kolorów, zabieg ten przyspiesza nawet kilkukrotnie działanie algorytmu filtracji w stosunku do typowych implementacji tej metody. Przykład praktycznego zastosowania tego podejścia został przedstawiony w pracy [11] gdzie wraz z szybką aproksymacją splotu z funkcją Gaussa pełni on rolę wygładzającą rozwiązanie uzyskane dzięki optymalizacyjnemu algorytmowi gradientowemu.

#### **4.3.2 Wizualizacja wolumetrycznych danych medycznych w czasie rzeczywistym metodami bezpośrednimi (direct volume rendering, praca 1).**

Bardzo ważnym aspektem pracy z systemami komputerowymi wspomagającymi diagnostykę medyczną jest odpowiednia wizualizacja danych oraz intuicyjny interfejs użytkownika. Naturalnym krokiem w prowadzonych przed dr Hachaja badaniach było podjęcie tematów związanych z prezentacją wyników działań algorytmów wykrywających naczynia krwionośne uwidocznione na obrazach tomografii komputerowej.

##### ***A. Badania nad metodami bezpośredniej wizualizacji trójwymiarowego pola skalarnego***

Stworzenie algorytmu, który pozwoli na wizualizację trójwymiarowych rekonstrukcji obrazów tomograficznych jest trudnym zadaniem. Przyczynia się do tego znacząca ilość wokseli wchodzących w jego skład (dr Hachaj pracował najczęściej na obrazach składających się z około  $512^3 \approx 10^8$  wokseli) jak również konieczność, aby możliwa była interakcja z wizualizacją (jej obracanie, zmiana funkcji transferu itp.). Aby spełnić ww. założenia, nowoczesne algorytmy wizualizacyjne stosują podejście równoległe, dostosowane do współpracy z kartą graficzną.

W nurcie swoich badań dr Hachaj zajmował się projektowaniem, implementacją oraz ewaluacją wydajności algorytmów opartych na bezpośredniej wizualizacji trójwymiarowego pola skalarnego. Ich podsumowanie znajduje się w czwartym rozdziale pracy [1]. Całość badań przeprowadzonych w tym rozdziale wykorzystywała rzeczywiste, kliniczne obrazowania tomografii komputerowej.

Habilitant szczegółowo omawia podstawy matematyczne wizualizacji danych oparte na metodach algebry (paragraf 4.1 monografii [1]). Są nimi reprezentacja w postaci macierzowej transformacja rotacji, translacji oraz skalowania, zmiana bazy układu współrzędnych wizualizowanego środowiska na układ współrzędnych zdefiniowany względem położenia wirtualnej kamery oraz transformacja projekcji. Kolejnym poruszonym tematem jest praktyczny sposób wizualizacji danych przy użyciu karty graficznej. W paragrafie 4.2 dr Hachaj przedstawił potok przetwarzania danych technologii High-Level Shading Language, która jest jedną z możliwych metod programowania wysokiego poziomu kart graficznych. W paragrafie 4.3 przedstawił uproszczony model emisyjno-absorpcyjny, który jest najczęściej wykorzystywany w praktyce medycznej do wizualizacji trójwymiarowych rekonstrukcji obrazów tomograficznych oraz model oświetlenia

Phonga. Dalsza część rozdziału czwartego zawiera oryginalne osiągnięcia habilitanta. Są nimi, przedstawione na rysunku 4.13 opracowane przez dr Hachaję modele potoku przetwarzania trzech popularnych algorytmów bezpośredniej wizualizacji pola skalarnego z autorskimi modyfikacjami (będą one omówione w dalszej części autoreferatu). Te algorytmy to: metoda projekcji promienia (volume ray casting) oraz metody teksturowania (texture based volume rendering). W omawianym rozdziale, na stronach 173-175 znajduje się również autorski algorytm habilitanta znajdujący dwuwymiarowe przekroje wizualizowanej bryły, których wektor normalny jest równoległy do kierunku obserwacji wirtualnej kamery (kierunku „patrzenia” obserwatora) oraz dokonujący podziału tych przekrojów na zestaw przylegających do siebie trójkątów, co jest warunkiem wyświetlenia trójwymiarowej rekonstrukcji tomografii.

Habilitant pracował na dwóch wersjach algorytmu opartego na teksturach. Ponieważ przyjęty model oświetlenia wymaga wyliczenia wektorów normalnych wizualizowanych powierzchni, w praktyce zastępuje się je wartościami gradientu w analizowanych wkselach. Można zastosować metodę, w której gradient zostanie policzony przed wizualizacją lub jest obliczany w sposób ciągły w trakcie jej trwania. Zmienia to znacząco struktury danych, które są wykorzystywane do przechowywania wyników cząstkowych jak również zmienia algorytm wizualizacji. Ponieważ praktyczny czas realizacji (wydajność) tego typu algorytmów nie jest oczywisty i nie występuje tu proste przyspieszenie działania algorytmu kosztem większej ilości wykorzystywanej pamięci, autor podjął się przeprowadzenia nowatorskich badań w tym zakresie. Empirycznie udowodnił, że algorytm korzystający z wcześniej oszacowanego gradientu działa wolniej niż algorytm, który oblicza wartość gradientu w sposób ciągły. Wynika to z wewnętrznej architektury karty graficznej i natury wykonywanych na niej obliczeń.

Praktyka wizualizacji trójwymiarowych wolumetrycznych danych wymaga zastosowania trójwymiarowych tekstur. Tekstury te pełnią podobną rolę jak ich dwuwymiarowe odpowiedniki, a karta graficzna udostępnia sprzętową trójwymiarową liniową interpolację wkseli, dzięki czemu ogranicza się zjawisko pikselizacji w wypadku powiększenia fragmentu obrazu. Stworzenie trójwymiarowej tekstury w pamięci karty graficznej wymaga zarezerwowania odpowiedniej ilości obszaru o strukturze liniowej. W wypadku kilkuset megabajtowych obiektów taki liniowy, pusty obszar może być niedostępny. Dlatego zaproponowane przez dr Hachaję algorytmy mają możliwość podziału wizualizowanej objętości na mniejsze fragmenty, które są stopniowo (w ramach tworzenia obrazu wynikowego) przekazywane do pamięci karty graficznej. To podejście (podział na bloki – bricking) znane było już wcześniej, natomiast autor przeprowadził pionierskie badania nad czasem wykonania algorytmów wizualizacyjnych w zależności od ilości bloków, na które podzielono model. Wyniki badań zostały opisane w paragrafie 4.5 monografii.

Zastosowanie dynamicznego obliczania gradientu pozwala na zastosowanie pewnych uproszczeń przyspieszających obliczenia. W wypadku metody rzucania promienia jest to znana metoda wczesnego zakończenia progresji promienia (early ray termination), a w wypadku wizualizacji opartej na teksturach opuszczanie obszarów, które mają relatywnie niską wartość nieprzezroczystości (low alpha skipping). W pierwszej metodzie progresja promienia kończy się, gdy wypadkowa wartość nieprzezroczystości przekroczy pewną założoną graniczną wartość, natomiast druga, zaproponowana przez dr Hachaję polega na omijaniu w procesie szacowania ostatecznego koloru RGBA wartości, w których współczynnik nieprzezroczystości jest mniejszy od założonej wartości progowej.

Przeprowadzone badania wykazały, że zaproponowana metoda może w znaczącym stopniu zwiększyć wydajność algorytmu wizualizacji, jeśli funkcja transferu generuje wiele przezroczystych obszarów.

Ostatnim z nowatorskich zagadnień poruszonym w tej pracy jest porównanie, jak różne operatory wykorzystywane do dyskretnego szacowania gradientu wpływają na realizację generowanego modelu. W tym badaniu, którego wyniki przedstawiono w tym samym paragrafie, habilitant wziął pod uwagę zarówno wizualną jakość otrzymanego obrazu („realność” generowanych cieni - rysunek 4.21) jak i wydajność metody.

### ***B. Wizualizacja danych we współpracy z naturalnym interfejsem człowiek – komputer***

Naturalny interfejs człowiek – komputer (Natural User Interface – NUI) jest metodą interakcji pomiędzy człowiekiem a maszyną, która polega na analizie zachowania użytkownika. Podejmowane przez człowieka akcje są interpretowane jako komendy dla systemu komputerowego. Celem użycia NUI jest maksymalne uproszczenia współpracy z komputerem. Również użytkownik, który po raz pierwszy styka się z systemem, który posiada NUI potrafi się go nauczyć dużo szybciej, niż w wypadku, gdy komputer posiada klasyczny graficzny interfejs oparty na myszy lub klawiaturze.

W rozdziale 5.1 monografii [1] habilitant zaproponował zastosowanie NUI opartego na ekranie dotykowym jako interfejsie do systemu wizualizującego trójwymiarowe zobrazowania medyczne metodami bezpośrednimi na urządzeniach przenośnych. Ponieważ współczesne urządzenia przenośne nie mają wystarczającej mocy obliczeniowej, aby taka wizualizacja mogła zostać wykonana dr Hachaj zaproponował, zaimplementował oraz przetestował w praktyce metodę zdalnej wizualizacji takich danych przy użyciu architektury klient – serwer. Schemat rozwiązania wykorzystującego zaproponowane podejście znajduje się na rysunku 5.4.

Kolejnym osiągnięciem habilitanta było zastosowanie algorytmów z obszaru rozszerzonej rzeczywistości w roli naturalnego interfejsu. W paragrafie 5.2.1 markery naturalnej rzeczywistości zostały użyte w celu osadzenia na nich wizualizacji medycznych. Dzięki temu użytkownik systemu ma do dyspozycji niezwykle intuicyjny sposób eksploracji rekonstrukcji tomograficznych. Na przykład chcąc oddalić, przybliżyć bądź zmienić orientację obiektu obracając go wokół różnych osi w odpowiedni sposób ustawia trzymany w ręce marker. Wizualizacje wykonane przy pomocy prototypu implementacji powyższej metody stworzonego przez habilitanta, pokazano są na rysunku 5.10 i 5.11.

### **4.3.3 Klasyfikacja ruchów ciała człowieka na potrzeby systemów multimedialnych w tym systemów wspomagających trening sportowy i interfejsów człowiek – komputer (prace 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12).**

Prezentowane do tej pory metody interakcji z wizualizacjami medycznymi za pośrednictwem NUI wymagały zastosowania trzymanego w dłoni urządzenia (np. PDA) lub markera rozszerzonej rzeczywistości. Aby wyeliminować konieczność używania takich dodatkowych urządzeń należy



zastosować podejście oparte na rozpoznawaniu gestów i ruchów ciała człowieka. Istnieje wiele metod z obszaru inteligencji obliczeniowej, które mogą być użyte w tym celu (obszerne omówienie obecnego stanu wiedzy na ten temat znajduje się w paragrafie 5.3 monografii [1]). Metody te nie są jednak w większości dostosowane dla potrzeb współczesnych multimedialnych systemów do akwizycji i analizy ruchu (na przykład kontrolerów multimedialnych typu Microsoft Kinect), które są obecnie powszechnie dostępne i bardzo popularne. Dr Hachaj zaproponował zupełnie nowe podejście łączące w sobie zalety metod opartych na definiowaniu pozycji ciała w postaci zestawu reguł (w oparciu o zasady dobrze znane z systemów ekspertowych) oraz metody uczenia maszynowego. Ten nowy klasyfikator o nazwie Język Opisu Gestów (Gestures Description Language – GDL) jest całkiem oryginalną ideą, która jest skuteczną alternatywą dla innych, popularnych algorytmów, natomiast góruje nad nimi intuicyjnością podejścia oraz łatwością integracji w ramach systemów komputerowych wykorzystujących metody analizy oraz klasyfikacji ruchu. Dzięki możliwości zarówno manualnego jak i automatycznego definiowania reguł metodą treningu bez nauczyciela oraz wbudowaną w metodykę selekcją cech z sygnału wejściowego pochodzącego bezpośrednio z systemów przechwytywania ruchu (motion capture – MoCap) GDL jest z powodzeniem stosowany w projektach naukowych jak i doczekał się wdrożeń w różnorodnych projektach komercyjnych na całym świecie.

#### ***A. Podstawy klasyfikatora GDL – generowanie opisów ruchu w oparciu o doświadczenie użytkownika***

Podejście GDL oparte jest na założeniu, że każda osoba posiada wiedzę jak wyglądają gesty i ruchy ciała wykonywana podczas codziennych czynności, natomiast specjaliści (na przykład trenerzy sportowi) potrafią opisać jak wyglądają inne wzorce ruchowe charakterystyczne dla akcji ciała, którymi zajmują się w swojej codziennej praktyce. GDL pozwala na zdefiniowanie tej wiedzy przy pomocy opisów w języku formalnym GDL script (GDLs). Formalna definicja tego języka znajduje się w paragrafie 5.9 monografii, a uzupełnienie w dodatku do pracy [3]. Istotną częścią GDL jest moduł wnioskujący, który wykorzystując metodę automatycznego wnioskowania w przód (analogicznie do takich modułów znajdujących się w systemach ekspertowych) sprawdza prawdziwość wszystkich reguł znajdujących się w bazie wiedzy. Przesłankami do reguł mogą być dane uzyskane z systemu MoCap oraz wnioski z innych reguł. Przy pomocy specjalnego stosu pamięci możliwe jest odwołanie się do danych MoCap pobranych we wcześniejszych chwilach czasu jak również do wcześniej spełnionych reguł. Tak skonstruowany mechanizm pozwala na definicję sekwencji statycznych pozycji ciała, które pod pewnymi ograniczeniami czasowymi stają się definicjami akcji (ruchów), które mają zostać rozpoznane przez klasyfikator. Formalizmy definiujące całość podejścia GDL można znaleźć w pracy [3]. W pracy [12] dr Hachaj wyjaśnia w jaki sposób przy pomocy metodyki GDL przygotowywać definicje typowych przypadków rozpoznawania ruchu, które często pojawiają się w systemach wykorzystujących MoCap.

Największym wyzwaniem, przed którym stają użytkownicy klasyfikatora GDL, jest sporządzenie odpowiednich opisów w GDLs. Manualne sporządzenie opisu ruchu, w ramach którego bierze się pod uwagę cztery lub więcej cech, może być bardzo trudne. Z tego powodu w pracy [3] dr Hachaj zaproponował metodę automatycznego treningu klasyfikatora w wyniku, którego generowane są skrypty w języku GDLs. To autorskie podejście nosi nazwę Reversed-GDL (R-GDL).

### ***B. Zaawansowane użycie GDL w celu generowania opisów ruchu w oparciu o algorytmu uczenia maszynowego***

Stworzony przez habilitanta algorytm automatycznego wyznaczania opisów ruchu składa się z dwóch etapów: w pierwszym następuje wykrycie klatek kluczowych ruchu, w drugim wygenerowanie uporządkowanej sekwencji tych klatek, która jest podstawą klasyfikacji akcji. W zaproponowanej metodzie wartości poszczególnych cech charakteryzujących klatki kluczowe określane są po dokonaniu klasteryzacji zbioru treningowego metodą  $k$  średnich, gdzie  $k$  jest liczbą szukanych klatek kluczowych. Zbiór treningowy składa się z niesegmentowanych nagrań MoCap, na których osoby biorące udział w eksperymencie periodycznie wykonują akcję, którą rozpoznawać ma się nauczyć klasyfikator. Wartości cech definiujących klatki kluczowe obliczane są jako średnie arytmetyczne obiektów należących do danego klastra a tolerancję wartości szacuje się na podstawie odchylenia standardowego. Podejście to zakłada, że rozkład danych w ramach poszczególnych klastrów jest normalny, co jest w pewnym przybliżeniu prawdą dla wielu fenomenów związanych z analizą ruchu człowieka i co zostało potwierdzone przez bardzo dobre empiryczne efekty metody. Drugim etapem algorytmu R-GDL jest określenie kolejności klatek kluczowy oraz ograniczeń czasowych. Zgodnie z algorytmem habilitanta opisanym w [3] dokonuje się tego przy pomocy analizy  $n$ -gramów klatek kluczowych występujących w niewielkim, posegmentowanym podzbiórze zbioru uczącego. Wybierany jest najdłuższy  $n$ -gram, który wystąpi we wszystkich analizowanych próbkach. Ograniczenia czasowe obliczane są jako maksymalne czasy przejścia pomiędzy wybranymi stanami.

Podsumowując, do najważniejszych cech klasyfikatora GDL należy:

- Możliwość tworzenia opisów ruchu zarówno w sposób manualny jak i automatyczny. Manualna definicja ruchu znacznie ułatwia wytrenowanie klasyfikatora, jeżeli zbiór akcji, który jest przedmiotem zainteresowań badacza nie wymaga użycia uczenia maszynowego. W praktyce takie podejście znacznie ułatwia pracę, ponieważ istnieje szeroka grupa ruchów relatywnie prostych do opisu, bez konieczności tworzenia dużego zbioru nagrań MoCap.
- Automatyczne tworzenie opisów ruchu przy pomocy metod uczenia maszynowego. Bardzo istotnym aspektem algorytmu R-GDL jest to, że nie wymaga on segmentacji nagrania treningowego, na którym nagrane osoby periodycznie powtarzają ruch, który ma zostać rozpoznany. W znaczący sposób przyspiesza to przygotowanie zbioru danych treningowych i testowych dla klasyfikatora, ponieważ tego typu próbki MoCap zazwyczaj trzeba przygotowywać manualnie.
- Dodanie nowej klasy akcji do rozpoznania do wytrenowanego już klasyfikatora nie wymaga ponownego treningu całości rozwiązania – należy jedynie dodać definicję nowej akcji do głównego skryptu GDLs.
- Bardzo duża intuicyjność połączona z ekspresywnością języka GDLs. Ten formalizm zaprojektowany i zaimplementowany przez dr Hachaję może być z powodzeniem użyty zarówno przez osobę, która dopiero poznaje GDL jak również przez specjalistę, który definiuje bardziej złożone akcje, w których bierze się pod uwagę wiele cech.
- Możliwość manualnej modyfikacji / uzupełniania opisów GDLs wygenerowanych metodami uczenia maszynowego przez skrypty pisane ręcznie.

- Możliwość wykrywania istotnych z punktu widzenia statystycznego elementów ruchu, które uwidaczniane są jako środki klastrów w procesie treningu R-GDL.
- Klasyfikator może operować na nieposegmentowanych danych pochodzących bezpośrednio ze strumienia danych z systemu MoCap. Nie zachodzi konieczność wstępnego przygotowanie próbek.
- Sygnał systemu MoCap może zostać przypisany do kilku klas równocześnie (na przykład kiedy ruch, który należy rozpoznać jest częścią składową innego ruchu) jak również do żadnej (jeżeli obserwowana osoba nie wykonuje ruchów, które są przedmiotem zainteresowań klasyfikatora). Jeżeli jest to działanie niepożądane, język GDLs stwarza możliwość takiej redefinicji klasyfikatora, aby jedna próbka mogła być przypisana do co najwyżej jednej klasy.
- R-GDL generuje syntaktyczny opisy akcji, które widoczne są na nagraniach treningowych, dzięki czemu osoba korzystająca z tej metodologii ma możliwość przeczytania formalnego opisu tego, co dzieje się na nagraniu.

### **C. Przykłady wykorzystania GDL dla różnych problemów badawczych**

Wstępnie, projekt GDL zakładał użycie go jako klasyfikatora w bezdotykowych interfejsach człowiek – komputer. W takiej roli najczęściej używany też był komercyjnie w firmach komputerowych. Metodyka tworzona w ramach GDL była projektowana najczęściej w celu rozwiązania problemów, które sygnalizowane były przez przemysł lub środowisko naukowe. Do najważniejszych zastosowań technologii GDL można zaliczyć:

- W paragrafie 5.7 na rysunkach 5.21, 5.22 monografii [1] zaprezentowano stworzony przez habilitanta prototyp systemu wizualizującego trójwymiarowe rekonstrukcje tomografii komputerowej, który korzysta z NUI opartego na GDL.
- Praca [3], w której zaprezentowano metodę treningu bez nadzoru klasyfikatora GDL, jako zbiór treningowy i testowy wykorzystano dane pochodzące z projektu systemu wspomagającego trening na siłowni. Rozpoznawane akcje są typowymi ćwiczeniami, które wykonuje się podczas rozgrzewki i rozciągania. Część z tych danych zostało przekazane habilitantowi przez firmę, dla której opracowywał on kilka projektów wdrożeniowych opartych na GDL.
- W pracy [2] GDL użyto jako NUI wirtualnego systemu edukacyjnego. Projekt oraz implementacja środowiska powstała w odpowiedzi na zapotrzebowanie pracowników wydziału pedagogicznego Uniwersytetu, na którym pracuje habilitant i jest pomocą naukową.

Metodyka opracowana podczas pracy na ww. projektami okazał się bardzo skuteczną przy rozpoznawaniu nie tylko podstawowych ruchów ciała, które są często używane w interakcji z komputerami, ale również bardzo złożonych, często wyspecjalizowanych akcji. Habilitant zdecydował się więc rozszerzyć funkcjonalność metodyki na wysoce wyspecjalizowaną klasę ruchów, które występują w technikach karate. Celem badań było stworzenie niezbędnych podstaw, które są

konieczne dla stworzenia komputerowej aplikacji wspomagającej trening tej sztuki walki. Ponieważ karate nie jest obecnie dyscypliną olimpijską problem ten nie jest szeroko poruszany w publikacjach naukowych, niemniej spotyka się z bardzo dużym zainteresowaniem środowiska naukowego jak również amatorów i profesjonalistów sportu. Wynika to z rosnącej mody na zdrowy styl życia oraz faktu, że coraz więcej osób wybiera tę dyscyplinę sportu jako sposób samodoskonalenia się i zachowania sprawności fizycznej. W celu zgromadzenia odpowiedniej wiedzy oraz danych, habilitant nawiązał współpracę z utytułowanymi zawodnikami (mistrzami kata oraz kumite) i instruktorami Shorin ryu oraz Oyama karate. Na kanwie tej współpracy powstał szereg prac, w których opracowano metody klasyfikacji technik karate przeznaczone dla systemu komputerowego wspomagającego trening, oraz metody matematycznego modelowania ruchu [4], [5], [9]. W ostatnim czasie dr Hachaj postanowił zastąpić język GDLs językiem Lua, który ma dużo większe możliwości ekspresyjne niż starsze podejście. Badania przeprowadzone w pracy [5] wskazują, że szybkość działania implementacji GDL w tym bardzo popularnym, międzyplatformowym języku jest wystarczająca dla rozwiązywania problemów klasyfikacji ruchu. Wyżej wymienione zagadnienia wpisują się w tematykę realizowanego od 2016 roku grantu NCN pt. „Opracowanie nowych metod uczenia maszynowego na potrzeby rozpoznawania oraz oceny aktywności ruchowej człowieka”, którego habilitant jest kierownikiem.

#### ***D. Zastosowanie innych metod z obszaru inteligencji obliczeniowej w zagadnieniach klasyfikacji ruchu człowieka***

W projektach dotyczących klasyfikacji ruchu człowieka habilitant wykorzystywał poza GDL również inne metody z obszaru inteligencji obliczeniowej. W pracy [6] dr Hachaj użył klasyfikatora opartego na ukrytych modelach Markowa w celu rozpoznania nagrań MoCap. Dobór cech, które opisywały ruch został również poparty analizą głównych składowych (Principal Components Analysis – PCA). Nagrania w zbiorze treningowym i testowym zostały wcześniej posegmentowane. Dr Hachaj rozwiązywał również problemy klasyfikacji posegmentowanego zbioru nagrań MoCap przy pomocy sieci neuronowej. Sieć opisana w pracy [8] na wejściu przyjmowała zestaw cech, które powstały poprzez dokonanie interpolacji kubicznym splinem tak, aby wszystkie nagrania były tej samej długości (posiadały taką samą liczbę próbek).

Dzięki metodzie zaproponowanej przez habilitanta w kolejnej pracy manualna segmentacja nie była już konieczna. W pracy [4] dr Hachaj zaproponował nowy algorytm pozwalający na segmentację i klasyfikację ruchów człowieka z pozyskiwanych w czasie rzeczywistym sygnałów z sensora MoCap. Segmentacja wykorzystuje metodykę GDL natomiast w roli klasyfikatora użyto ukryte modele Markowa. Stworzony model został z powodzeniem wytrenowany i przetestowany na unikalnym zbiorze danych zawierającym nagrania MoCap różnorodnych technik Oyama karate.

#### **4.3.4 Analiza dużych zbiorów danych (big data analysis, prace 7, 10)**

W trakcie pracy nad automatycznymi metodami treningu klasyfikatora GDL dr Hachaj korzystał z szeregu metod analizy danych mających swoje podstawy w statystyce. Dzięki temu jego

praca nad zagadnieniami z obszaru dużych zbiorów danych doskonale wpisala się w cykl badań nad zastosowaniami metod inteligencji obliczeniowej.

Obecnie bardzo wiele społeczności dzielących wspólne zainteresowania ma swoje portale internetowe, w ramach których gromadzą, przetwarzają i udostępniają dane na temat aktualnych i historycznych wydarzeń, w których biorą udział jak również dzielą się opiniami i spostrzeżeniami. Dzięki temu portale społecznościowe są ogromną, często nieustrukturalizowaną bazą wiedzy. Dane tam zgromadzone są szczególnie cenne z punktu widzenia biznesu, ponieważ odpowiednio przefiltrowane lub zagregowane mogą modelować preferencje rynkowe (zakupowe) grup użytkowników, którzy partycypują w społeczności.

W ramach badań nad tematyką dużych danych dr Hachaj opracował metodę analizy sieci powiązań pomiędzy użytkownikami portali społecznościowych w celu znajdowania skupisk osób dzielących podobne zainteresowania (dyskutujących na podobne tematy). Jest to ciekawe naukowo zagadnienie, które posiada niezwykle ważne biznesowe zastosowanie, ponieważ dzięki zaproponowanemu podejściu można ocenić nie tylko czym interesują się grupy użytkowników danej społeczności internetowej, ale również zbudować ważony graf przedstawiający prawdopodobieństwa warunkowe koincydencji zainteresowań. Algorytm będący propozycją rozwiązania tego problemu został opublikowany w pracy [7] i oparty jest na heurystyce analizującej hashtagi, które są nieodłącznym elementem wpisów na mikroblogach. Model dr Hachaja zawiera kilka parametrów adaptacyjnych, dzięki którym można odfiltrowywać mniej istotne dla całej społeczności posty, których występowanie może nie być efektem istniejących w danych trendów. Dzięki zastosowaniu odpowiednich algorytmów wykrywających skupiska węzłów sieci (community structures) możliwe jest wykrycie klastrów hashtagów, które najczęściej występują wspólnie. Można interpretować je jako profile zainteresowań poszczególnych grup użytkowników portalu społecznościowego. Odpowiednia wizualizacja danych, na przykład taka jak na rysunkach 2, 3 i 4 w pracy [7] pozwala na dogłębną analizę otrzymanych wyników i wyciągnięcie niezwykle interesujących i ważnych naukowo i biznesowo wniosków. Dr Hachaj przetestował metodę w praktyce na trzech dużych zbiorach danych, z których każdy zawierał około  $10^7$  postów i  $10^6$  różnych hashtagów. Zbadał również empirycznie skalowalność metody, kiedy analiza przeprowadzana jest na losowej próbce oryginalnego, kompletnego zbioru. Praca zawiera również implementację metody w deklaratywnym języku SQL.

Dr Hachaj prowadził też badania nad predykcją na podstawie danych historycznych potencjalnych przyszłych miejsc odbywania się spotkań osób, należących do społeczności dzielących wspólne zainteresowania. Badania opierały się na analizie danych społeczności geocacherów. Opublikowany w pracy [10] model, oparty na algorytmie DBSCAN oraz trzech heurystykach pozwolił nie tylko na bardzo dokładne określenie miejsca kolejnego spotkania stosunkowo dużej grupy takich osób (z dokładnością do kilkuset metrów w skali kraju) lecz również osoby, która takie spotkanie zorganizuje. Zaproponowany algorytm ma bardzo duże zastosowanie biznesowe - może być użyty na przykład w celu analizy opłacalności patronatu nad tego typu imprezą przez sponsora. Można go użyć również w celu analizy potencjalnych zagrożeń zwianych z zapewnieniem bezpieczeństwa publicznych zgromadzeń.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Przed obroną doktoratu habilitant zaprojektował oraz zaimplementował automatyczny system komputerowy wspomagający lekarza – diagnostę na różnych etapach analizy diagnostycznej obrazowań CTP (Computed Tomography Perfusion). Ten nowatorski system wyposażony jest między innymi w:

- moduł wykrywający potencjalne ogniska choroby unaczynienia mózgu, różnicujący zmiany krwotoczne od niedokrwiennych,
- komputerowy anatomiczny atlas mózgu, który służy do opisu struktur mózgowia objętych poważną asymetrią perfuzji,
- moduł obliczający istotne dla stanu pacjenta wartości parametrów perfuzji,
- moduł generujące mapy prognostyczne, które przedstawiają prawdopodobny scenariusz dalszego rozwoju choroby.

Prace dotyczące tych zagadnień wymienione są w Załączniku 4, w paragrafie „Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 1) opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych” w sekcji „Przed obroną doktoratu”.

Po obronie doktoratu oprócz zagadnień wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego dr Hachaj zajmował się projektowaniem równoległych algorytmów na potrzeby stereowizji oraz modelowaniem obliczeń tych algorytmów na karcie graficznej [A1].

Opracował również metodę oceny podobieństwa wzorców ruchowych człowieka [A2], którą rozwija w ramach prowadzonego obecnie projektu naukowego.

### Literatura<sup>2</sup>

[A1] Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, Real time area-based stereo matching algorithm for multimedia video devices, Opto-Electronics Review, December 2013, Volume 21, Issue 4, pp 367-375 (TH 80%, MO 20%)

[A2] 9. Tomasz Hachaj, Marek R. Ogiela, Qualitative evaluation of full body movements with Gesture Description Language, 2014 Second International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, 978-1-4799-7600-3/14, 2014 IEEE, DOI 10.1109/AIMS.2014.32, pages 176-181 (TH 80%, MO 20%)

---

<sup>2</sup> Obie poniższe prace zostały również wykazane w Załączniku 4, w paragrafie „Wykaz innych (nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt 1) opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych”

## Podsumowanie dorobku naukowego

Tabela 1. Sumaryczna liczba opublikowanych prac, których habilitant jest autorem bądź współautorem.

Kategoria	Liczba publikacji		
	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
Publikacje w żurnalach indeksowanych na Journal Citation Reports	1	16	17
Publikacje w innych czasopismach naukowych	6	3	9
Monografie		1	1
Rozdziały w książkach	1	3	4
Publikacje w materiałach konferencyjnych indeksowanych w WOS		6	6
Publikacje w materiałach konferencyjnych nieindeksowanych w WOS	2	15	17
<b>Podsumowanie</b>	<b>10</b>	<b>44</b>	<b>54</b>

Tabela 2. Informacja o publikacjach w żurnalach indeksowanych na liście Journal Citation Reports.

Żurnal	Impact Factor	IF średni (5 lat)	Punkty MNiSW	% udziału habilitanta	Liczba publikacji	Rok publikacji
Journal of Signal Processing Systems for Signal, Image, and Video Technology	0.623	0.667	13	70	1	2010
Opto-Electronics Review	0.966	1.054	25	70	1	2011
Computers in Biology and Medicine	1.089	1.302	20	70	1	2011
Journal of Electronic Imaging	1.061	0.908	20	80	1	2012
Computers & Graphics-UK	0.794	0.866	20	80	1	2012
Journal of Electronic Imaging	0.85	1.024	20	80	1	2013
Multimedia Systems	0.619	0.832	20	80	1	2014
Neurocomputing	2.005	2.102	30	80	1	2013
Opto-Electronics Review	1.279	0.951	20	80	1	2013
Journal of Electronic Imaging	0.672	0.832	20	80	1	2014
International Journal of Information Management	1.55	2.432	35	80	1	2014
International Journal of Information Management	1.55	2.432	35	85	1	2015
Symmetry-Basel	0.826	1.192	30	70	1	2015
Multimedia Tools and Applications	1.346	1.374	30	80	1	2015
Digital Signal Processing	1.256	1.709	30	80	1	2015
Journal of Medical Systems	2.213	1.955	25	80	1	2016
Future Generation Computer Systems	2.786	2.464	40	80	1	2016
<b>Podsumowanie</b>	<b>21.485</b>	<b>24.096</b>	<b>433</b>	<b>Średnio ~78%</b>	<b>17</b>	<b>--</b>

Sumaryczny IF przed obroną doktoratu: 0.623

Sumaryczny IF po obronie doktoratu: 20.862

Sumaryczny IF podczas całej działalności 21.485

Tabela 3. Liczba indeksowanych prac habilitanta, cytowań, oraz h-indeks dla poszczególnych baz (szczegóły w załączniku numer 4 niniejszego wniosku).

Baza	Liczba indeksowanych prac	Liczba cytowań	H-indeks
Web of Science (bez autocytowań), dane z dnia 1 czerwca 2016	32	59	8 (H-indeks liczony z autocytowaniami)
Scopus (bez autocytowań), dane z dnia 1 czerwca 2016	39	101	5
Scopus (bez autocytowań wszystkich współautorów), dane z dnia 1 czerwca 2016	39	61	5
Google Scholar (dane uzyskane z Publish or Perish, wliczając autocytowania), dane z dnia 1 czerwca 2016	59 <sup>3</sup>	374	11

12 września 2016  
Tomasz Hachaj

<sup>3</sup> Liczba prac indeksowanych w Google Scholar jest większa niż liczba prac podanych w tabeli 1, ponieważ ta baza indeksuje każdy rozdział monografii jako osobną pracę.