

Modele interakcyjnych obliczeń granularnych
w realizacji złożonych systemów na etapie
projektowania, konstruowania i wdrażania
Autoreferat rozprawy habilitacyjnej

Andrzej Jankowski

Warszawa, 4 grudnia 2017

Spis treści

1	Imię i Nazwisko	4
2	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania	4
3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
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 z późn. zm.)	5
4.1	Tytuł <i>osiągnięcia naukowego</i>	5
4.2	Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy	5
4.3	Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników w zakresie <i>osiągnięcia naukowego</i> wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	6
4.3.1	Cel badawczy	6
4.3.2	Kontekst i motywacja badań związanych z <i>osiągnięciem naukowym</i>	9
4.3.3	Podstawowe wyniki <i>osiągnięcia naukowego</i>	15
4.3.3.1	Podstawowa Przyczyna Kryzysu CSE (FP3C)	25
4.3.3.2	Pojęcie c-granuli oraz IGrC	29
4.3.3.3	Przykłady c-granul	34
4.3.3.4	Fundamentalne różnice między pojęciem c-granuli i pojęciem struktury logicznej	35
4.3.4	Przyszłe badania	40
5	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych	42
5.1	Struktury logiczne, przestrzenie domknięć i c-granule	42
5.1.1	Wprowadzenie do struktur logicznych i przestrzeni domknięć	42
5.1.2	Wprowadzenie do problemu charakteryzacji współczesnej logiki matematycznej za pomocą jej relacji z innymi logikami	44
5.1.3	Główne wyniki habilitanta dotyczące struktur logicznych i przestrzeni domknięć	48
5.2	Relacyjne bazy danych: Język SQL a terminy booleowskie i podejście do optymalizacji zapytań za pomocą sieci neuronowych	49
5.3	Ograniczenie domen użytkowników w bazach danych	50
5.4	Sterowanie hierarchicznymi wielo-wyszukiwaniami	50

5.5	Zastosowania systemów wieloagentowych do rozwiązywania problemów bezpieczeństwa i ratownictwa	51
5.6	Big Data	52
5.7	Programowanie ewolucyjne	53
5.8	Zastosowania inteligentnych systemów dialogowych w silnikach wyszukiwania dokumentów	54

Literatura	56
-------------------	-----------

Publikacje Andrzeja Jankowskiego składające się na <i>osiągnięcie naukowe</i> rozprawy habilitacyjnej	56
Publikacje Andrzeja Jankowskiego z Journal Citation Reports (JRC) i niewchodzące w skład <i>osiągnięcia naukowego</i>	57
Publikacje Andrzeja Jankowskiego nie wymienione w Journal Citation Reports (JRC) i niewchodzące w skład <i>osiągnięcia naukowego</i>	59
Patenty	66
Literatura zewnętrzna	67

1 Imię i Nazwisko

Andrzej Wojciech Jankowski

2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania

1. **1976: Magister matematyki**, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski, praca magisterska pt: *Formalizacja pewnych zależności między logikami* [PA21]
2. **1979: Doktor nauk matematycznych**, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski; Rozprawa doktorska pt: *Zanurzenia struktur logicznych* [PA23]

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1. **1976 – 1976** Asystent: prowadzenie ćwiczeń do wykładu z programowania komputerów, Filia Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku
2. **1976 – 1978** Doktorant na Wydziale Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytetu Warszawskiego
3. **1978 – 1998** Asystent i następnie adiunkt na Wydziale Matematyki, współpraca z Zakładem Logiki Matematycznej oraz aktywne uczestnictwo w projektach do około 2015 roku
4. **1985 – 1988** Zaproszony profesor wizytujący w Department of Computer Science, The University of North Carolina at Charlotte, USA
5. **1994 – 1999** Prorektor ds. Nauczania i Badań w Polsko-Japońskiej Wyższej Szkole Technik Komputerowych
6. **2012 – 2014** Adiunkt, Instytut Informatyki na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej
7. **2012 – Do chwili obecnej** Prezes Fundacji Technologii Wiedzy im. Piotra Dziubańskiego

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 z późn. zm.)

4.1 Tytuł *osiągnięcia naukowego*

Modele interakcyjnych obliczeń granularnych w realizacji złożonych systemów na etapie projektowania, konstruowania i wdrażania

4.2 Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy

Na *osiągnięcie naukowe* składają się następujące publikacje: [SA1, SA2, SA3, SA4, SA5]:

- [SA1] A. Jankowski. **Interactive Granular Computations in Networks and Systems Engineering: A Practical Perspective**. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 17. Springer, Heidelberg, 2017, str. 1–654.
- [SA2] A. Jankowski, A. Skowron. **A Wistech paradigm for intelligent systems**. Transactions on Rough Sets: Journal Subline 2007; 6:94–132. (LNCS 4374; Springer, Heidelberg).
- [SA3] A. Jankowski, A. Skowron. **Wisdom technology: A rough-granular approach**. In: M. Marciniak, A. Mykowiecka (Eds.), Aspects of Natural Language Processing Essays Dedicated to Leonard Bolc on the Occasion of His 75th Birthday, Springer, Heidelberg, vol. 5070 Lecture Notes in Computer Science, 2009, str. 3–41.
- [SA4] A. Skowron, A. Jankowski. **Rough sets and interactive granular computing**. Fundamenta Informaticae 2016; 147:371–385.
- [SA5] A. Skowron, A. Jankowski. **Toward W2T foundations: Interactive granular computing and adaptive judgement**. In: N. Zhong, J. Ma, J. Liu, R. Huang, X. Tao (Eds.), Wisdom Web of Things (W2T), Springer, Heidelberg. 2016, str. 47-71.

4.3 Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników w zakresie *osiągnięcia naukowego* wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Matematyka i fizyka zrobiły wspaniałe postępy w ciągu ostatnich trzech stuleci dzięki konstruowaniu uproszczonych modeli złożonych zjawisk, umożliwiając wnioskowania o własnościach modeli, które można było weryfikować za pomocą eksperymentów. To było możliwe ponieważ ignorowana złożoność zjawisk nie była istotą własności tych zjawisk. Takie podejście nie jest jednak skuteczne w przypadku, gdy aspekty złożoności zjawiska stanowią jego istotę.

Frederic Brooks [32]

Mathematics and the physical sciences made great strides for three centuries by constructing simplified models of complex phenomena, deriving, properties from the models, and verifying those properties experimentally. This worked because the complexities ignored in the models were not the essential properties of the phenomena. It does not work when the complexities are the essence.

Frederic Brooks [32]

4.3.1 Cel badawczy

W ramach prac składających się na *osiągnięcie naukowe* w szczególności przedstawiono zarysy opisów wybranych innowacyjnych i złożonych projektów (por. Część IV w [SA1]), opracowanych i realizowanych pod kierunkiem habilitanta. Praktyczne doświadczenia zdobyte przez habilitanta w trakcie prac nad tymi projektami oraz wieloma innymi projektami, dostarczyły obszernej wiedzy z zakresu tworzenia złożonych systemów oraz ich utrzymania i rozwoju.

Wiedza ta stanowiła podstawę do analizy tych projektów i uzyskania uogólnień składających się na *osiągnięcie naukowe* (por. [SA1, SA2, SA3, SA4, SA5]). Zgromadzony empiryczny materiał habilitant wykorzystał, m.in. w badaniach zmierzających do realizacji następujących *ogólnych celów*:

- a) pogłębienie **zrozumienia przyczyn powstania i pogłębiania się luki między teorią i praktyką** (problem luki między teorią i praktyką, ang. Theory and Practice Gap Problem - TPGP) przy projektowaniu i realizacji złożonych projektów; zwłaszcza dotyczy to projektów w dziedzinie inżynierii złożonych systemów (ang. Complex Systems Engineering - CSE) (por. Część III z [SA1]);

b) opracowanie **modeli obliczeń** wspierających:

1. modelowanie złożonych systemów adaptacyjnych (ang. Complex Adaptive System - CAS),
2. sterowanie obliczeniami realizowanymi przez CAS (w szczególności modelami obliczeń naturalnych),
3. modelowanie interakcji dotyczących CAS poprzez **konstruowanie modeli interakcyjnych obliczeń granularnych** (ang. Interactive Granular Computing - IGrC), w szczególności z wykorzystaniem obliczeń realizowanych w sieciach *złożonych granul (c-granul)*, należących do pojedynczego agenta i/lub do *społeczności* agentów (por. Części VI i VII z [SA1], a także [SA2]).

c) opracowanie metodologii bazujących na modelach IGrC **zapewniających maksymalizację skuteczności** (ang. *effectiveness*^{1,2}) i **efektywności** (ang. *efficiency*³) **realizacji projektów CSE, przy jednoczesnej minimalizacji negatywnych skutków TPGP** (por. Części VIII, IV, Aneks i Rozdział 14 z [SA1]).

Osiągnięcie naukowe przedstawia podejście do powyższych *ogólnych celów badań* z wykorzystaniem zaproponowanego modelu IGrC. W szczególności, bazujący na c-granulach, model IGrC odnosi się do kluczowych mechanizmów, wykorzystywanych do sterowania procesami, związanymi z wdrażaniem projektów CSE [SA1].

Techniki konstruowania c-granul można traktować jako techniki konstruowania i doskonalenia przybliżeń ważnych (dla agenta) pojęć (dotyczących złożonych zjawisk z rzeczywistego świata) dla celów ich modelowania w systemie obliczeń.

W przeciwieństwie jednak do innych metod modelowania np. za pomocą obiektów, zakłada się tutaj, że na ogół c-granula wyposażona jest w mechanizm osądu (ang. judgment) postrzeganych zjawisk w otwartym środowisku oraz wyposażona jest w mechanizmy "samodoskonalenia", tzn. może z czasem coraz doskonalej przybliżać docelowe pojęcie (na bazie wbudowanych mechanizmów uczenia się) m.in. dzięki

¹<http://www.businessdictionary.com/definition/effectiveness.html>.

W całym autoreferacie wyraz "skuteczność" jest tłumaczeniem angielskiego wyrazu "effectiveness" oraz wyraz "efektywność" jest tłumaczeniem angielskiego wyrazu "efficiency".

²<http://dictionary.cambridge.org/grammar/british-grammar/efficient-or-effective>

³<http://www.businessdictionary.com/definition/efficiency.html>

jawnie jej przypisanym mechanizmom interakcji z otoczeniem, przypadkom użycia tego pojęcia oraz dzięki ewentualnej komunikacji z innymi c-granulami.

Stosowanie takiego systematycznego doskonalenia przybliżania ważnych pojęć (używanych w projekcie) w dużym stopniu zwiększa szanse poprawnego rozumienia kluczowych pojęć dotyczących tego projektu (np. specyfikacja wymagań) oraz zmniejsza ryzyko jego niepowodzenia.

Położenie nacisku na interakcyjne obliczenia granularne jako metodę opisu projektowanego, konstruowanego i wdrażanego systemu ma z jednej strony zwrócić uwagę na to, że projekt nie jest obiektem statycznym, lecz się rozwija na zasadach analogicznych do wykonywania obliczeń ("obliczenia naturalne"). Z drugiej strony projektowany system nie jest obiektem zamkniętym, ale otwartym na nieprzewidywalne skutki interakcji wewnątrz i na zewnątrz projektu. Wreszcie to te czynności interakcji są źródłem rozwoju komponentów, c-granul, generują one strumień danych wspierające mechanizmy uczenia się c-granul.

Techniki konstruowania c-granul dostarczają również narzędzi zarządzania skutecznością i efektywnością (w tym ryzykiem) realizacji priorytetowych potrzeb agentów (które również są reprezentowane przez c-granule). Wsparcie to jest niezbędne do realizacji obliczeń IGrC w otwartym i tylko częściowo znanym środowisku. W szczególności modele obliczeń realizowanych w zamkniętym świecie (np. za pomocą modeli obliczeń realizowanych na maszynie Turinga) nie muszą brać pod uwagę zarządzania ryzykiem niepowodzenia obliczeń spowodowanego nieprzewidywanymi zdarzeniami o otwartym świecie. Szerzej wyjaśniamy to w kontekście przedstawienia trudności dotyczących FP3C (por. punkt 5 w Sekcji 4.3.3.1 w Autoreferacie). Ponadto, w Rozdziale 36 w [SA1] w tabelach 36.1-36.9 przedstawione jest podsumowanie kluczowych różnic między klasycznymi modelami obliczeń bazującymi na maszynie Turinga oraz modelami IGrC bazującymi na c-granulach.

Jednym z głównych celów badań habilitanta jest opracowanie mechanizmów sterowania obliczeniami w IGrC, umożliwiających modelowanie procesów realizacji danego projektu w celu maksymalizacji szans sukcesu realizacji tego projektu przy jednoczesnej minimalizacji pojawiających się ryzyk. W tym zakresie m.in. **sterowanie IGrC jest silnie wspierane przez odpowiednią selekcję oraz adaptacyjne wdrażanie (zwłaszcza wśród interesariuszy projektu) zasad realizacji projektów** (por. Rozdział 14, Część IV i Aneks z [SA1]).

Zasady te są wynikiem bogatych praktycznych doświadczeń zdobytych przez habilitanta i stanowią przykłady c-granul wyrażonych z uży-

ciem złożonych pojęć nieostrych (ang. vague concepts). Same pojęcia nieostre są również reprezentowane przez c-granule.

Warto podkreślić, że c-granule ewoluują w czasie. W szczególności, znaczenie pojęć reprezentowanych przez c-granule, także podlega zmianie. Jest to wynikiem interakcji c-granul z otoczeniem, poprzez które na ogół jest pozyskiwana jedynie niepełna informacja i nieperfekcyjna wiedza o tym otoczeniu. Interakcje te mogą być inicjowane i/lub monitorowane przez sterowanie agenta zarządzającego tymi granulami i/lub przez autonomiczne sterowanie c-granul. W przypadku, gdy agenci (i/lub c-granule z autonomicznym sterowaniem) stosują się do odpowiednio dobranych do celów współdziałania *reguł interakcji* (w przypadku realizacji projektów są to *zasady realizacji projektów*), to zwiększają się szanse sukcesu osiągnięcia zakładanych celów tego współdziałania. Użyteczność tej metodologii została zilustrowana w osiągnięciu naukowym za pomocą zasad zastosowanych przez autora w trakcie realizacji projektów: POLTAX, AlgoTradix, Merix i Excavio, przedstawionych w Części IV [SA1].

Ponadto, w [SA1] (por. Rozdziały 1, 3, 24, 28, 30 i 36 z [SA1]) zasygnalizowano istotne związki IGrC z wieloma dynamicznie rozwijanymi dziedzinami badań naukowych na świecie, a także podkreślono charakterystyczne cechy proponowanego przez habilitanta podejścia do IGrC.

Wyniki przedstawione w *osiągnięciu naukowym* stanowią kontynuację badań nad różnymi aspektami paradygmatu Wisdom Technology (WisTech), zapoczątkowanego i rozwijanego we współpracy z Profesorem Andrzejem Skowronem, (por. [SA2, SA3, SA4, SA5], a także [PA03, PA04, PA40-PA46]).

Należy podkreślić, że *osiągnięcie naukowe* dotyczy bardzo ważnej i złożonej problematyki. Niektórzy autorzy zaliczają ją do najważniejszych wyzwań XXI wieku (np. [192]). Przedstawiane *osiągnięcie naukowe* stanowi pierwszy krok na drodze do rozwiązania tych problemów przynosząc początkowe rozwiązania koncepcyjne i rozważania i wskazując kierunki dalszych badań bazujących na motywacjach wymienionych w Sekcji 4.3.2 Autoreferatu.

4.3.2 Kontekst i motywacja badań związanych z *osiągnięciem naukowym*

Osiągnięcie naukowe “Modele interakcyjnych obliczeń granularnych w realizacji złożonych systemów na etapie projektowania, konstruowania i wdrażania” zostało opracowane głównie na podstawie wniosków, które nasunęły się habilitantowi w trakcie ponad czterdziestu lat nabywa-

nia praktycznego doświadczenia. Habilitant uczestniczył w tym czasie w realizacji, zarządzaniu, nadzorowaniu i/lub monitorowaniu około 200 rzeczywistych projektów.

Jednym z najważniejszych wniosków wyciągniętych przez habilitanta z tych praktycznych doświadczeń jest wyodrębnienie pewnych procesów mających szczególnie istotne znaczenie dla zapewnienia skutecznej i efektywnej realizacji złożonych projektów. W tym kontekście, niezwykle istotne są procesy mające na celu odkrywanie, przetwarzanie, wykorzystywanie, tworzenie i komunikowanie możliwie najlepszych aproksymacji “ważnych pojęć” dla realizacji projektu oraz interakcyjne doskonalenie ich pojmowania przez interesariuszy projektu. Dotyczy to zwłaszcza takich pojęć, które są istotne przy konstruktywnym, skutecznym i efektywnym rozwiązywaniu problemów pojawiających się w trakcie realizacji danego projektu.

Te *ważne pojęcia* są modelowane, przybliżane, a także reprezentowane (por. [SA1], [SA2]), za pomocą c-granul wykorzystywanych i przetwarzanych przez sieci agentów. Granule te odgrywają podstawową rolę w procesach tworzenia, przetwarzania archiwizowanej wiedzy przez sieci c-granul należących do jednego agenta czy też zespołu albo sieci agentów. Każdy agent używa również c-granule do postrzegania innych agentów albo swoich sieci c-granul.

Innymi słowy, procesy mające na celu przetwarzanie “ważnych pojęć” są reprezentowane i badane w [SA1] (oraz w innych pracach, np. [SA2]) za pomocą obliczeń wykonywanych na c-granulach, modelowanych z wykorzystaniem pojęć i narzędzi bazujących na interakcyjnych obliczeniach granularnych (IGrC). W tym podejściu “ważne pojęcia” również są przybliżane (aproksymowane) i reprezentowane przez c-granule.

Należy zwrócić uwagę na to, że pojęcie “agent” (w używanym przez nas znaczeniu) odnosi się zarówno do osób jak również i do fizycznych urządzeń przetwarzających dane (w tym “inteligentnych” robotów lub softbotów). Sieci takich agentów mogą ze sobą współpracować w celu rozwiązywania różnych problemów (np. problemów związanych ze spełnianiem potrzeb pojedynczych agentów lub sieci agentów). Sieci agentów mogą również współzawodniczyć z innymi sieciami w dążeniach do spełnienia konkretnych potrzeb agentów. Każdy agent lub sieci agentów są również c-granulami (wyższego rzędu).

Przez ostatnie kilkadziesiąt lat jesteśmy świadkami dynamicznego rozwoju badań prowadzonych przez wiele różnych ośrodków badawczych i firm na świecie nad sieciami agentów i ich wykorzystaniem we wspieraniu procesów rozwiązywania problemów dotyczących złożonych

systemów, zwłaszcza w dziedzinie CSE. Badania w tym zakresie mają szerokie odzwierciedlenie w literaturze naukowej związanej z badaniami złożonych sieci i CSE (np. [5, 9–11, 26, 34, 35, 39–41, 44, 46, 48, 51–53, 71, 72, 85, 88, 103, 106, 117, 118, 126, 131, 136, 137, 148, 150, 151, 158, 164, 166, 177, 204, 209, 214, 218, 221, 231]).

W tym miejscu warto wyróżnić kilka zagadnień charakterystycznych dla podejścia prezentowanego w *osiągnięciu naukowym*, które dotyczą złożonych sieci agentów i/lub złożonych sieci c-granul. Są one następujące:

1. *Fizyczna natura sieci c-granul i obliczeń na c-granulach w IGrC.* Ta fizyczna natura oznacza, że sieci, c-granule i obliczenia są osadzone (ugruntowane) w fizycznej rzeczywistości i podlegają prawom obowiązującym w tej rzeczywistości.
2. *Założenie o ograniczonym dostępie agentów oraz c-granul do wiedzy o świecie.* Wiedzę tę można odkrywać, pozyskiwać i/lub uczyć się jej wyłącznie poprzez interakcje między c-granulami i środowiskiem (w tym interakcje między agentami czy też ich zespołami).
3. *Otwartość i złożoność świata charakteryzujące się, m.in. występowaniem nieoczekiwanych zaburzeń.* Cechy te powodują konieczność tworzenia wielu różnych alternatywnych adaptacyjnych modeli lokalnych aspektów rzeczywistości (którą zainteresowany jest dany agent czy też społeczność agentów) oraz adaptacyjnych metod agregacji tych, często wzajemnie sprzecznych ze sobą modeli.

Modele te obejmują mechanizmy ciągłej weryfikacji poprzez percepcję interakcji w otoczeniu i poprzez sterowanie przebiegiem interakcji. Podstawowym celem tej weryfikacji jest ocena stosowanych modeli zwłaszcza pod kątem tego, w jakim stopniu aktualnie stosowane modele odzwierciedlają występujące i/lub przewidywane zjawiska w środowisku oraz jaka jest jakość adaptacji tych modeli do obserwowanych odstępstw między stanem przewidywanym i stanem faktycznym środowiska.

4. *Założenie, iż analizowanie, modelowanie i rozwiązywanie problemów związanych ze złożonymi systemami wymaga wzięcia pod uwagę interakcji między agentami (sieciami agentów) a otoczeniem.* Poprzez interakcje agenci coraz lepiej poznają środowisko i odkrywają coraz to doskonalsze aproksymacje złożonych pojęć reprezentujących koncepcyjne narzędzia do rozwiązywania problemów (narzędzia te są reprezentowane przez sieci c-granul).

5. *Bezpośrednie lub pośrednie postrzeganie obiektów fizycznych.* Postrzeganie bezpośrednie realizowane jest poprzez bezpośredni pomiar stanów obiektów (tzw. *obektów mierzalnych*). Wyniki tych pomiarów są reprezentowane, np. jako wartości cech albo jako stopnie spełnialności formuły określającej badaną własność obiektu mierzalnego.

Postrzeganie pośrednie realizowane jest poprzez stworzenie najpierw odpowiedniej konfiguracji fizycznych obiektów. Następnie konfiguracja ta jest wykorzystywana do uruchomienia nowych procesów interakcji tak, aby można było zidentyfikować stan tych obiektów, które nie są bezpośrednio mierzalne. Dokonywane jest to poprzez pomiar stanu odpowiednich mierzalnych obiektów w konfiguracjach, na które wpływ mają wspomniane interakcje. Postrzeganie pośrednie jest możliwe dzięki wyuczaniu się odpowiednich reguł interakcji.

6. Wykorzystywanie *mechanizmów samoorganizacji systemów złożonych* [130, 200, 257].
7. Postrzeganie zachowań zespołu c-granul w sposób analogiczny do *ekorytmów Valianta* [234, 235]. Kluczową rolę odgrywa tu uczenie się *reguł interakcji* c-granul. Uczenie się tych reguł interakcji umożliwia odkrywanie wiedzy, która nie została wcześniej zgromadzona przez agenta (agentów), a jednocześnie odgrywa istotną rolę w procesie decyzyjnym, dotyczącym np. sterowania obliczeniami prowadzonymi na c-granulach.

Powyższa lista nie zawiera wszystkich zagadnień charakterystycznych dla podejścia do obliczeń na c-granulach realizowanych przez sieci agentów, które przedstawiono w [SA1]. Jednakże lista ta daje pogląd o własnościach wyróżniających zaproponowane podejście od innych istniejących podejść, a w szczególności lista ta wskazuje na kluczową rolę interakcji i c-granul w proponowanym podejściu.

Warto podkreślić, że oprócz dziedziny obejmującej złożone sieci istnieje wiele innych aktualnie rozwijających się dziedzin badawczych, które w sposób istotny związane są z różnymi aspektami interakcyjnych obliczeń granularnych w systemach złożonych. Dotyczy to szczególnie systemów złożonych obejmujących ludzi (np. sieci społeczne), sieci urządzeń przetwarzających dane oraz interakcji między ludźmi i urządzeniami (np. urządzeniami pozyskującymi i przetwarzającymi dane). Te intensywnie rozwijające się obszary badań związane są między innymi z takimi dziedzinami jak:

- a. uczenie maszynowe, eksploracja danych i rozpoznawanie wzorców/obrazów (w szczególności analityka dużych zbiorów danych) (ang.

machine learning, data mining, and pattern recognition (in particular, big data analytics));

- b. systemy wieloagentowe (ang. *multi-agent systems*);
- c. niekonwencjonalne metody obliczeń (w szczególności modele obliczeń bazujące na interakcjach, ekorytmach) (ang. *nonconventional models of computing, in particular, computing models based on interaction, ecorithms*);
- d. kognitywistyka (ang. *cognitive science*);
- e. podejmowanie decyzji przy niepełnej czy też nieperfekcyjnej informacji, systemy wspierające podejmowanie decyzji (ang. *decision making under uncertainty, decision support systems*);
- f. interakcja człowiek-komputer (ang. *human-computer interaction*);
- g. systemy samoorganizacji (ang. *self-organizing systems*);
- h. sterowanie adaptacyjne i złożone systemy adaptacyjne (ang. *adaptive control and complex adaptive systems (CAS)*);
- i. inżynieria systemów złożonych (ang. *complex systems engineering (CSE)*);
- j. Internet i sieci semantyczne, systemy cyberfizyczne, Internet rzeczy, sieci mądrych rzeczy, a także systemy ultra-dużej skali (ang. *Internet and semantic Web, cyber-physical systems, Internet of things (IoT), wisdom Web of things (W2T), and ultra-large-scale systems*);
- k. złożone biomedyczne systemy (ang. *complex biomedical systems*);
- l. sieci społecznościowe (ang. *social networks*);
- m. przetwarzanie języka naturalnego (ang. *natural language processing*);
- n. zarządzanie ryzykiem (ang. *risk management*).

Więcej przykładów takich dziedzin i odpowiednich odniesień do literatury można znaleźć w Rozdziale 3 [SA1]. W [SA1] dyskutowane są również silne wzajemne powiązania między wyżej wspomnianymi dziedzinami (szczególnie z punktu widzenia IGrC). Jednocześnie podkreślono, że (i) wszystkie te dziedziny można wzbogacić poprzez bardziej pogłębiony rozwój podstaw IGrC, a z drugiej strony, (ii) wyniki osiągnięte w tych dziedzinach mogą wzbogacić wiedzę o IGrC.

Powyższe obserwacje wskazują również na duże znaczenie metod bazujących na interakcyjnych obliczeniach granularnych jako narzędzi do modelowania realizacji złożonych projektów. W tym kontekście habilitant dążył do zainicjowania badań bazujących na IGrC - wspierających

sterowanie obliczeniami w IGrC. Jednym z podstawowych celów tych badań jest opracowanie metodologii i metod sterowania procesami implementacji złożonych projektów w celu maksymalizacji szansy pomyślnego ich zakończenia przy jednoczesnej minimalizacji pojawiających się ryzyk i kosztów. W tym kontekście, sterowanie IGrC okazuje się prowadzić do optymalnej selekcji, adaptacji, wdrażania i oceniania jakości przestrzegania *zasad realizacji projektu*. W przypadku realizacji projektów zasady te są szczególnym przypadkiem *reguł interakcji* odnoszących się do różnych innych typów modeli IGrC.

W szczególności, w realizowanych i/lub monitorowanych projektach habilitant stosował zarówno odpowiednio dobrane i zaadaptowane powszechnie znane zasady (np. [50, 54, 122, 240, 241, 247]) a także specjalnie opracowane i wdrożone przez niego zasady (por. Rozdział 14, Części IV, VIII oraz Aneks z [SA1]) na potrzeby projektów uruchomionych i realizowanych pod jego kierunkiem (m.in. projekty te przedstawiane w Rozdziałach 16-19 z [SA1]).

Zebrane przez habilitanta *rodziny zasad* (ang. principles) realizacji złożonych projektów (ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki projektów przedstawionych w drugiej części książki) **mogą być wykorzystane przez sponsorów, menedżerów oraz inżynierów złożonych projektów. Umiejętne stosowanie tych zasad powinno - zgodnie z pozyskanym przez habilitanta doświadczeniem - przyczynić się do zwiększenia efektywności realizacji projektów, zmniejszenia ryzyk w tych projektach i zmniejszenia negatywnych konsekwencji (w tym ponoszenia zbędnych kosztów) działań w projektach wynikłych z rozbieżności między teorią i praktyką.** Warto dodać, że w przyszłości zasady te mogą być wykorzystywane do wspomagania automatyzacji procesów sterowania realizacją złożonych projektów.

Z drugiej strony, zebrane przez habilitanta, w ciągu tych wielu lat doświadczeń, wnioski zostały wykorzystane w badaniach naukowych zmierzających do głębszego zrozumienia mechanizmów funkcjonowania i rozwoju złożonych systemów, ze szczególnym uwzględnieniem CAS [107, 108, 153, 200, 203, 245].

Z punktu widzenia treści książki wchodzącej w skład osiągnięcia naukowego szczególnie ważne są przykłady projektów typu CSE, dotyczące projektów specyficznych dla inżynierii złożonych systemów CSE [22, 54, 69, 165, 203]. **Same te projekty też mogą być traktowane jako złożone (meta-)systemy adaptacyjne mające na celu doprowadzenia do skonstruowania CAS o wymaganych właściwościach.**

W badaniach naukowych (np. nad modelami obliczeń dla CAS) ha-

bilitant brał pod uwagę systemy CAS różnych typów, w szczególności:

1. Złożone systemy adaptacyjne związane z projektowaniem i implementacją oprogramowania, w których, w ramach planowania i realizacji, współpracują duże zespoły projektowe i zespoły interesariuszy.
2. Złożone systemy adaptacyjne realizowane z wykorzystaniem Internetu rzeczy (IoT) [105] oraz sieci mądrych rzeczy (W2T) [259], [SA5].
3. Biologiczne złożone systemy z wykorzystaniem obliczeń naturalnych (ang. natural computing) [200]. Obejmują one, w szczególności uczenie się wzorców zachowań przez społeczności organizmów żywych działających w zespołach (np. bakterie, owady, ptaki, ryby, ssaki) [200] w celu zespołowego rozwiązywania problemów przetrwania (np. przez kolonie bakterii [18]).
4. Ogólne modele CAS [245] z uwzględnieniem istniejących matematycznych modeli systemów uczących się [58, 192, 234, 238], technologii sieci neuronowych [4, 17, 20, 60, 67, 154], jak również ekorytmów i modelowania obliczeń w niszach ekologicznych [104, 234, 235].
5. Złożone systemy adaptacyjne dla modelowania życia społecznego (ang. Computational Models of Social Life) [153].

W systemach tych występują “inteligentni” agenci (np. ludzie i/lub zwierzęta i/lub “inteligentne” roboty). Na ogół agenci mają swoje potrzeby i starają się je realizować samodzielnie i/lub we współpracy i/lub poprzez współzawodnictwo agentów oddziaływających na siebie (poprzez różnorakie interakcje).

Bardziej szczegółową dyskusję na temat kontekstu i motywacji *naukowego osiągnięcia* można znaleźć w Rozdziale 1 w [SA1].

4.3.3 Podstawowe wyniki *osiągnięcia naukowego*

Wyniki naukowe zawarte w *osiągnięciu naukowym* koncentrują się wokół problemów związanych z:

- A. Identyfikacją i analizą przyczyn luki (ang. gap) między teorią i praktyką (patrz Część III w [SA1], por. [9, 32, 33, 122, 171, 240, 241, 247]). Luka ta występuje przy realizacji projektów typu CSE, a zwłaszcza projektów typu CSE, prowadzących do wytwarzania nowych systemów oprogramowania oraz technologii bazujących na sztucznej inteligencji (ang. artificial intelligence - AI). Podstawą

tych rozważań są wnioski z projektów przedstawionych w czwartej części książki [SA1] pt. Case Studies oraz liczne publikacje i eksperckie raporty na ten temat (w tym zasygnalizowane w trzeciej części książki [SA1], a zwłaszcza w Rozdziałach 11-14).

Wielu naukowców oraz inżynierów zgadza się z tezą Lindy Northrop wyrażoną w pierwszym motto książki [SA1] (wchodzącej w skład osiągnięcia) stwierdzającą [171], że pomimo dużych postępów w badaniach nad technikami skutecznej realizacji bardzo dużych projektów typu CSE, nadal obserwujemy *szybko rosnącą lukę między prowadzonymi badaniami oraz rzeczywistością* (ang. *fast growing gap between our research and reality*).

- B. Opracowaniem technik modelowania mechanizmów “inteligentnych” interakcji między agentami (np. ludzie i/lub roboty) oraz obliczeń będących konsekwencją tych interakcji w złożonych systemach (zwłaszcza typu CAS) - patrz Część V w [SA1]. Przez “inteligentne” interakcje rozumiemy, m.in. oddziaływania agentów z otoczeniem prowadzące do wzorców zachowań zmierzających do zaspokojenia ich priorytetowych potrzeb. Zakładamy, że obejmuje to, m.in. następujące potrzeby:
1. potrzebę percepcji sytuacji (rozumianej jako proces prowadzący do zrozumienia postrzeganych sytuacji) oraz interpretacji własności postrzeganych interakcji zachodzących w środowisku (zwłaszcza własności interakcji potrzebnych do zaplanowania i realizacji priorytetowych potrzeb agenta oraz możliwie “komfortowego” przetrwania i rozwoju agenta),
 2. potrzebę sterowania przez agenta interakcjami dla zapewnienia realizacji jego priorytetowych potrzeb,
 3. potrzebę rozumowań agentów o postrzeganych interakcjach w celu zwiększania skuteczności i efektywności działania i/lub współdziałania czy współzawodnictwa agentów,
 4. potrzebę uczenia się pojęć reprezentujących priorytetowe potrzeby agenta i doskonalenie technik realizacji tych potrzeb, bazujących na rozumowaniach o własnościach, m.in. pojęć reprezentujących priorytetowe potrzeby agenta.
- C. Opracowaniem, na bazie odpowiednich modeli obliczeń (por. B), zestawu zaawansowanych narzędzi technicznych (Część VI, VII, VIII w [SA1]) zmierzających do:
- (a) głębszego zrozumienia przyczyn luki (o której mowa w punkcie A);

- (b) minimalizacji negatywnych konsekwencji luki (o której mowa w punkcie A);
- (c) maksymalizacji jakości (w tym skuteczności i efektywności) obliczeń modelowanych za pomocą technik, o których mowa w punkcie B.

W *osiągnięciu naukowym* można wyróżnić następujące zasadnicze części:

- I. Opisy wybranych przykładów projektów projektowanych i realizowanych pod kierunkiem habilitanta (POLTAX, AlgoTradix, Merix, Excavio). W opisach tych szczególnie podkreślone są *zasady* (ang. principles) CSE, które stosowane były do sterowania procesami projektowania i realizacji tych projektów, zmierzające do maksymalizacji szans osiągnięcia zakładanych efektów.
- II. Analiza wniosków wynikających ze zrealizowanych i/lub monitorowanych przez habilitanta zadań projektowania, modelowania i realizacji złożonych projektów i systemów. Analiza ta ma na celu osiągnięcie pewnego zbliżenia do rozwiązań problemów poruszonych w powyższych punktach A, B oraz C. To zbliżenie osiągnięto głównie poprzez opracowanie podstaw konstruowania modeli obliczeń stanowiących bazę dla opracowania: (i) narzędzi do wspomagania rozwiązywania problemów A, B i C w systemach złożonych, jak również (ii) syntezy (w tym projektowania i implementacji) oraz analizy systemów złożonych. Najbardziej istotne wyniki obejmują:
 - II.a. Opracowanie modeli obliczeń dla analizowanych problemów i metod rozumowań o obliczeniach realizowanych za pomocą tych modeli oraz metod reprezentacji wiedzy wspierającej te rozumowania. Obejmuje to:
 - II.a.1. Propozycję modeli obliczeń w IGrC jako podstawy dla wspomagania syntezy (obejmującej projektowanie i implementację) oraz analizy złożonych projektów i/lub systemów (zwłaszcza w zakresie badań problemów poruszonych w powyższych punktach A, B oraz C).
 - II.a.2. Propozycje metod pozyskiwania wiedzy i jej reprezentacji (np. za pomocą reguł interakcji, wspierających planowanie i realizację priorytetowych celów agenta). Dotyczy to pozyskiwania, odkrywania i reprezentacji zarówno wiedzy ogólnej jak i wiedzy dziedzinowej, wspierających skuteczne wykorzystywanie (przez agenta i/lub społeczność

agentów) tej wiedzy w realizowanych projektach czy też systemach.

II.b. Opracowanie metod sterowania obliczeniami w IGrC, realizowanymi przez agentów (lub ich społeczności) w złożonych systemach. Celem tego sterowania jest realizacja adaptacyjnie zmieniających się potrzeb agentów (lub ich społeczności). Metody te obejmują podstawy sterowania obliczeniami w IGrC ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań, o których mowa w powyższych punktach A, B oraz C. Podstawy te bazują na autorskim podejściu do zarządzania skutecznością i efektywnością obliczeń w IGrC (w tym ryzykiem i ryzykiem) przez agentów (lub społeczności agentów) realizujących te obliczenia.

Ad. I.

Rozdział IV książki [SA1] zawiera opisy wybranych oryginalnych osiągnięć, które powstały w ramach projektowanych przez habilitanta i realizowanych pod jego kierunkiem takich złożonych projektów jak: POLTAX, Merix, AlgoTradix i Excavio.

System POLTAX (por. Rozdział 16 w [SA1]) jest już eksploatowany i rozwijany w Polsce przez około ćwierć wieku. System ten umożliwia skutecznie zasilanie budżetu Polski poprzez administrację podatkową. W szczególności obejmuje on centralny rejestr podatników, rachunkowość, kontrolę skarbową oraz rozliczanie należności podatkowych wynikających z takich podatków, jak: PIT, CIT oraz VAT.

POLTAX a także inne projekty realizowane pod kierunkiem autora, m.in.: w Ministerstwie Finansów, BGŻ, BGK, PKN ORLEN, PERN/OLPP, RUCH bazowały na kulturze pracy w Polsce. Jednak przedstawione w książce [SA1] wnioski odnoszą się również do doświadczeń habilitanta wynikających z wielu projektów realizowanych w istotnie różnych kulturach pracy, tradycjach oraz zróżnicowanych uwarunkowaniach historycznych, politycznych i technologicznych.

Wśród projektów realizowanych i/lub monitorowanych przez habilitanta są:

- (a) kluczowe projekty realizowane dla potrzeb administracji publicznej w ciągu pierwszych około trzech dekad przemian systemowych w Polsce, poczynając od 1990 r.,
- (b) projekty naukowe i edukacyjne realizowane w ośrodkach akademickich, projekty R&D dla firm prywatnych (w Polsce, USA i Japonii),

- (c) projekty dotyczące wdrożonych zastosowań przemysłowych (w Polsce, USA i Japonii).

W celu ilustracji różnorodności - przedstawionych w [SA1] - praktycznych doświadczeń habilitanta w realizacji projektów o naukowym charakterze zmierzających do rozwoju nowych technologii bazujących na AI (odbiegających od podstawowej merytorycznej specyfiki projektu POLTAX) przedstawiono następujące dwa przykłady analizowane szczegółowo w książce [SA1]:

1. Opracowanie koncepcji i architektury interakcyjnego systemu Excavio do "inteligentnego" wyszukiwania informacji w dokumentach przechowywanych w sieci serwerów. Technologie zaproponowane przez autora i rozwinięte pod jego kierunkiem w ramach opisanego w Rozdziale 19 projektu Excavio, stanowiły podstawę do złożenia w USA, wspólnie ze Zbigniewem Michalewiczem dwóch patentów naukowo-przemysłowych w zakresie rozwoju sztucznej inteligencji. Patenty te dotyczą technik inteligentnego dialogowego wyszukiwania dokumentów w Internecie. Według Google Scholar patenty [PT1] oraz [PT2]^{4,5} mają około 260 cytowań, w tym czołowych ośrodków naukowo-badawczych (R&D) i przemysłowych na świecie prowadzonych przez takich gigantów jak: IBM, Google, Microsoft, Yahoo!, Hewlett-Packard, Oracle, Matsushita Electric, NEC, Fuji, Xerox, Canon, Boeing, Sony.
2. Opracowanie koncepcji i architektury systemu algorytmicznego handlu (ang. algorithmic trading) na międzynarodowych rynkach finansowych (ang. forex). Koncepcja ta oraz architektura zostały zaimplementowane, rozwinięte i wdrożone przez Grupę AdgaM (lata 2006-2011) w ramach przedstawionego w Rozdziale 17 książki [SA1] - projektu AlgoTradix. Zbudowane w tym przedsięwzięciu *softboty* (tzn. softwarowe roboty) były przez półtora roku (2009/IX – 2011/III) testowane na wielu międzynarodowych platformach finansowych (USA, UE i Japonia), w tym także z użyciem prawdziwych pieniędzy na platformie OANDA (NY, USA). Na platformie OANDA roboty te autonomicznie zrealizowały wówczas około 24 tysięcy pozycji - z których 80% było wygranych.

Projekt AlgoTradix w znacznej mierze bazował na opisanych w książce [SA1] technologiach interakcyjnych obliczeń granularnych reali-

⁴https://scholar.google.pl/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=zVpMZBkAAAAJ&citation_for_view=zVpMZBkAAAAJ:u5HHmVD_u08C

⁵https://scholar.google.pl/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=zVpMZBkAAAAJ&citation_for_view=zVpMZBkAAAAJ:9yKSN-GCB0IC

zowanych przez społeczności softbotów w ramach programu rozwoju badań nad paradygmatem Wisdom Technology (WisTech) [SA2, SA3] oraz [PA39, PA40, PA41].

Projekt ten również dostarczył obszernego empirycznego materiału dla przedstawionych w książce [SA1] badań naukowych nad rozwojem technik modelowania obliczeń realizowanych przez systemy wieloagentowe.

Ad. II.

Przedstawione w książce [SA1] wnioski są wynikiem długotrwałych oraz intensywnych prac eksperymentalnych i badań naukowych prowadzonych przez habilitanta. W szczególności kluczowe wnioski są bardziej szczegółowo omówione w Rozdziałach 21, 33–36 książki [SA1].

Jednym z tych wniosków jest sformułowanie podstawowej przyczyny (praprzyczyny (ang. precause)) rozbieżności pomiędzy teorią i praktyką (por. Sekcja 1.2.2 oraz Część III w [SA1]). Istotne wnioski z tych rozważań przedstawiono w dalszej części Autorefeatu (zwłaszcza w omówieniu punktów II.a. oraz II.b).

Ad. II.a.

W książce [SA1] jako modele obliczeń zaproponowano *interakcyjne obliczenia granularne* (obliczenia w IGrC), a jako metody rozumowania o własnościach tych obliczeń przyjęto metody IGrC bazujące na *adaptacyjnym osądzie* (ang. adaptive judgment).

Obliczenia w IGrC realizowane są za pomocą c-granul, które pozwalają rejestrować, analizować i syntetyzować własności interakcji obiektów fizycznych postrzeganych przez agentów.

Przyjmujemy, że stany pewnych obiektów fizycznych występujących w zakresie dziedziny działania danej c-granuli są bezpośrednio mierzalne. Natomiast stany innych obiektów mogą być postrzegane (aproksymowane) pośrednio za pomocą stanów mierzalnych. Ma to miejsce dzięki interakcjom obiektów fizycznych z zakresu dziedziny działania c-granuli. Każdemu stanowi mierzalnemu c-granuli (w zadanej chwili czasu agenta) odpowiada pojęcie rozumiane jako zbiór sytuacji (konfiguracji obiektów fizycznych) postrzeganych w obrębie tej c-granuli, które dzięki interakcjom prowadzą do tego stanu. W zaproponowanym podejściu pojęcie stanu mierzalnego oznacza możliwość reprezentowania takiego stanu, np. za pomocą *wartości* odpowiadającego mu atrybutu lub *stopnia spełnialności* odpowiadającego mu pojęcia czy też formuły. W wyniku agregacji c-granul mogą być konstruowane bardziej złożone c-granule odpowiadające obiektom strukturalnym, ich własnościom, czy też odpowiadające relacjom na stanach mierzalnych (np. *relacje preferencji*).

W szczególności, c-granule umożliwiają rejestrację zarówno rezultatów pomiarów sensorycznych jak i hierarchiczną ich agregację prowadzoną w celu odkrywania nowych c-granul. Odkrywane w ten sposób hierarchiczne c-granule mogą umożliwić głębsze zrozumienie postrzeganej sytuacji (por. [16, 57]). Powyższe sformułowanie dotyczące agregacji c-granul (reprezentujących hierarchiczne agregacje rezultatów pomiarów sensorycznych) nawiązuje do głównego, wg Valianta⁶, wyzwania AI, polegającego na charakteryzacji “konstrukcyjne bloki obliczeniowe” (ang. computational building blocks) dla percepcji (por. również [234, 235]).

Adaptacyjny osąd odgrywa kluczową rolę w ocenie tego, co aktualnie jest ważne, a co drugoplanowe. W związku z tym, stanowi też podstawę do oceny i doskonalenia realizowanych poprzez sterowanie planów interakcji. W pewnym sensie osąd (ang. judgment) [89, 90, 114, 121, 160, 236], może być traktowany, jako rozszerzenie pojęcia racjonalnego rozumowania (zwłaszcza dotyczącego własności obliczeń w IGrC) przez konieczność uwzględnienia oprócz mechanizmów odnoszących się wyłącznie do rozumowań logicznych, również innych mechanizmów wpływających na podejmowane decyzje. Przykładowo mechanizmy te dotyczą percepcji, emocji, instynktu, nawyków, intuicji, szybkiego myślenia (ang. *fast thinking*) [114], jak również doświadczenia. Zatem adaptacyjny osąd nie ogranicza się jedynie do dedukcji i indukcji czy też abdukcji. Ponadto głębsze zrozumienie pojęcia adaptacyjnego osądu powinno mieć istotne wsparcie również ze strony psychologii oraz fenomenologii [SA1].

Kluczową rolę w zaproponowanym podejściu odgrywają techniki adaptacyjnego interakcyjnego odkrywania (poprzez interakcje ze środowiskiem) i używania c-granul.

Okazuje się tu, że dla realizacji obliczeń na c-granulach, zamiast klasycznych algorytmów winny być raczej zastosowane, np. ekorytmy (ang. *ecorithms*) w sensie Valianta [234, 235].

Oprócz analogii do ekorytmów Valianta, proponowane w książce algorytmy bazujące na modelach obliczeń w IGrC mają szereg innych cech nawiązujących do badań naukowych w innych dziedzinach (takich jak, np. systemy uczące się, adaptacyjne systemy złożone, obliczenia elastyczne (ang. *soft-computing*), systemy wieloagentowe, obliczenia naturalne). W szczególności, modele obliczeń w IGrC dotyczą również samych podstaw AI, a w szczególności rozumienia istoty maszynowego uczenia się.

Przy zastosowaniu zaproponowanego w książce [SA1] podejścia, **projektowanie i realizacja złożonego projektu mogą być postrzegane**

⁶<http://www.seas.harvard.edu/directory/valiant>

jako odkrywanie, uczenie się, przetwarzanie (w tym komunikowanie i rozumowanie o własnościach pojęć) oraz rozwijanie (adaptacyjne doskonalenie) pojęć (reprezentowanych jako c-granule) i schematów rozumowań na tych pojęciach (również reprezentowanych jako c-granule) niezbędnych do realizacji projektu.

Zagadnienia związane z punktem II.a opisane są szczegółowo w Rozdziałach 22-32 [SA1]. W szczególności, problematyka tzw. *ramowych postulatów WisTech* (ang. Framework Postulates for WisTech) (FPW) omawiana jest w Rozdziale 32. Postulaty te stanowią koncepcyjne ramy (wieży), w ramach których winny być realizowane obliczenia w IGrC. Złożoność tych postulatów wiąże się w szczególności z tym, że często formułowane są one za pomocą złożonych pojęć języka naturalnego, które muszą być aproksymowane przez agentów posługujących się innymi językami (np. sformalizowanymi). Pojawiające się w związku z tym problemy nawiązują do motta książki (wchodzącej w skład osiągnięcia naukowego) pochodzącego od Lotfi Zadeha oraz Judea Pearl'a.

Kolejna trudność wiąże się z tym, że uczenie się tych aproksymacji ma miejsce w środowisku, w którym pozyskiwanie wiedzy następuje między innymi poprzez postrzeganie przez agentów niektórych własności interakcji obiektów fizycznych. Tym samym trudności te bezpośrednio dotyczą zagadnień związanych z percepcją, w szczególności wyuczania się przez agentów reguł działania na podstawie postrzegania przez nich interakcji obiektów fizycznych. Kolejnym problemem jest, np. bardzo duży rozmiar i złożoność ontologii pojęć wyrażających postulaty FPW.

Ad. II.b.

Problemy związane z punktem II.b. obejmują adaptacyjne wyuczanie się przez agentów (i/lub ich społeczności) **pojęć i reguł ewolucyjnie zmieniającej się złożonej gry** definiowanej jako zbiór par (a, b) , gdzie a oznacza pojęcie określające warunki uruchomienia akcji (gdy pojęcie jest spełnione w dostatecznym stopniu), natomiast b oznacza uruchamianą akcję (lub złożony plan interakcji).

W odkrywaniu i specyfikacji tych reguł istotną rolę odgrywa wyuczanie aproksymacji złożonych pojęć, najczęściej nieostrych, których spełnienie w zadowalającym stopniu stanowi sygnał o konieczności podjęcia działań (akcji, planów), np. zabezpieczających przed rosnącym ryzykiem, albo też działań wspierających wzmocnienie pozytywnych efektów potencjalnie wynikających z rosnącego, tzw. ko-ryzyka (por. FPW-13 w Rozdziale 32 [SA1]).

W procesie podejmowania decyzji o uruchomieniu czy też wstrzy-

maniu akcji (lub planu) w aktualnej sytuacji, mamy też do czynienia z koniecznością rozstrzygania konfliktów między argumentami “za” i “przeciw” spełnialności złożonych pojęć nieostrych w tej sytuacji, decydujących o uruchamianiu poszczególnych akcji lub planów. Ogólnie, rozumowanie prowadzące do wyboru akcji i/lub planu do uruchomienia (lub wstrzymania) bazuje na adaptacyjnym osądzie, uwzględniającym między innymi ocenę ryzyka aktualnej sytuacji, wiedzę dotyczącą możliwych skutków realizacji planowanych akcji lub planów, czy też zaburzeń wywołanych przez interakcje z otoczeniem. W praktyce, w istniejących standardach zarządzania ryzykiem możemy znaleźć liczne rekomendacje dotyczące warunków oraz akcji uruchamiania zabezpieczeń (ang. controls) przed różnego typu ryzykami. **Udostępnienie i aktualizacja tego typu wiedzy złożonym systemom (w tym społecznościom sztucznych agentów) nadal stanowi wielkie wyzwanie.**

Stosując współczesne standardy warto pamiętać, że klasyczne podejście do zarządzania ryzykiem - na ogół - bazuje na podstawach ontologii pojęć zamkniętego świata opisujących zarządzanie ryzykiem. Natomiast, prezentowane w książce wchodzącej w skład osiągnięcia naukowego podejście zakłada, że semantyka pojęć opisujących zarządzanie ryzykiem (w tym samo pojęcie “ryzyka”) ewoluują w czasie. Dynamika zmian tych pojęć zależy zarówno od technik interakcji agentów ze środowiskiem jak i od nieznanymi czynników zewnętrznych.

Powyższe rozważania wskazują na zasadniczą rolę ontologii w IGrC rozumianej jako aparat pojęciowy agenta (lub społeczności agentów) wykorzystywany przy percepcji, planowaniu, działaniu, uczeniu się, czy też komunikacji. W szczególności używane przez agenta pojęcia stanowią podstawowy budulec reguł interakcji, na których bazuje sterowanie obliczeniami w celu zaspokajania adaptacyjnie zmieniających się potrzeb agentów (lub ich społeczności).

Jednak ontologie występujące w modelach obliczeń w IGrC spełniające postulaty FPW w Rozdziale 32 są bardzo złożone. Co więcej bardzo złożone są również procesy tworzenia oraz doboru niezbędnej ontologii do pozyskiwania, reprezentacji, udostępniania i aktualizacji wiedzy dziedzinowej charakterystycznej dla konkretnego zastosowania IGrC. Ontologie te bazują na wielu nieostrych złożonych pojęciach oraz relacjach między nimi.

Ponadto, należy również zdawać sobie sprawę z poważnych problemów, na które obecnie napotykamy przy próbach pozyskiwania i rozwoju ontologii, (zwłaszcza zawierających nieostre złożone pojęcia) przez sztucznych agentów. Problemy te dotyczą między innymi konieczności zrozumienia przez sztucznych agentów wielu złożonych pojęć nie-

ostrzych. W tym celu podjęto próby uczenia się aproksymacji takich ontologii (por. np. [16]). Jednak dotychczasowe wyniki badań w tym zakresie wymagają dalszego rozwinięcia. Kolejnym problemem jest konieczność udostępnienia sztucznym agentom metod rozumowań na pojęciach z tego typu ontologii, które przynajmniej w aproksymacyjnym sensie (w zadowalającym stopniu) naśladują rozumowania w języku naturalnym. Czytelnik z pewnością zauważy ponownie, że problemy te bezpośrednio nawiązują do wyzwań sformułowanych w postaci motta tej książki, które pochodzi od Lotfi Zadeha i Judea Pearla. W szczególności zaś, wspomniane problemy pojawiają się przy próbach przekazywania systemom wieloagentowym doświadczeń związanych z zarządzaniem złożonymi projektami.

Obecnie jesteśmy jeszcze bardzo daleko od opracowania w pełni skutecznych metod pozwalających na transformowanie i filtrowanie doświadczenia ludzi dotyczącego, np. zarządzania projektami na wiedzę dostępną konkretnym złożonym systemom zawierającym sztucznych agentów, które mogłyby przejąć część tych funkcji związanych z zarządzaniem projektami od ludzi i udostępnić “inteligentnym” robotom tak by były one właściwie wykorzystane.

Z drugiej strony nieodzownym wydaje się być udostępnienie - możliwie najlepszej aproksymacji - takiej wiedzy złożonym systemom. Jest to szczególnie ważne wobec braku w przewidywalnej perspektywie czasowej opracowania efektywnych technik w pełni automatycznego uczenia się i wykrywania tak złożonej wiedzy oraz skutecznego posługiwania się nią przez roboty (softboty) w sposób analogiczny do tego jak to robią ludzie. Wspomniany brak perspektyw wiąże się, m.in. ze złożonością przestrzeni przeszukiwania dla odkrywania niezbędnych pojęć potrzebnych do wyrażenia reguł interakcji sterowania obliczeniami interakcyjnymi w modelach IGrC, czy też pojęć potrzebnych do wyrażenia zasad “optymalnej” realizacji projektów typu CSE. W szczególności, pojęcia te mogą być odkrywane na podstawie doświadczeń w zarządzaniu projektami.

Z powyższego zarysu tylko niektórych aspektów, ważnych dla modelowania obliczeń złożonych systemów, wyłania się złożoność ramowych postulatów WisTech (postulatów FPW), sformułowanych bardziej szczegółowo w Rozdziale 32. Postulaty FPW obejmują te aspekty i powinny stanowić rodzaj niezbędnych więzów, które powinny być zachowywane przez agentów przy sterowaniu obliczeniami interakcyjnymi w systemach złożonych.

Efekty prezentowanych badań mogą być również analizowane z punktu widzenia potencjalnego wkładu w rozwój dynamicznie rozwijanych na świecie naukowych dyscyplin takich jak: inżynieria złożonych sys-

temów [165, 203], modele obliczeń granularnych [189], modele obliczeń interakcyjnych [84], modele obliczeń naturalnych [104, 200], modele systemów uczących się [234], a także modele obliczeń realizowanych przez złożone systemy adaptacyjne CAS [245], czy też systemy wieloagentowe (ang. multiagent systems) [134], [PA37].

Główne idee przedstawione w *osiągnięciu naukowym*, zwłaszcza zaś w [SA1] mają swoje korzenie w badaniach dotyczących zbiorów przybliżonych (ang. rough sets) zainicjowanych przez Profesora Zdzisława Pawlaka (nazywanych również *zbiorami Pawlaka*, zgodnie z propozycją Profesora L.A. Zadeha) [178, 180, 182, 217]. Zwłaszcza, mamy tu na uwadze sformułowania przez Pawlaka takich pojęć jak: aproksymacje pojęć, systemy informacyjne, tablice decyzyjne (tak, jak są one rozumiane w teorii zbiorów przybliżonych) oraz boolowskie rozumowania o (nieostrych) pojęciach.

Przedstawione wyżej obszary badań są opisane bardziej szczegółowo we Wprowadzeniu do [SA1] (por. Część I). W szczególności znajdują się tam: pogłębione motywacje badań naukowych (por. Rozdział 1), uszczegółowione cele, wyzwania i zasygnalizowane podejścia do niektórych kierunków rozwiązań (Rozdział 2) oraz wyzwania WisTech wraz z zasygnalizowaniem podejść do niektórych kierunków rozwiązań problemów związanych z modelowaniem CAS (Rozdział 3). W [SA1] jest również zawarta przeglądowa charakteryzacja uzyskanych wyników badań naukowych (Rozdziały 4 i 36) oraz przewodnik po treści książki (Rozdział 5). Ponadto, w [SA1] (zwłaszcza w Części I) wskazane są referencje do bogatej literatury naukowej dotyczącej problematyki *osiągnięcia naukowego*.

4.3.3.1 Podstawowa Przyczyna Kryzysu CSE (FP3C) Po przeprowadzeniu analizy obszernej literatury i wyciągnięciu wniosków z praktycznych doświadczeń, habilitant podjął badania naukowe celem zdiagnozowania *przyczyn TPGP* (por. Sekcja 1.2.2 oraz Część III w [SA1]) i zaproponowania pewnych narzędzi, które mogłyby zredukować lukę między teorią a praktyką w projektach CSE. W monografii [SA1] przedstawiono wyniki jego pracy.

W uproszczeniu, podsumowanie najważniejszych **wniosków dotyczących przyczyn TPGP**, opracowanych na podstawie wyżej wymienionych doświadczeń i analiz sprowadza się do poniższych stwierdzeń, oznaczanych dalej w skrócie PC-TPGP:

1. Podstawowa przyczyna TPGP wiąże się głównie z **brakiem skutecznych i efektywnych technik monitorowania i/lub sterowania procesami realizowanymi przez modele CAS**.

Dotyczy to w szczególności braku skutecznych i efektywnych technik modelowania procesów istotnych dla realizacji projektów CSE poprzez modelowanie interakcji, m.in. zasobów (w tym sieci współpracujących i/lub rywalizujących agentów) w otwartym środowisku realizacji projektu.

Tego rodzaju monitorowanie i/lub sterowanie CAS obejmuje **w proponowanym podejściu** procesy monitorowania i/lub sterowania interakcyjnymi obliczeniami w IGrC reprezentującymi procesy CAS, a także procesy rozumowań dotyczących ważnych (dla współpracujących i/lub rywalizujących agentów) własności tych obliczeń.

2. Z punktu widzenia TPGP **głównym celem monitorowania i/lub sterowania CAS, tzw. MACM** (ang. *Main Aim of the CAS Monitoring and/or Controlling*) jest nauczanie się oraz osiągnięcie - przez sieć agentów - poziomu zrozumienia mechanizmów przetwarzania informacji, wystarczającego do **identyfikacji oraz realizacji priorytetowych celów** sieci współpracujących agentów. MACM dotyczy *sieci agentów wspierających CAS* (mamy tu na ogół na myśli konkretny system i/lub grupę systemów typu CAS), zwłaszcza w zakresie monitorowania i sterowania CAS.

Wspomniane *priorytetowe cele* są identyfikowane poprzez ciągłą agregację potrzeb sieci agentów wspierających CAS oraz poprzez wyuczanie skutecznych i efektywnych zasad mądrej współpracy i/lub rywalizacji między agentami. Zwłaszcza dotyczy to identyfikacji i adaptacji potrzeb agentów w często gwałtownie zmieniających się i jedynie częściowo monitorowanych środowiskach. Przypomnijmy, że przez agentów rozumiemy tu zarówno ludzi jak i również sztucznych agentów (roboty).

3. WisTech proponuje metodologiczne podejście do realizacji **MACM** za pomocą konstrukcji odpowiednich modeli obliczeń w IGrC związanych z odkrywaniem, analizą i/lub gromadzeniem istotnych własności procesów CAS, szczególnie użytecznych do monitorowania i/lub sterowania zjawiskami CAS.
4. Jedną z głównych trudności technicznych w przypadku konstruowania modeli obliczeń w IGrC dotyczących odkrywania, analizy i/lub gromadzenia istotnych własności procesów CAS szczególnie użytecznych do monitorowania i/lub kontrolowania zjawisk CAS pod kątem realizacji MACM jest tzw. *podstawowa przyczyna kryzysu CSE* (ang. Fundamental Pre-Cause of CSE Crisis, **FP3C**).

5. Istota **FP3C** dotyczy trudności związanych z:

- (i) Opracowaniem odpowiedniej metodologii (*tzn.* ukierunkowanej na realizację MACM) skutecznego i efektywnego modelowania, monitorowania i sterowania w zakresie interakcyjnych procesów związanych z badanymi **złożonymi zjawiskami** (przy niepełnej wiedzy o nich). Trudności te dotyczą zwłaszcza modelowania, monitorowania i sterowania takimi wzajemnie przeplatającymi i dynamicznie zmieniającymi się procesami jak:
 - a. **odkrywanie dekompozycji i reprezentacji** interakcyjnych procesów w formie wielu lokalnych modeli obliczeń i **systematyczne doskonalenie oraz rozwijanie tych dekompozycji i reprezentacji**,
 - b. **agregacja wielu lokalnych modeli obliczeń**.

Zakładamy, że wymienione w powyższych punktach a. i b. lokalne modele obliczeń pozostają w interakcjach w otwartym środowisku. W konsekwencji, **w każdej chwili realizacja obliczeń (w tym obliczeń wspierających procesy wymienione w a. i b.) może zostać zaburzona przez interakcje wynikające z nieprzewidywalnych zmian w środowisku**. Stąd *konieczność uwzględniania w tych modelach obliczeń m.in. odpowiednich aspektów zarządzania skutecznością i efektywnością* (w tym zarządzania ryzykiem oraz ko-ryzykiem por. Rozdziały 32 oraz 33 w [SA01]) oraz *dążenia do osiągania zmieniających się priorytetowych potrzeb agentów sterujących tymi obliczeniami*.

- (ii) Opracowaniem i adaptacyjnym doskonaleniem **technik rozumowań sieci agentów o ważnych własnościach modeli** wymienionych w punkcie (i). Szczególnie dotyczy to rozumowań ważnych dla skutecznej i efektywnej realizacji MACM przez sieć agentów wspierających CAS.

Te wspomniane wyżej *lokalne modele obliczeń* są często **agregowane w hierarchiczny sposób i ciągle dostosowują się do otwartego środowiska**. Są one wykorzystywane do generowania odpowiednich interakcji ze środowiskiem, poprzez zastosowanie sieci sensorów i/lub aktuatorów umieszczanych i aktywizowanych w środowisku za pomocą sterowania agentów (lub c-granul z autonomicznym sterowaniem).

Od pierwszej połowy XX wieku podejmowane są liczne próby konstruowania modeli obliczeń, które mają na celu choćby częściowe rozwiązanie problemu modelowania CAS. Większość z tych prób sprowa-

działa się do wersji modeli obliczeń, bazujących na ideach: maszyn Turinga, automatów komórkowych, modeli wykorzystujących symulację Monte Carlo, elastycznych modeli obliczeń, modeli sztucznych sieci neuronowych, a także modeli mających na celu poprawę dokładności przybliżeń, strategii ewolucyjnych i samoorganizacji [60, 127, 130, 137, 158, 170, 170, 196, 200, 202, 257].

Niestety modele te jako konstrukcje abstrakcyjne **są w pewnym sensie niezależne od rzeczywistości fizycznej, a ich projektowanie i implementacja bazują głównie na semantyce zamkniętego świata**. To powoduje, że opracowane modele spełniły jedynie częściowo pokładane w nich oczekiwania.

Ich hermetyczna natura wynika między innymi z faktu, że modele te nie biorą pod uwagę interakcji z rzeczywistym światem fizycznym. Na przykład, nie zapewniają one efektywnych technik uczenia się (nietrywialnych pojęć niezbędnych do realizacji celów) przez iteracyjne procesy interakcji z rzeczywistym światem fizycznym.

Ponadto, jeśli nawet uwzględniają interakcję to w zbyt uproszczony lub nieprawidłowy sposób. Przykładem może być tu częste stosowanie do korekty modelu obliczeń strategii bazującej na przypadkowych zmianach *parametrów sterujących* nie odzwierciedlających rzeczywistości. W praktyce CSE, jest to jeden z głównych czynników, prowadzących do sytuacji, w których teoretyczne rezultaty uzyskiwane przez obliczenia generowane za pomocą takich modeli, okazują się niezgodne z modelami uzyskanymi za pomocą systemów adaptacyjnych, *otwartych* na interakcje z rzeczywistością.

Pojawiło się naturalne zapotrzebowanie na alternatywne modele obliczeń i techniki rozumowań o własnościach obliczeń generowanych przez te modele. Badania nad nowymi podejściami do modeli obliczeń odpowiednich dla modelowania procesów w CSE stanowią jeden z celów *osiągnięcia naukowego*. Wyniki tych badań obejmują propozycję modeli bazujących na IGrC wraz technikami rozumowań o własnościach obliczeń w IGrC bazującymi na adaptacyjnym osądzie. Podejście to wyrosło na paradygmatach zbudowanych wokół *technologii mądrości* (ang. Wisdom Technology - WisTech), idei opracowanej we współpracy z Profesorem Andrzejem Skowronem (por. [SA2, SA3, SA4, SA5], a także [PA03, PA04, PA40-PA46]). Konceptyjnym rdzeniem tego podejścia do *technologii mądrości* jest metaforyczne *równanie mądrości* (ang. Wisdom Equation - Rozdział 29 w [SA1]).

Bardziej szczegółowe omówienia przyczyn TPGP zawarte są w Części III [SA1]). Podsumowanie porównania obliczeń Turinga z IGrC przedstawione jest w Rozdziale 36.

4.3.3.2 Pojęcie c-granuli oraz IGrC Jednym z podstawowych pojęć paradygmatu WisTech [SA1-SA5] jest *granula złożona* (ang. complex granule), w skrócie *c-granula* (ang. c-granule). W celu wyjaśnienia kluczowych intuicji związanych z c-granulami, najpierw przytaczamy pojęcie *hunka* (*porcji materii*). Zgodnie z propozycją przedstawioną przez Hellera w [101], dowolny obiekt fizyczny i/lub zjawisko w czasoprzestrzeni nazywane są hunkiem (tj. porcją materii). Cytując Hellera:

[...] obiekty fizyczne są czterowymiarowymi hunkami (porcjami materii).

Podstawowa intuicja, która była u podstaw wprowadzenia c-granuli jest następująca. Sterowanie agenta *ag* (lub sterowanie c-granuli agenta *ag* w przypadku gdy jest ona autonomiczna) wykorzystuje jej/jego c-granule do odbierania informacji z fragmentów otaczającego świata i/lub do zapewnienia dostępu do fragmentów otaczającego świata fizycznego (w tym do interakcji w dostępnym środowisku). Każda c-granula składa się z trzech warstw architektonicznych:

1. *Soft.suit*, jest konfiguracją hunków, która w szczególności może reprezentować:
 - a. własności środowiska aktywności agenta *ag* (w tym własności dotyczące teraźniejszości, przeszłości i oczekiwanych zjawisk, jak też oczekiwanych własności reguł interakcji, planów i/lub wyników niektórych interakcji, potencjalnie aktywowanych przez c-granulę);
 - b. komponenty wiedzy *ag* (w tym schematy rozumowań o własnościach środowiska);
 - c. komponenty reguł interakcji *ag* i/lub planów interakcji stosowane przez *ag* w procesach *adaptacyjnego osądu ag* w specyficznym kontekście środowiska *ag* i przy specyficznych wzorcach hierarchii potrzeb *ag*;
 - d. komponenty adaptacyjnego osądu *ag* dotyczące reguł interakcji i/lub osądu dotyczącego planów interakcji, które są specyficzne dla pewnych wzorów hierarchii potrzeb *ag*;
 - e. komponenty reguł interakcji *ag* i/lub planów interakcji stosowanych przez *ag* dla spełnienia pewnych spośród jej/jego potrzeb w specyficznych kontekstach opisanych przez wzorce środowiska, w których agent *ag* działa;
 - f. komponenty interakcyjnych struktur logicznych (por. [PA08] Sekcja 34.4 w [SA1] oraz Sekcja 5.1 Autoreferatu).

2. *Link_suit*, czyli “kanały komunikacji” (nazywane też *łączami* i/lub *linkami*), które zapewniają przesyłanie sygnałów kodujących informacje o własnościach interakcji pomiędzy dostępnymi fragmentami środowiska aktywności agenta i sygnały kodujące informacje o własnościach interakcji między różnymi obiektami fizycznymi w *soft_suit*, których stany reprezentują własności interakcji; z uwzględnieniem priorytetów wagi i znaczenia aktualnych potrzeb *ag*. Łącza (linki) mogą mieć przypisane priorytety, które odzwierciedlają wyniki osądu ważności linku, przeprowadzonego przez *ag*.
3. *Hard_suit*, czyli konfiguracje fizycznych obiektów dostępnych poprzez łącza (linki) z *link_suit*.

C-granule mogą być częściami konstrukcji agenta i/lub mogą być generowane oraz rozwijane przez agenta *ag* w zależności od własności konfiguracji fragmentów rzeczywistości postrzeganych przez *ag*.

Należy podkreślić, że c-granule są dynamicznie zmieniającymi się w czasie obiektami. Oznacza to, że wszystkie komponenty c-granul (tj. *soft_suit*, *link_suit* i *hard_suit*) podlegają ciągłym zmianom w wyniku interakcji z otoczeniem oraz działania sterowania agenta (lub autonomicznego sterowania lokalnego c-granuli). C-granula może reprezentować kryteria definiujące pojęcie, które winno być spełnione aby zainicjować stosowne działanie. Agent postrzega środowisko poprzez interakcje i uczy się reguł interakcji (*np.* warunków, pojęć i działań) wykorzystywanych do interakcji z tym środowiskiem oraz do osiągania celów agenta poprzez realizację planów interakcji.

Sterowanie agenta może stosować pewne c-granule do modyfikacji innych c-granul. Można traktować to jako pewnego rodzaju **metaforę operacji algebraicznych w matematyce**.

Pojęcie c-granuli jest koncepcyjnym rdzeniem proponowanego podejścia do IGrC. Szczególnie ważnym aspektem tego podejścia do IGrC jest zdolność agentów do rozumowania zwanego *adaptacyjny osąd* realizowanego za pomocą c-granul. Ten adaptacyjny osąd korzysta z rozumowań (również reprezentowanych za pomocą c-granul) wspierających agentów w poszukiwaniu rozwiązań ich problemów. Metody rozumowań oparte na adaptacyjnym osądzie pozwalają agentom konstruować nowe c-granule (lub nowe konfiguracje istniejących c-granul). Powinny one być potencjalnie pożyteczne przy rozwiązywaniu problemów przez agentów. W konsekwencji te nowe konfiguracje c-granul są istotne dla realizacji obliczeń przez agentów poprzez interakcje ze środowiskiem i powinny prowadzić do zaspokojenia priorytetowych potrzeb agentów. W podejściu tym podstawowym czynnikiem warunkującym rozumowanie agenta są rezultaty prowadzonego przez agenta systematycznego

adaptacyjnego osądu postrzeganych zjawisk w środowisku i u agenta.

Ogólnie, c-granule szczególnie wspierają aktywności agenta *ag* zmierzające do:

1. Poprawy technik reprezentowania hierarchii potrzeb agenta i percepcji tych potrzeb, a także związków między nimi.
2. Interpretowania i oceniania wagi zjawisk, które występują w środowisku aktywności agenta (w tym u samego agenta); zwłaszcza oceniania przyczyn i konsekwencji konkretnych własności relacji między tymi zjawiskami (zwłaszcza z perspektywy hierarchii potrzeb agenta).
3. Konstruowania, inicjowania, implementowania, weryfikowania, przystosowywania i przerywania planów interakcji dla zapewnienia identyfikacji i spełniania najważniejszych potrzeb agenta.
4. Komunikowania, współpracy i rywalizacji z innymi agentami.

W celu wsparcia wyżej wymienionych aktywności wypełnianych przez c-granule, sterowanie agenta *ag* musi budować różnego typu modele (w tym modele reguł interakcji), które odzwierciedlają to jak postrzega *ag* sytuację w środowisku. **Sterowanie agenta może wykorzystać c-granule do budowania modeli konkretnych części środowiska.** Wspomniane modele mogą dotyczyć niektórych części świata z przeszłości, teraźniejszości i przyszłości (*np.* modeli do przewidywania niektórych właściwości środowiska). Modele powinny być adaptacyjne, przez to, że są budowane wraz ze strategiami adaptacyjnymi ich modyfikacji, zwłaszcza w związku z ewentualnymi różnicami między przewidywanymi przez nie i rzeczywistymi własnościami środowiska. Ogólnie, wśród modeli można wyróżnić modele następujących trzech typów:

1. *Modele dostępne bezpośrednio, tj.* modele dotyczące konkretnych części świata, które mogą być (i/lub mogły być) bezpośrednio dostępne za pomocą łączy c-granul agenta. W tego typu sytuacjach, agent, stosując interakcje, może zbudować, *np.* mereologię fragmentów rzeczywistości fizycznej bazując na własnościach już zidentyfikowanych części modelu.
2. *Modele dostępne pośrednio, tj.* modele dotyczące części świata, które nie są (i/lub nie były) bezpośrednio dostępne. Obejmuje to *np.* modele odległych galaktyk w przestrzeni kosmicznej i/lub modele predykcyjne (modele przewidywanej pogody lub sytuacji na rynku). W takich sytuacjach konstrukcja modelu jest wykonywana

z wykorzystaniem odpowiedniej metody rozumowania w zakresie dostępnych modeli i/lub z wykorzystaniem komunikacji i/lub procesów uczenia, w których mogą uczestniczyć inni agenci. Te metody wykorzystują wyuczone reguły interakcji i bazujące na nich specyficzne rozumowania.

3. *Modele o mieszanej dostępności, tj. modele które łączą modele dostępne bezpośrednio i modele dostępne pośrednio.*

C-granule umożliwiają postrzeganie interakcji i sterowanie nimi (por. np., Rozdział 32 [SA1] oraz [SA2]). Opracowując modele IGrC dla CSE, **konieczne było podjęcie decyzji odnośnie kilku innych kwestii związanych z wyzwaniami w dziedzinach innych niż CSE**, takich jak:

- sieci złożone [6, 10, 12, 26, 26, 34, 35, 40, 41, 44, 46, 48, 53, 72, 73, 88, 103, 106, 117, 118, 131, 136, 137, 148, 150, 151, 158, 164, 166, 177, 209, 214, 218, 221, 231],
- inteligencja obliczeniowa [113, 116], w tym obliczenia elastyczne (ang. soft computing), a zwłaszcza zbiory rozmyte (ang. fuzzy sets) [113, 208, 226, 250], zbiory przybliżone (ang. rough sets) [113, 181, 183–186, 215–217],
- kognitywistyka [36, 37, 39, 42, 60, 63, 64, 71, 74, 75, 78, 112, 116, 126, 128, 145, 146, 167, 169, 190, 196, 204, 212, 218, 219, 222, 223, 230, 243],
- eksploracja danych (ang. data mining), uczenie maszynowe (ang. machine learning) i rozpoznawanie wzorów (zwłaszcza analityka dużych danych (ang. big data analytics)) [2, 3, 16, 17, 65, 95, 111, 119, 127, 144, 157, 192, 214, 224, 234, 237, 238],
- CAS [8, 43, 55, 77, 104, 134, 153, 153, 159, 245], w tym samoorganizacja [27, 56, 62, 66, 79, 79, 91, 123, 124, 130, 134, 156, 168, 194, 195, 199, 200, 202, 223, 257],
- systemy wielo-agentowe (ang. multiagent systems - MAS) i agenci inteligentni [43, 59, 79, 99, 109, 130, 134, 148, 154, 167, 170, 211, 225, 242],[PA37],
- GrC [11, 188, 189, 248, 249, 251–256],
- obliczenia naturalne [200], w tym sieci neuronowe [4, 20, 39, 113, 126, 204], obliczenia ewolucyjne i inteligencja zespołowa (w tym stada zwierząt i kolonii bakterii) [113],

- podejmowanie decyzji w warunkach niepewności, systemy wspomaganie decyzji [39, 113, 115, 116, 126, 181, 183, 188, 204],
- interakcja człowiek-komputer [30, 143],
- sterowanie adaptacyjne [5, 8, 24, 49, 55, 62, 77, 87, 107, 108, 129, 153, 159, 167, 245],
- sieć internetowa i semantyczna, systemy cyber-fizyczne, Internet rzeczy (z ang. Internet of things), sieć mądrości rzeczy (z ang. wisdom web of things) i systemy ultra dużej skali (ang. ultra-large-scale systems) [1, 105, 171, 172, 176, 193, 258, 259],
- złożone systemy biomedyczne i sygnały [6, 29, 46, 52, 68, 117, 207],
- sieci społecznościowe [99, 130, 153, 153, 209, 223], w szczególności komputerowe wybory społeczne [31],
- systemy lingwistyczne [52, 61, 67, 96, 120, 170],
- systemy zarządzania ryzykiem [7, 25, 32, 45, 86, 100, 210, 247],
- pochodzenie i ewolucja języków komunikacji [67, 96–98, 110, 120, 135, 170, 191, 220],
- niekonwencjonalne modele obliczeń (zwłaszcza modele obliczeń bazujące na interakcji, ekorytmu) [18, 27, 60, 62, 64, 84, 85, 104, 115, 116, 128, 149, 152, 155, 161, 190, 192, 200, 212, 213, 234, 246, 254, 256].

Można zaobserwować, że wyzwania, które pojawiają się w wielu wspomnianych wcześniej dziedzinach dotyczą fundamentalnych problemów sztucznej inteligencji (ang. Artificial Intelligence - AI) [203], jak również Big Data [65, 69, 111, 114], ultra dużych systemów (Ultra Large System - w tym CPS) czy też Internetu rzeczy (W2T)) [1, 5, 193, 195].

Obejmują one, m.in. takie zagadnienia jak:

1. Zrozumienie podstaw modelowania CAS.
2. Modelowanie złożonych c-granul jako sieci c-granul, *np.* plany realizacji złożonych projektów lub nisze w rozumieniu [64, 104].
3. Pojęcia agentów, ich ontologii i języków oraz społeczeństwa agentów.
4. Problem osadzenia symboli (ang. symbol grounding problem) ([92]) i wskaźniki semantyczne (ang. semantic pointer) [60].
5. Obliczalność realizowana za pomocą c-granul.

6. Asymptotyczna poprawność uczenia się pojęć.

Bardziej szczegółowe omówienie powyższych sześciu kwestii przedstawiono w Rozdziale 3 [SA1].

C-granule stanowią uogólnienie używanych przez ludzi wszelkiego rodzaju pojęć, w tym pojęć, które mogą zmieniać się z upływem czasu (w szczególności ich znaczenie może ulegać modyfikacjom). Ponieważ mają miejsce ich ciągłe interakcje (za pośrednictwem łączy i *hard_suit*) z innymi c-granulami i środowiskiem, mogą one pozyskiwać doświadczenie z otaczającego świata i dostosowywać się do niego. Pojęcie c-granuli analizowane jest bardziej szczegółowo w Rozdziałach 28 i 32 [SA1].

Pojęcie c-granuli stanowi punkt wyjścia do konstruowania modeli interakcyjnych obliczeń granularnych realizowanych przez społeczeństwa agentów w ich środowisku aktywności, co stanowi część “otwartego świata”. Rozważane modele obliczeniowe różnią się istotnie od modeli obliczeń realizowanych na maszynie Turinga w “zamkniętym świecie”. Modele obliczeń proponowane w książce bazują na postulatach przedstawieniowych w Rozdziale 32 [SA1]. Postulaty te mogą być interpretowane na szereg sposobów, które mogą różnić się w zakresie poziomu szczegółów. Mogą one obejmować również specyfikę danej dziedziny zastosowania, jak w przypadku skuteczności i efektywności zarządzania (por. Rys. 33.2 i 33.5 z [SA1]) lub metodologii *krokusa* (por. Rys. 35.1 z [SA1]).

W Rozdziale 36.1 [SA1] przedstawiamy **skondensowaną, uproszczoną wersję modelu obliczeń bazujących na paradygmatach IGrC**, z perspektywy WisTech.

4.3.3.3 Przykłady c-granul Najprostszym koncepcyjnym przykładem c-granuli jest sensor. Sensor może być bardzo prosty, *np.* może służyć jedynie do pomiaru temperatury konkretnego obiektu fizycznego w danym miejscu i danym czasie. Sensor może również być złożony i składać się z wielu współpracujących ze sobą urządzeń pomiarowych (*np.* może to być zestaw instrumentów do monitorowania pogody lub zestaw kamer we fragmencie miasta i kamer na dronach). Bardziej złożone sensory mogą być wyposażone ponadto w systemy identyfikowania obiektów oraz systemy autonomicznego sterowania umożliwiające monitorowanie zachowania zidentyfikowanych obiektów za pomocą wielu współpracujących ze sobą sensorów.

W nietrywialnych zastosowaniach, na ogół, sensory mogą sterować parametrami swoich procedur pomiaru i pozyskiwania danych. Mogą to być, na przykład, parametry sterowania zmianami ustawień (i/lub czasami trwania rejestrowania danych) kamer, termometrów, barometrów,

itd. Wyniki kolejnych pomiarów można zapisać i reprezentować w formie wzajemnie powiązanych tabel będących *interakcyjnymi systemami informacyjnymi* [239]. Innymi słowy, sieci hierarchicznych interakcyjnych systemów informacyjnych można wykorzystywać do konstruowania przykładów c-granul. C-granula reprezentująca sensor powinna zawierać w *link_suit* specyfikację fragmentu czaso-przestrzeni, na którą wskazuje sensor, który realizuje w pewnym sensie połączenie z tym fragmentem rzeczywistości fizycznej poprzez *link_suit* zapewniając transmisję własności interakcji w *hard_suit* do *soft_suit* z wykorzystaniem *link_suit*.

Szereg innych przykładów c-granul można znaleźć w Sekcji 28.2.3 [SA1].

Warto zauważyć, że analogicznie do systemów informacyjnych również inne struktury można wykorzystywać do konstruowania c-granul. Ciekawym takim przykładem jest wykorzystywanie *struktur logicznych* (por. Sekcja 5.1 Autoreferatu) do konstruowania przykładów c-granul. Jednocześnie, w działaniach tych warto pamiętać o różnicach między wyjściowymi strukturami i konstruowanymi z nich c-granulami. W celu ilustracji tych różnic, w następnej sekcji Autoreferatu wyjaśniamy je na przykładzie różnic między strukturami logicznymi i konstruowanymi z ich pomocą c-granulami.

4.3.3.4 Fundamentalne różnice między pojęciem c-granuli i pojęciem struktury logicznej Zauważmy, że istnieją pewne koncepcyjne związki pomiędzy pojęciem *c-granuli* i pojęciem *struktury logicznej* (por. Sekcja 5.1 Autoreferatu). Z jednej strony struktura logiczna może być w następujący sposób interpretowana jako c-granula:

- a. Własności LS2, LS3 i LS5 (por. Sekcja 5.1 Autoreferatu) można interpretować jako komponenty *soft_suit*,
- b. Własność LS4 można interpretować jako komponenty *link_suit*,
- c. Własność LS1 (por. Sekcja 5.1 Autoreferatu) można interpretować jako komponenty *hard_suit*.

Zwróćmy jednak uwagę na to, że **pojęcie c-granuli oraz pojęcie struktury logicznej różnią się w wielu fundamentalnych aspektach**.

Po pierwsze, z czysto formalnego punktu widzenia, obliczenia na c-granulach powinny prowadzić do spełnienia własności opisanych w postulatach struktury dla WisTech (FPW) (por. Rozdział 32 [SA1]) lub w uproszczonej wersji FPW opisanej przez zasady igc-1 - igc-18 w Sekcji 36.1 [SA1].

Po drugiej, pomijając przytoczony wyżej, czysto formalny punkt widzenia, warto zauważyć również inne przykłady różnic między pojęciem c-granuli i pojęciem struktury logicznej. Szczególnie ważne są następujące różnice:

1. *C — granule* są wykorzystywane do generowania, posługując się terminologią wprowadzoną przez Valianta [234, 235], **konstrukcyjnych bloków obliczeniowych dla percepcji**. Są one wykorzystywane, np. jako wzorce dla przybliżania złożonych nieostrych pojęć stosowanych do sterowania interakcjami agenta. Takie bloki konstrukcyjne są złożone. Wymagają one modelowania hierarchicznego z zapewnieniem adaptacyjnej reprezentacji bieżącej wiedzy agenta o otaczającym go środowisku.

Konstrukcyjne bloki obliczeniowe dla percepcji mogą być konstruowane za pomocą rodziny planów interakcji skonstruowanych z wykorzystaniem adaptacyjnych wzajemnie powiązanych *reguł interakcji*.

Różne struktury logiczne mogą być istotne na różnych poziomach modelowania hierarchicznego. Te struktury logiczne powinny być odkrywane i ciągle dostosowywane (na podstawie wyników interakcji). Nie są one dane a priori i/lub formalnie zdefiniowane jak w przypadku współczesnej logiki matematycznej. Ten proces *odkrywania* obejmuje odkrywanie struktur semantycznych (np. stosownych struktur relacyjnych), a także odkrywanie języka formuł dla ekspresji stosownych własności struktur definiujących wyżej wspomniane konstrukcyjne bloki obliczeniowe dla percepcji. Ponadto, odkrywane w ten sposób struktury logiczne w adaptacyjny sposób są modyfikowane i między innymi przez to są odmienne od tych wykorzystywanych do tej pory w matematyce.

Struktury logiczne nie są bezpośrednio powiązane z procesami percepcji. Są one powiązane jedynie pośrednio z procesami percepcji i mogą być użyte w procesach rozumowań agenta.

2. *C — granule* są osadzone na obiektach fizycznych ciągle wchodzących w interakcję z otwartym środowiskiem.

Struktury logiczne są modelami formalnymi istniejącymi w środowisku statycznym i zamkniętym (np. uniwersum von Neumanna⁷).

3. *C — granule* są wykorzystywane i konstruowane przez sterowanie agenta i/lub przez inne c-granule w celu umożliwienia rozumowań o interakcjach w dynamicznie zmieniającym się

⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Von_Neumann_universe

środowisku otwartym, w które zaangażowany jest agent. Agent ma jedynie niepełną i niepewną wiedzę o środowisku. Środowisko jest przedmiotem ciągłych zmian. Bardzo często zmiany mogą być nieprzewidywalne.

Struktury logiczne są osadzone w statycznym i zamkniętym środowisku. Nie są bezpośrednio połączone fizycznie z żadnym konkretnym agentem. Teoretycznie mogą być wykorzystywane przez dowolnego agenta, który ma umiejętność posługiwania się nimi.

4. *C — granule* nie mają zastosowania we wszystkich, często nieznanych i/lub nieprzewidywalnych przez agenta, sytuacjach w środowisku. Dotyczą one jedynie wyodrębnionych schematów sytuacji obejmujących jedynie wybrane małe fragmenty czasoprzestrzeni. W związku z tym, *c-granule* muszą **podlegać ciągłemu odkrywaniu, konstruowaniu, ocenie i doskonaleniu przez sterowanie agenta. Zwłaszcza powinny być one pomocne w sterowaniu interakcjami w celu zaspokojenia aktualnie priorytetowych potrzeb agenta.**

Sterowanie agenta powinno umożliwiać agentowi uczenie się tego jak konstruować, wykorzystywać i doskonalić potencjalnie optymalne *c-granule* związane z daną dziedziną zastosowań (zwłaszcza pod kątem zaspokojenia priorytetowych i/lub potencjalnie priorytetowych potrzeb agenta). Typowa konstrukcja *c-granuli* jest wynikiem interakcji oraz rozumowań podejmowanych przez sterowanie agenta. Sterowanie agenta powinno zapewnić doskonalenie *c-granul* w efekcie odkrywania i/lub uczenia się:

- nowych ważnych i optymalnych pojęć (do ułatwiania zaspokajania priorytetowych potrzeb agenta) oraz coraz doskonalszych aproksymacji ważnych i optymalnych pojęć wspierających skuteczne i efektywne rozwiązywanie problemów agenta,
- języka (w szczególności, nowych atrybutów) opisującego ważne własności zjawisk w środowisku aktywności agenta,
- schematów osądu (w tym rozumowań) dla zastosowań w ważnych dziedzinach aktywności agenta.

Struktury logiczne są “przekazywane” przez innych logików (nauczycieli) i/lub muszą być odkrywane przez matematyków i/lub logików. Typowa konstrukcja struktury logicznej jest wynikiem abstrakcyjnego rozumowania ze strony matematyków i/lub logików wykorzystujących inne znane im (lub odkrywane) konstrukcje matematyczne.

5. *C — granule współpracują w dużej, dynamicznie zmieniającej się i wchodzącej w interakcje sieci* połączonych c-granul. Typowo wiele fragmentów sieci ma strukturę hierarchiczną. Dla złożonych zastosowań struktura sieci powinna być odkrywana i konstruowana przez sterowanie agenta.

Struktury logiczne we współczesnych zastosowaniach są stosowane w typowych sytuacjach jako struktury zamknięte (nie podlegające interakcjom z otoczeniem).

6. *C — granule są stosowane do reprezentacji hierarchii potrzeb⁸ agenta* oraz schematów rozumowań mających na celu konstruowanie planów interakcji umożliwiających zaspokojenie priorytetowych potrzeb agenta.

Sterowanie agenta na podstawie monitorowania interakcji c-granul ze środowiskiem uruchamia c-granule odpowiedzialne za identyfikację oraz osąd zidentyfikowanych *ryzyk* i *ko-ryzyk* (intuicyjnie *ko-ryzyka* reprezentują agregację korzyści agenta oraz szanse wykorzystania okazji przez atuty agenta) w środowisku aktywności agenta. Te ryzyka i ko-ryzyka analizowane są przez sterowanie agenta względem bieżącej hierarchii jego potrzeb. Mechanizmy osądu przez agenta powinny być przedmiotem systematycznego doskonalenia na podstawie osądu słabych i mocnych stron dotychczasowych mechanizmów osądu. W ten sposób sterowanie agenta może realizować *mechanizmy adaptacyjnego osądu*.

Struktury logiczne w ogólnym przypadku **nie są związane z interakcyjną percepcją i adaptacyjnym osądem zjawisk w świecie fizycznym**. W konsekwencji mechanizmy adaptacyjnego osądu nie dotyczą statycznych struktur logicznych.

7. *C — granule nie mogą być wyrażone precyzyjnie za pomocą języka formalnego ograniczonego do ontologii teorii mnogości*. Natomiast ich przybliżone opisy, np. mogą być wyrażane w języku naturalnym. Agent (lub c-granula) może próbować odebrać i/lub zrozumieć (w pewnym stopniu) znaczenie zachowania c-granuli poprzez:

- a. Obserwację wyników interakcji c-granuli i/lub interpretację wyników.
- b. Wyuczanie się własności c-granul pochodzących od innych agentów i/lub innych źródeł wiedzy (np. c-granul).

⁸https://en.wikipedia.org/wiki/Maslow's_hierarchy_of_needs

- c. Branie pod uwagę tego, że typowo w proces uczenia zaangażowane są złożone i/lub pojęcia nieostre (*np.* pojęcia języka naturalnego).
- d. Akceptowanie znaczenia słów (zwłaszcza słów przedstawiających pojęcia złożone i/lub nieostre) zależy od interpretacji tych słów przez “nadawcę” i “odbiorcę”. Kierując się podejściem Wittgensteina [244] do pojęcia “gry językowej”, traktujemy znaczenie jako “aktywność społeczną”, to znaczy *znaczenie uwidacznia się w interakcjach ze środowiskiem oraz między użytkownikami języka*. Innymi słowy pytanie “czym jest tak naprawdę konkretne słowo?” jest podobne do pytania: “czym jest figura szachowa?” W podejściu Wittgensteina, znaczenie słowa (reprezentującego jakieś pojęcie) sprowadzone jest do pytania “w jakich interakcjach uczestniczy pojęcie reprezentowane przez to słowo?” Na skutek tego jakość komunikacji językowej zależy od stosowanych “zasad gier językowych” wśród “użytkowników języka”.
- e. Branie pod uwagę tego, że na ogół percepcja i/lub zrozumienie semantyki zachowania c-granuli może być tylko częściowe. Jednak to zrozumienie można interakcyjne poprawiać stosując odkrywanie i coraz lepsze przybliżanie ważnych pojęć (*np.* pojęcia dla specyfikacji *warunków początkowych, spodziewanych warunków końcowych i reguł interakcji*). Podstawowa część tego procesu składa się z przybliżenia zrozumienia reguł interakcji specyficznych dla środowiska agenta.

Przybliżenia te wraz z nagromadzoną przez agenta wiedzą powinny umożliwić jej/jemu indukowanie i następnie ocenę nowych reguł interakcji [234, 235, 237], [SA1] opisujących cechy interakcji w zakresie c-granul.
- f. Kierowanie się konsekwencjami faktu, iż zasadnicze własności bardzo złożonej c-granuli polegają na zdolności przeprowadzania adaptacyjnego osądu oraz na zdolności prowadzenia rozumowań przyczynowo-skutkowych w celu konstruowania “optymalnych” planów interakcji. Według Pearla, klasyczne narzędzia (*np.* oparte o rozumowanie przyczynowe w statystyce) nie są wystarczającym rozwiązaniem. Dla analityków danych i/lub inżynierów c-granul ma on następującą radę: *rozumowanie przyczynowe wymaga dwóch dodatkowych składników: języka przyjaznego dla użytkownika do artikulacji wiedzy przyczynowej i aparatu matematycznego do przetwarzania tej wiedzy, łączącego ją z danymi i wyciągającego nowe wnioski na temat zjawiska*

[187].

Struktury logiczne są wyrażane w formalnym języku matematycznym, który występuje we wszechświecie statycznym i zamkniętym obejmującym zbiory matematyczne.

4.3.4 Przyszłe badania

W Rozdziale 31 [SA1] wyjaśniono, że pełne zrozumienie aspektów teoretycznych i praktycznych związanych z modelami WisTech może doprowadzić do istotnego postępu w radzeniu sobie z problemami naukowymi i technicznymi, które są zaliczane do największych (pozostających otwartymi) wyzwań XXI wieku (por. [192] oraz Rozdział 1 [SA1]). Dlatego też, każde rozszerzenie naszej wiedzy na temat modeli WisTech (zwłaszcza modeli wspierających rozwiązywanie praktycznych problemów) nie jest łatwym zadaniem, lecz niewątpliwie zadaniem wartym zaangażowania wysiłków naukowców i praktyków.

Warto zwrócić uwagę, że wiele obecnie powstających i dynamicznie rozwijających się dziedzin nauki i techniki próbuje poradzić sobie ze zjawiskami, których istotne własności dotyczą złożoności i inteligencji. Szczególnie ciekawą taką nową dziedziną nauki jest *data science*. Coraz częściej podkreślana jest konieczność badania w jej ramach własności złożoności oraz inteligencji występujących w badanych problemach. Przykładowo w [38] można znaleźć następujące szczególnie ważne cechy współczesnego stanu *data science*:

Kluczowe aspekty to:

- *Data science wymaga systematycznego myślenia, metodologii oraz podejść pobudzających rozwój modeli inteligentnych obliczeń.*
- *Konceptualny krajobraz data science wspiera naukowców próbujących zrozumieć, reprezentować i syntetyzować złożoność oraz inteligencję w badanych problemach.*
- *Celem badaczy zajmujących się data science jest odkrywanie mechanizmów sterowanych danymi i inteligencją (ang. data and intelligence-driven machines) reprezentujących, uczących się, symulujących, wzmacniających procesy uczenia oraz transferujących do tworzonych systemów podobną do ludzkiej: intuicję, wyobraźnię, zdolności do dociekań oraz do kreatywnego myślenia poprzez interakcje człowieka z danymi oraz współpracę.*

Key (data science) insights:

- *Data science problems require systematic thinking, methodologies, and approaches to help spur development of machine intelligence,*
- *The conceptual landscape of data science assists data scientists trying to understand, represent, and synthesize the complexities and intelligence in related problems.*
- *Data scientists aim to invent data and intelligence-driven machines to represent, learn, simulate, reinforce, and transfer human-like intuition, imagination, curiosity, and creative thinking through human-data interaction and cooperation.*

Właśnie badanie własności złożoności oraz inteligencji występujących w badanych problemach stanowi jedną z głównych motywacji badania przedstawionych w [SA1] modeli obliczeń IGrC bazujących na WisTech. Tym samym są duże szanse, że badanie znajdą w przyszłości również zastosowania w *data science*.

Wydaje się, że ważnym kamieniem milowym w tym kierunku może być bardziej precyzyjne zrozumienie i rozwój zastosowań praktycznych WisTech, zwłaszcza jeśli chodzi o następujące kwestie:

1. Określanie i wyjaśnianie mechanizmów granulacji, rozumianych jako konstruktywne, szybkie w czasie, skuteczne i efektywne tworzenie “optimalnych” c-granul do rozwiązywania danej klasy problemów.
2. Określanie i wyjaśnianie bardziej precyzyjnych związków między granulacją i zarządzaniem skutecznością oraz efektywnością.
3. Rozszerzanie naszej wiedzy oraz umiejętności w zakresie opracowywania optymalnych skutecznych metod sterowania obliczeniami w modelu WisTech w celu wykorzystania go do opracowania metod efektywnego rozwiązywania danej klasy problemów (bazując na metaforze programowania deklaratywnego, *np.* analogicznie do programowania logicznego).

Należy podkreślić, że zaprezentowane powyżej propozycje stanowią jedynie niektóre przykłady dalszych kierunków badań. Kwestie dotyczące modeli WisTech wydają się potencjalnie ważne dla wszystkich obszarów współczesnej inżynierii. Niemniej jednak, dalszy postęp będzie możliwy jeśli będziemy trzymać się praktyki i szeroko rozumianych podstaw modeli WisTech ugruntowanych w rzeczywistym świecie fizycznym. Dalsza weryfikacja i rozwój takiego podejścia wymaga dużych zespołów osób i - oczywiście - wysokich nakładów.

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

5.1 Struktury logiczne, przestrzenie domknięć i c-granule

5.1.1 Wprowadzenie do struktur logicznych i przestrzeni domknięć

Przypomnijmy, że kluczowe elementy współczesnego podejścia do reprezentacji struktur logicznych wiedzy matematycznej można odnaleźć już w “Elementach” (około 300 p.n.e.) autorstwa Euklidesa z Aleksandrii⁹.

Zastosowana w “Elementach” Euklidesa formalizacja wiedzy matematycznej, całkowicie zdominowała sposób nauczania i rozwoju matematyki na ponad 23 wieki. Współczesna wersja tego stylu formalizacji jest wynikiem ewolucji programu Davida Hilberta¹⁰. Z grubsza mówiąc, Hilbert zaproponował (w 1921 roku) podejście do podstaw matematyki bazujące na następujących dwóch założeniach:

1. matematyka klasyczna powinna zostać sformalizowana za pomocą systemów aksjomatycznych;
2. dowodzenie niesprzeczności tych systemów aksjomatycznych powinno być możliwe przez stosowanie jedynie “finitystycznych” środków.

Główną ideę formalizacji (w stylu Euklidesa, a także w stylu Hilberta) jakiejś dziedziny wiedzy można z grubsza zilustrować za pomocą pojęcia *struktury logicznej*. W Sekcji 4.3.3.4 Autoreferatu przedstawiono niektóre fundamentalne koncepcyjne różnice między pojęciem c-granuli i pojęciem struktury logicznej.

Współczesne struktury logiczne matematyki klasycznej są wyrażane za pomocą języka teorii zbiorów (*np.* z zastosowaniem pojęć i aksjomatów zaproponowanych przez Ernesta Zermelo i Abrahama Fraenkela¹¹ w ramach tzw. teorii zbiorów Zermelo-Fraenkela (ZF) [125]).

Jednym z kluczowych pojęć związanych ze strukturami logicznymi jest pojęcie *przestrzeni domknięć* [162]. Pojęcie to można traktować jak pewnego rodzaju uogólnienie pojęć operatora *konsekwencji dedukcyjnej* oraz *operatora konsekwencji semantycznej* struktury logicznej. To podejście do operatora konsekwencji jest związane z ideami wprowadzonymi przez Tarskiego [81, 228]. Niektóre wyniki początkowych badań nad pojęciem operatora domknięć można znaleźć w [162].

Wyniki badań habilitanta nad strukturami logicznymi oraz przestrzeniami domknięć są zawarte głównie w następujących pracach: [PA11-PA27].

⁹http://en.wikipedia.org/wiki/Euclid_s_Elements

¹⁰<http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/java/elements/toc.html>

¹¹http://en.wikipedia.org/wiki/Set_theory

Podstawowe komponenty pojęcia *struktury logicznej* (por.[PA25]) obejmują:

- LS1. *Modele* wiedzy dziedzinowej, które są ważne dla aktywności w dziedzinie wiedzy. W szczególności modele mogą dotyczyć własności interakcji obiektów fizycznych etykietujących wybrane fragmenty czaso-przestrzeni, które są postrzegane przez agenta i/lub społeczeństwo agentów. Inną klasę przykładów modeli stanowią modele dla teorii matematycznych. Przykładowo tego typu modele mogą obejmować modele geometrii euklidesowej. Kolejnym przykładem klasy modeli mogą być obiekty opisywane za pomocą atrybutów relacyjnej bazy danych i/lub obiektów systemów informacyjnych [179, 181, 183, 217, 239].
- LS2. *Relacja nierozróżnialności* pomiędzy modelami konkretnej wiedzy dziedzinowej; relacja ta bazuje na pewnych interakcjach, umożliwiających identyfikację i/lub różnicowanie. Na przykład, może to być relacja nierozróżnialności rozważana w teorii zbiorów przybliżonych [181, 183, 217, 239].
- LS3. *Gramatyka wyrażeń lingwistycznych*. Wyrażenia lingwistyczne są wykorzystywane do przedstawienia własności modeli, które mogą być rozpoznawane (postrzegane) przez agentów. Ogólnie, gramatyka wyrażeń lingwistycznych obejmuje reguły konstrukcji, agregacji, rozkładu i transformacji wyrażeń lingwistycznych. W typowym przypadku taka gramatyka, zdefiniowana w sformalizowanych językach współczesnych dziedzin matematycznych obejmuje definicję:
- i. alfabetu lingwistycznego języka; w szczególności, specyfikacji *prymitywnych związków* i *prymitywnych funkcji* charakteryzujących daną dziedzinę;
 - ii. *wyrażeń atomowych*;
 - iii. *reguł konstrukcji* i/lub gromadzenia *złożonych wyrażeń lingwistycznych*, z zastosowaniem dopuszczalnych logicznych spójników, symboli dla związków (funkcji i relacji) i/lub wyrażeń gramatycznych; jako przykłady gramatyki dla języka wyrażeń można traktować gramatykę dla języka geometrii euklidesowej lub gramatykę dla języka SQL, wykorzystywaną do pozyskiwania informacji z relacyjnych baz danych.
- LS4. *Relacja spełnialności* - jest to relacja binarna pomiędzy modelami i wyrażeniami językowymi, która umożliwia określenie wartości

logicznych języka wyrażen w konkretnych modelach wiedzy dziedzinowej. Relacja spełnialności może stanowić aktualną reprezentację wyników rozumowań o interakcyjnych obliczeniach realizowanych za pomocą planów interakcji. Może to w efekcie prowadzić do aktualnego przybliżenia relacji spełnialności.

LS5. *Przyjęta wiedza dziedzinowa (w tym schematy rozumowania)*, którą można przedstawić za pomocą zaakceptowanych stwierdzeń/reguł/praw określających fakty, zjawiska i *schematy rozumowania* dotyczące wiedzy dziedzinowej. Schematy te opisują klasy niektórych z obserwowanych i/lub potwierdzonych faktów i sposobów konstrukcji reguł czy też schematów prawidłowego rozumowania w zakresie właściwości modeli oraz właściwości rozumowania (tj. meta-rozumowania). Na przykład, schematy rozumowania mogą obejmować takie zasady jak:

- i. *Przyjęte stwierdzenia w formie aksjomatów*, np. aksjomaty wiedzy dziedzinowej, które wyrażają podstawowe i powszechnie przyjęte fakty i/lub zasady dotyczące wiedzy dziedzinowej. Na przykład, mogą one obejmować aksjomaty geometrii euklidesowej.
- ii. *Przyjęta reguły rozumowań obejmujące reguły dedukcji i/lub indukcji* oraz inne schematy rozumowań dotyczące własności wiedzy dziedzinowej. Na przykład, mogą one obejmować regułę modus ponens i/lub niektóre zasady uogólnienia obserwacji empirycznych.
- iii. *Reguły agregacji, dekompozycji i transformacji rozumowań*. Na przykład, mogą to być reguły agregacji rozumowań z różnych dziedzin umożliwiające przenoszenie analogicznych rozumowań między różnymi dziedzinami zastosowań. Przykładami są tu teoria Galois, twierdzenia o reprezentacji w matematyce (np. umożliwiające zastosowanie twierdzenia Baire’a¹²) oraz stosowanie “*analogii między analogiami*” [232].

5.1.2 Wprowadzenie do problemu charakteryzacji współczesnej logiki matematycznej za pomocą jej relacji z innymi logikami

Formalne pojęcie *struktury logicznej* ma swoje korzenie w badaniach prowadzonych przez Alfreda Tarskiego [81, 228], Jana Łukasiewicza [138, 140] i Evariste’a Galois¹³ [21, 174], który pierwszy odkrył związki

¹²https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.rae/1337001353

¹³<http://bonevac.info/papers/HistoryofQuantification.pdf>

Galois i zastosował je do rozwiązania trudnych problemów. Struktury logiczne są w pewnym sensie, rozszerzeniem *związków Galois* traktowanych jako uogólnienie związków pomiędzy teorią ciał a teorią grup. Związki te umożliwiają redukcję pewnych problemów teorii ciał do zagadnień prostszej i lepiej poznanej teorii grup [76, 141].

Przedstawione w Autoreferacie podejście do pojęcia struktury logicznej bazuje na formalnej definicji wprowadzonej w [PA21] i rozwiniętej w [PA25, PA14].

W niektórych pracach, logicy posługują się nazwą *logika uniwersalna* dla struktury pojęciowej podobnej do pojęcia *struktury logicznej*. Wiele ciekawych wyników na temat *logiki uniwersalnej* i/lub abstrakcyjnych *operatorów konsekwencji* można znaleźć w antologii [19]. Z punktu widzenia rozwoju struktur logicznych szczególnie interesujące następujące prace: [23, 47, 173, 205, 227, 233].

Badania naukowe dotyczące struktur logicznych mają, m.in. następujące główne cele:

1. Pogłębianie naszej wiedzy i zrozumienia problemów pojawiających się w związku z odpowiedziami na następujące pytania:
 - a. Co rozumiemy przez *współczesną logikę*? Jakie są koncepcyjne związki *współczesnej logiki* z pojęciami takimi jak: rozumowanie, semiotyka, pragmatyka i ontologia?
 - b. Jakiego rodzaju struktura logiczna mogłaby być bardziej efektywna i/lub bardziej skuteczna w porównaniu ze strukturami logicznymi logiki klasycznej? Dotyczy to zwłaszcza wsparcia przy rozwiązywaniu problemów praktycznych przez ludzi i/lub sztucznych agentów, zwłaszcza w dziedzinach praktycznych zastosowań.
 - c. Dlaczego struktury logiczne logiki pierwszego rzędu klasycznego rachunku predykatów są tak użyteczne i tak powszechnie wykorzystywane we współczesnej nauce i/lub inżynierii?
 - d. Czy występują jakieś jeszcze nieznanne przyczyny specjalnej roli struktur logicznych klasycznej logiki predykatów? Czy jest to jedynie przykład takich struktur?
2. Identyfikacja wszelkich ważnych *związków* między strukturami logicznymi odpowiadającymi logice nieklasycznej i/lub strukturami logicznymi logiki klasycznej.
3. Charakteryzacja struktur logicznych odpowiadających logice klasycznej.

Od czasu pojawienia się logik nieklasycznych (*np.* logiki intuicjonistycznej, logiki wielowartościowej, logiki modalnej), logicy badali możliwości wzajemnych interpretacji systemów dedukcyjnych tych logik. **W pierwszej połowie XX wieku**, badania te skupiły się na **rachunku zdań**, zwłaszcza interpretacjach systemów dedukcyjnych klasycznego rachunku zdań w nieklasycznych systemach dedukcyjnych (*np.* w intuicjonistycznym i/lub modalnym rachunku zdań). Szczególnie interesujące wyniki w tym zakresie osiągnęli Glivenko [82], Gödel [83], Tarski [229], i Łukasiewicz [139, 140].

Przypomnijmy, że już w czasach starożytnych Arystoteles podkreślał znaczenie pojęcia kwantyfikacji¹⁴. Opracował on teorię kwantyfikacji w formie dobrze znanej jego teorii sylogizmów. W pewnym sensie podstawowe części tej teorii są obecne we współczesnej klasycznej logice pierwszego rzędu rachunku predykatów.

W związku z tym, **w pierwszej połowie XX wieku** badania dotyczące struktur logicznych rachunków zdań rozszerzono na badania struktur logicznych odpowiadających **rachunkowi predykatów pierwszego rzędu**. Wiele wyników dotyczących związków tego rodzaju rachunku predykatów (*np.* intuicjonistycznej, modalnej, logiki wielowartościowej i klasycznej logiki predykatów) można znaleźć w pracy autorstwa Rasiowej i Sikorskiego [198] oraz w pracy autorstwa Rasiowej [197].

Według Daniela Bonevaca¹⁵, możliwe jest połączenie i rozwinięcie podejścia Arystotelesa oraz podejścia współczesnego (do kwantyfikatorów i rachunku predykatów).

*Współczesna teoria kwantyfikacji wyłoniła się ze spostrzeżeń matematycznych w połowie i późnych latach XIX w., umieszczając logikę arystotelesowską jako główną teorię kwantyfikatorów na prawie stulecie. Przyjęło się postrzegać historię logiki jako niewiele więcej niż to co obecnie nazywamy klasyczną logiką pierwszego rzędu, logiką Fregego, Peirce'a i ich następców. Niemniej jednak **teoria kwantyfikacji Arystotelesa** jest pod pewnymi względami **silniejsza niż jej współczesny następca**. Teoria Arystotelesa łączy relacyjne pojęcie kwantyfikatorów z monadycznymi termami. Współczesna teoria łączy monadyczne pojęcie kwantyfikatorów z relacyjną teorią termów.*

Dopiero niedawno logicy połączyli relacyjne koncepcje kwantyfikatorów i termów, w celu opracowania teorii uogólnionych kwantyfikatorów zapewniających po-

¹⁴<https://plato.stanford.edu/entries/quantification/>

¹⁵<http://bonevac.info/papers/HistoryofQuantification.pdf>

łączenie siły podejścia arystotelesowskiego i współczesnego.

Badanie nad współczesnym podejściem do uogólnionych kwantyfikatorów zainicjował¹⁶ Mostowski [163]. W szczególności zwrócił on uwagę na to, że istnieje wiele interesujących matematycznie kwantyfikatorów, które nie są definiowalne w terminach logiki kwantyfikatorów pierwszego rzędu. Ponadto, scharakteryzował logikę pierwszego rzędu wśród rozszerzeń logiki uzyskanych przez dodanie jednego tak zwanego jednoargumentowego kwantyfikatora uogólnionego.

Innymi słowy, badania nad logicznym rachunkiem predykatów przeniosły się na badania nad **rozszerzeniami rachunku predykatów** (zwłaszcza rozszerzeniami klasycznej logiki predykatów za pomocą wielu podejść odnośnie kwantyfikatorów uogólnionych).

Na początku badania nad uogólnionymi kwantyfikatorami były zorientowane na tak zwane *kwantyfikatory liczebności*, *kwantyfikatory topologiczne* oraz *połączenia między logiką i gramami*¹⁷. Badania te nie były szczególnie istotne dla języka naturalnego. Jednak później język stał się ważną częścią tych badań. Wstępny przegląd tego podejścia został przedstawiony w pracy autorstwa Barwise'a i Coopera [14].

Per Lindström w [132, 133] rozszerzył charakteryzację Mostowskiego na temat jednoargumentowych kwantyfikatorów uogólnionych. Ogólnie rzecz biorąc, teoria Lindströma [132, 233] charakteryzuje klasyczny rachunek predykatów wykorzystując dwie własności: własność przeliczalnej zwartości i dolną własność Lowenheima-Skolema. Barwise [13, 15] rozszerzył metody Lindströma o teorię modeli nieskończonych, łącząc je z ideami wyłaniającymi się z uogólnionej teorii rekursji. Jego głównym osiągnięciem była charakteryzacja nieskończonych języków postaci $L_{\infty, \omega}$.

Kolejny ważny nurt badań dotyczących uogólnień logiki klasycznej obejmuje zastosowania w języku naturalnym [14] i informatyce. W szczególności w książce autorstwa Barwise'a i Seligmana [15] występuje bardzo ważny następny krok w kierunku lepszego zrozumienia związków między ważnymi pojęciami takimi jak: związki Galois, informatyka oraz przepływ informacji przez kanały komunikacji w systemach rozproszonych obejmujących wielu agentów posługujących się logikami lokalnymi. We wspomnianej książce można znaleźć liczne ilustracje teorii Barwise'a i Seligmana [15] obejmujące różnorodne zjawiska, od transferu plików do DNA, od mechaniki kwantowej do teorii aktu mowy.

Warto wspomnieć, że w latach 70. XX wieku Barwise i Seligman wykorzystywali podejście sytuacyjno-teoretyczne do informacji. Jednak na-

¹⁶<https://plato.stanford.edu/entries/generalized-quantifiers/>

¹⁷<https://plato.stanford.edu/entries/logic-games/>

stępnie wyeliminowali w prowadzonych badaniach większość technicznych aspektów dotyczących sytuacji, relacji i typów sytuacji, aby uzyskać abstrakcyjne matematyczne podstawy przepływu informacji. Punktem wyjścia ich teorii jest koncepcja *klasyfikacji* i infomorfizmu takich struktur (w istocie odpowiada to dokładnie pojęciu *struktury Galois*), tj. pojęcie infomorfizmu klasyfikacji jest rdzeniem pojęcia struktury logicznej.

Podejście to bazuje na idei, zgodnie z którą przepływ informacji jest realizowany przez zmiany własności systemu, możliwe do wyrażenia za pomocą “typów” i “tokenów”, gdzie “tokeny” stanowią obserwowane zjawiska lub obiekty systemu klasyfikacji. Innymi słowy, Barwise i Seligman zwrócili uwagę na kierunek głębszego zrozumienia zasad współpracy między wieloma agentami poprzez podkreślenie roli kanałów komunikacji oraz zasygnalizowali związki ich podejścia do koncepcji kanałów komunikacyjnych ze związkami Galois.

5.1.3 Główne wyniki habilitanta dotyczące struktur logicznych i przestrzeni domknięć

Do głównych osiągnięć habilitanta stanowiących wynik badań nad strukturami logicznymi i przestrzeniami domknięć należą następujące wyniki:

- A. W [PA25, PA14] przedstawiono następujący wynik: Jeśli L jest strukturą logiczną z przeliczalnym zbiorem formuł, wtedy L można zanurzyć w strukturze logicznej klasycznego rachunku predykatów wtedy i tylko wtedy gdy L jest strukturą logiczną, która spełnia twierdzenie o zwartości (tzn. intuicyjnie oznacza to, że rozumowania w L mają charakter finitystyczny).
- B. W [PA17, PA19] udowodniono następujące twierdzenie: Pseudorekurencyjna przestrzeń domknięć X jest rekurencyjnie zanurzalna w przestrzeni domknięć operatora konsekwencji jednej z następujących logik rachunku zdań: klasycznej, intuicjonistycznej, modalnej oraz n -wartościowej logiki Posta, wtedy i tylko wtedy gdy X jest niesprzeczną rekurencyjną przestrzenią domknięć, która spełnia twierdzenie o zwartości.
- C. W [PA15], dla dowolnej zupełnej kraty Heytinga L , wprowadzono kategorię $Etale(L)$. W [PA15] udowodniono, że kategoria $Etale(L)$ jest równoważna kategorii snopów względem L oznaczonej przez $Sh(L)$. Ze względu na to, kategoria ta jest równoważna kategorii L -wartościowych zbiorów [70, 102, 142]. Innymi słowy kategoria $Etale(L)$ jest uogólnieniem kategorii $Etale(X)$ [70, 102, 142], gdzie X jest przestrzenią topologiczną. W [70, 102, 142] pokazano, że

kategoria snopów względem kraty Heytinga $Etale(L)$ jest naturalnym uogólnieniem semantyki algebraicznej i semantyki Kripkego. Jeśli krata Heytinga jest izomorficzna z kratą wszystkich otwartych zbiorów przestrzeni topologicznej, możemy wtedy traktować snopy nad X jako obiekty kategorii $Sh(X)$, lub też jako przestrzenie wyposażone w lokalny homeomorfizm na X , tzn. obiekty kategorii $Etale(X)$. Drugie podejście jest bardzo ważne, ponieważ umożliwia np. wewnętrzną reprezentację [70] w $Etale(X)$, przestrzeni topologicznych w toposach snopów względem takich krat. W związku z tym, zaproponowane podejście może zostać wykorzystane do badań nad niektórymi własnościami matematyki intuicjonistycznej (np. dowód twierdzenia o ciągłości Brouwera [70, 142, 236]). Uogólnienie tego podejścia może być zastosowane do badań wewnętrznej reprezentacji przestrzeni domknięć w logice intuicjonistycznej.

- D. [PA27, PA16, PA20]. Pojęcie retraktów absolutnych zostało wprowadzone do topologii przez Karola Borsuka [28]. Jest jednym z podstawowych pojęć współczesnej topologii i teorii kategorii. W [PA16] przedstawiono ideę ujednoliconego podejścia do problemu charakteryzacji retraktów absolutnych i ekstensorów absolutnych dla kategorii przestrzeni topologicznych, przestrzeni domknięć, algebr Boola i krat rozdzielnych. W charakteryzacji tej wykorzystano pojęcie rektu przestrzeni domknięć filtrów w kracie wszystkich podzbiorów. Praca [PA20] dotyczy podejścia Scotta [206] do modeli obliczeń dla rachunku lambda Church'a-Curry'ego. Praca [PA16] uogólnia zaś wyniki Scotta w zakresie ekstensorów bezwzględnych z przestrzeni topologicznych do przestrzeni domknięć.

5.2 Relacyjne bazy danych: Język SQL a termy booleowskie i podejście do optymalizacji zapytań za pomocą sieci neuronowych

Jest wiele podejść do przedstawienia złożonych wartości ustrukturyzowanych w relacyjnych bazach danych. W pracach [PA02, PA29] dokonano przeglądu takich podejść i omówiono nowe podejście, w którym każdy zbiór jest przedstawiony za pomocą termu booleowskiego.

Pokazano, że podejście to uogólnia inne podejścia, prowadząc do bardziej elastycznych możliwości wyszukiwania złożonych obiektów w relacyjnych bazach danych. Użycie termów Boolowskich wydaje się właściwe w radzeniu sobie z niepełną informacją. W szczególności podejście to uogólnia się na pewne inne (np. tzw. wartości zerowe (ang. null values)). Przedstawiono również definicje działań algebraicznych na takich

zbiorach, jak łączenie, sumowanie, selekcję, itd. Ponadto określono miarę złożoności obliczeniowej tych operacji.

W [PA30] przedstawiono podejście bazujące na uczeniu maszynowym do optymalizacji odpowiedzi na zapytania typu SQL do relacyjnej bazy danych. Podejście to wykorzystuje sieci neuronowe do uczenia się optymalizacji odpowiedzi na podstawie wyszukiwania w bazach danych dla złożonych zapytań SQL.

5.3 Ograniczenie domen użytkowników w bazach danych

Praca [PA01] poświęcona jest matematycznej formalizacji systemów z ograniczonym dostępem do bazy danych. Domena bazy danych, do której dany użytkownik ma dostęp jest identyfikowana za pomocą pozycji użytkownika w pewnej hierarchii. Naturalna kolejność (obszar włączenia) odpowiada wtedy pozycji w wyżej wymienionej hierarchii. W ten sposób, ogólnie mówiąc, obszar bazowy, do którego dostęp jest przydzielany użytkownikowi można nazwać jego priorytetem. Ze względu na to, że język systemu wyszukiwania informacji jest taki sam dla wszystkich użytkowników, to różnica ich priorytetów uwidacznia się w tym, że na to samo zapytanie mogą być udzielone różne odpowiedzi w zależności zarówno od zapytania, jak i priorytetu użytkownika. Język podstawowy, na bazie którego działa system, wskazuje dostęp do różnych obszarów bazowych. W definicji tego języka wykorzystano logiki pośrednie ze stałymi logicznymi (odpowiadającymi priorytetom). Opisano podstawy tego języka, a także sformułowano pełną semantykę.

5.4 Sterowanie hierarchicznymi wielo-wyszukiwaniami

W pracach [PA31, PA33, PA34] przedstawiono opis systemu wielo-wyszukiwań jako narzędzia ogólnego przeznaczenia do projektowania złożonych systemów AI (sztucznej inteligencji). Podejście wielo-wyszukiwania bazuje na abstrakcji przestrzeni wyszukiwania sprowadzającej się do kombinacji przestrzeni wyszukiwań. Każde wyszukiwanie jest przedstawione za pomocą wzorca wyszukiwania, który stanowi prosty rekurencyjny schemat, mogący wywołać inne wyszukiwania. Wzorce rekurencyjne są wykonywane i wywoływane za pomocą interpretera wyszukiwania. Sterowanie przebiegiem obliczeń jest reprezentowane przez sieć stanów sterowania na różnych poziomach hierarchii wierzchołków reprezentującą strukturę wielo-wyszukiwania. Obejmuje to sterowanie globalne dla całego systemu wielo-wyszukiwania, sterowanie lokalne dla każdego wyszukiwania i sterowanie lokalne dla poszczególnych węzłów wyszukiwania. Różnicowanie między różnymi typami sterowania umożliwia rozróżnienie odpowiednich typów heurystyk. Opisano dwa syste-

my komputerowe, zaprogramowane z zastosowaniem struktury wielowyszukiwania. Przedstawione podejście bazuje na metodologicznym założeniu, że rozwiązywanie problemów można traktować jako specjalny przypadek ewolucji systemu meta-wyszukiwania sterującego procesami dynamicznego iteracyjnego łączenia identyfikacji żądań problemów składowych i potencjalnych technik dla rozwiązań odpowiednich problemów składowych i/lub identyfikacji nowych problemów składowych, a także przeszukiwań rozwiązań podobnych problemów.

W pewnym sensie główna idea proponowanej metodologii wielowyszukiwań ma swe źródło w starożytnej zasadzie *dziel i rządź*. Zasada ta jest stosowana do rekurencyjnych procesów poprawy zrozumienia problemu (który ma zostać rozwiązany) i do poprawy konstrukcji zadowalających technik dla rozwiązania problemu (w przeciwnym przypadku staramy się podzielić problem na następnym poziomie na proste problemy składowe). W proponowanej metodologii wiedza dziedzinowa jest reprezentowana (obejmując problemy i schematy ich rozwiązań) z zastosowaniem dynamicznie rozwijanych (specyficznie dla każdego problemu) drzew wspierających wielowyszukiwanie.

5.5 Zastosowania systemów wieloagentowych do rozwiązywania problemów bezpieczeństwa i ratownictwa

Kwestia bezpieczeństwa jest priorytetowym zagadnieniem na każdym poziomie, np. firmy czy kraju. Wykorzystanie technologii AI w zastosowaniach dotyczących bezpieczeństwa wyłoniło się wraz z ważnymi zastosowaniami w zarządzaniu monitorowaniem, sterowaniem w sytuacjach kryzysowych, i ratownictwem.

W [PA49] zaproponowano ogólną architekturę systemu wspierającego dowódców akcji ratowniczo-gaśniczej. Przedstawia ona strukturę zarządzania ryzykiem do modelowania zarówno zjawisk występujących w typowej akcji ratowniczo-gaśniczej (objętej zakresem projektu) jak i również przedstawia propozycję mechanizmów komunikowania się ze strażakami. Położono nacisk na to, że odpowiednie pozyskanie, selekcja i reprezentacja ważnych informacji stanowi kluczowy aspekt wsparcia decyzyjnego, ponieważ może poprawić percepcję dowódcy.

Badania przedstawione w [PA49] stanowią kontynuację dyskusji czołowych ekspertów (w domenie zastosowań wieloagentowych systemów w zadaniach bezpieczeństwa i ratownictwa) podczas międzynarodowych warsztatów [PA37]. Książka [PA37] zawiera rozszerzone i udoskonalone wersje wybranych prac przedstawionych na międzynarodowych warsztatach "Monitoring, bezpieczeństwo i techniki ratowania w systemach wieloagentowych (MSRAS 2004)" zorganizowanych w Płocku

w dniach 7-9 czerwca 2004, które skupiły czołowych badaczy w tej dziedzinie z całego świata.

5.6 Big Data

Praca [PA58] dotyczy zastosowań Big Data. Wiadomo, że analiza dużych zbiorów danych Big Data wymaga opracowywania modeli obliczeniowych dla systemów wieloagentowych, a także metod doskonalenie technik rozumowań agentów o własnościach obliczeń realizowanych za pomocą tych modeli; wymagania te mają umożliwić agentom sterowanie obliczeniami do osiągnięcia zaplanowanych zadań.

Należy zauważyć, że użytkownicy baz danych również są agentami. Agenci wykonują obliczenia na złożonych obiektach o bardzo odmiennych strukturach (np. wzorcach behawioralnych, klasyfikatorach, obiektach strukturalnych, zestawach zasad, działaniach gromadzących wiedzę o doświadczeniach agenta i/lub innych agentów, a także schematach rozumowań).

Powstanie relacyjnych baz danych i języka SQL w znacznym stopniu przyczyniło się do dynamicznego rozwoju zastosowań IT w ostatnich kilku dekadach. W uproszczeniu język SQL¹⁸ polega na ustaleniu podstawowych pojęć (np. nazw tabel w bazie) oraz technik manipulacji na tych pojęciach poprzez budowanie potencjalnie bardzo złożonych zapytań. Innymi słowy, dynamiczny rozwój zastosowań powstał dzięki opracowaniu **języka do wyrażania zapytań do relacyjnych baz danych**. W pewnym sensie potrzeba analogicznego działania wyłania się w *Big Data*. Oznacza to, że **jednym z głównych wyzwań dla systemów opartych o Big Data jest dostarczenie języka umożliwiającego (i) wyrażanie wysokopoziomowych pojęć użytkownika (często będących złożonymi pojęciami nieostryimi) przy zapewnieniu zadowalającej jakości ich aproksymacji zrozumiałych dla systemu komputerowego obsługującego duże bazy danych zapewniającej, (ii) przetłumaczenie zapytania użytkownika zawierającego pojęcia, o których mowa w (i) na zapytanie w języku zrozumiałym dla systemu obsługującego duże bazy danych zbudowane na bazie tych aproksymacji oraz struktur zapytań użytkownika**.

W pracy [PA58] zaproponowano podejście do konstruowania takich pojęć wysokiego poziomu (c-granul) za pomocą IGrC na bazie WisTech.

Rozumowanie, którego celem jest sterowanie schematami obliczeniowymi dla obsługi problemów Big Data, jest traktowane jako adaptacyjny osąd w WisTech. Tego typu rozumowania (lub ogólniej schematy

¹⁸<https://en.wikipedia.org/wiki/SQL>

adaptacyjnego osądu) powinny być realizowane przez c-granule. Adaptacyjny osąd jest więcej niż kombinacją rozumowania opartego o dedukcję, indukcję i abdukcję. Ze względu na konieczność działania przy niepełnej i nieperfekcyjnej informacji, agenci ogólnie nie mogą przewidywać dokładnych wyników działań (lub planów). Ponadto, przybliżenia złożonych pojęć nieostrych inicjujących działania (lub plany) zmieniają się w czasie. W związku z tym, potrzebne są strategie adaptacyjne dla ewoluującego przybliżenia pojęć w odniesieniu do zmian w czasie. W szczególności adaptacyjny osąd jest rozumowaniem niezbędnym przy zarządzaniu skutecznością i efektywnością obliczeń granularnych, prowadzonym przez agentów w celu wsparcia zarządzania ryzykiem.

5.7 Programowanie ewolucyjne

W pracy [PA35] zawarto propozycję podejścia do obliczeń ewolucyjnych. W szczególności zaś, w pracy tej zaproponowano architekturę dla *silnika ewolucyjnego* i ogólnej koncepcji programowania ewolucyjnego z wykorzystaniem deklaratywnych paradygmatów przystosowanych do sterowania procesami stochastycznymi wdrażającymi procesy ewolucyjne.

Propozycja zawarta w [PA35] bazuje na doświadczeniach z realizacji złożonych projektów wdrażanych przez A. Jankowskiego i zespoły jego studentów w Departemnt of Computer Science UNCC¹⁹ w ciągu trzech lat od 1985 do 1988.

Głównym celem tych projektów była implementacja środowiska maszynowego wyuczania najlepszej strategii wygrywających dla dwuosobowych gier (*np.*, warcaby, szachy, Go). W implementacji występowało wiele różnych wariantów algorytmów genetycznych (takich jak podejścia Michigan i Pittsburgh²⁰, a także klasyczne przycinanie drzewa decyzyjnego, (*np.* alpha-beta pruning²¹) połączone z pewnymi technikami uczenia maszynowego. Jednym z głównych wniosków z przeprowadzonych eksperymentów jest wskazanie istotnej roli jaką pełni uczenie maszynowe w wyuczaniu i utrzymywaniu **więzów** dla algorytmów genetycznych. Umiejętne wprowadzenie (do sterowania algorytmami ewolucyjnymi) więzów na rozwiązania (wynikające z wiedzy dziedzinowej) na ogół umożliwia znaczne zwiększanie skuteczności i efektywności zastosowań algorytmów genetycznych.

W pracy [PA35] omówiono zalecenia dla wykorzystania **ewolucji hierarchii meta-programów do wyuczania się i obsługi więzów**

¹⁹<http://cs.uncc.edu/>

²⁰<http://www.exa.unicen.edu.ar/escuelapav/cursos/bio/17.pdf>

²¹https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha%E2%80%93beta_pruning

na podstawie reprezentacji wiedzy zebranej z eksperymentów.

W pracy [PA36] przedstawiono bardzo prostą ilustrację pewnych wniosków omówionych w [PA35]. W szczególności zaś, w [PA36] zawarty jest opis podejścia bazującego na algorytmach genetycznych do klasy problemów optymalizacji (*np.* problemu transportowego) z wykorzystaniem reprezentacji węzłów w formie modyfikacji operatorów genetycznych.

5.8 Zastosowania inteligentnych systemów dialogowych w silnikach wyszukiwania dokumentów

Patenty [PT1], [PT2] dotyczą technik wyszukiwania dokumentów z wykorzystaniem interakcyjnego dialogu między użytkownikami i/lub agentami sztucznymi (*np.*, komputerami w sieci).

Proponowane struktury danych i schematy algorytmów w [PT1] można zastosować do analizy oraz grupowania dokumentów przygotowywanych do przetwarzania przez silnik wyszukiwania dokumentów. System i metody obejmują również analizę i przetwarzanie dokumentów w celu zabezpieczenia infrastruktury oraz standardy dla optymalnego przetwarzania dokumentów.

Dzięki zastosowaniu metod Inteligencji Obliczeniowej (z ang. Computational Intelligence, CI) i metod statystycznych informacja na temat dokumentu jest analizowana i grupowana z wykorzystaniem nowatorskich technik ekstrakcji danych z dokumentów. Dzięki identyfikacji za pomocą tych technik słów i/lub kluczowych fraz w całym tekście, budowany jest obszerny słownik. Tekst jest przetwarzany pod kątem słów kluczowych lub liczby ich wystąpień i kontekstu, w jakich te słowa pojawiają się w dokumentach. Cały dokument jest reprezentowany za pomocą wiedzy, która jest zawarta w jego treści. Bazując na takiej wiedzy wyekstrahowanej ze wszystkich dokumentów, dokonywane jest grupowanie dokumentów w mające znaczenie grupy w drzewie katalogowym. Wyniki analizy dokumentów i grupowania informacji są przechowywane w bazie danych.

Metoda przedstawiona w [PT2] obejmuje analizę zapytania i następnie konstrukcję wzorca zapytania. W dokumencie źródłowym wykonywane jest wyszukiwanie pod kątem dokumentu, który pasuje do danego wzorca zapytania. Pozyskane dokumenty są dzielone na skupiska podobnych dokumentów, gdzie każde skupisko podobnych dokumentów jest opisywane za pomocą wzorca charakterystycznego dla tego skupiska. Następnie tworzona jest lista skupisk dokumentów bazujących na podobnych wzorcach skupisk. Skupiska mogą stanowić podstawę do sformułowania pytań do użytkownika w celu doprecyzowania, w których skupiskach kontynuować wyszukiwanie.

Niektóre idee z [PT1, PT2] rozwinięto w projekcie SYNAT [PA47].

Według Google Scholar, patenty [PT1, PT2] były cytowane przez inne patenty w przybliżeniu 260 razy. Wiele spośród tych cytatów pochodzi z wiodących ośrodków badawczo-rozwojowych, takich jak: IBM, Google, Microsoft, Yahoo!, Hewlett-Packard, Oracle, Matsushita Electric, NEC, Fuji, Xerox, Canon, Boeing, Sony, Accenture i Red Hut.

Literatura

Publikacje Andrzeja Jankowskiego składające się na *osiągnięcie naukowe* rozprawy habilitacyjnej

- [SA1] A. Jankowski. **Interactive Granular Computations in Networks and Systems Engineering: A Practical Perspective.** Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 17. Springer, Heidelberg, 2017. doi:10.1007/978-3-319-57627-5.
- [SA2] A. Jankowski, A. Skowron. **A Wistech paradigm for intelligent systems.** Transactions on Rough Sets: Journal Subline 6, 2007 pp. 94–132. (LNCS 4374; Springer, Heidelberg). ISBN: 978-3-540-71198-8.
- [SA3] A. Jankowski, A. Skowron. **Wisdom technology: A rough-granular approach.** In: M. Marciniak, A. Mykowiecka (Eds.), Aspects of Natural Language Processing Essays Dedicated to Leonard Bolc on the Occasion of His 75th Birthday, Springer, Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, vol. 5070, 2009 pp. 3–41. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04735-0_1
- [SA4] A. Skowron, A. Jankowski. **Rough sets and interactive granular computing.** Fundamenta Informaticae 2016;147(2-3):371–385. doi:10.3233/FI-2016-1413.
- [SA5] A. Skowron, A. Jankowski. **Toward W2T foundations: Interactive granular computing and adaptive judgement.** In: N. Zhong, J. Ma, J. Liu, R. Huang, X. Tao (Eds.), Wisdom Web of Things (W2T), Springer, Heidelberg, 2016 pp. 47–71. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44198-6_3.

Publikacje Andrzeja Jankowskiego wymienione w Journal Citation Reports (JRC) i niewchodzące w skład *osiągnięcia naukowego*

- [PA01] A. Jankowski, C. Rauszer. Logical foundation approach to users domain restriction in data bases. North-Holland Publishing Company. Theoretical Computer Science 1983;23:11–36.
- [PA02] A. Jankowski, Z. Michalewicz. Closed sets of boolean terms in relational databases. Fundamenta Informaticae 1991;14(3):367–385. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=107734.107743>.
- [PA03] A. Skowron, J. Peters, J. Stepaniuk, A. Jankowski. Optimization in discovery of compound granules. Fundamenta Informaticae 2008;85(1-4):249–265. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1516165.1516183>.
- [PA04] A. Skowron, J. Stepaniuk, A. Jankowski, J. G. Bazan, R. Swiniarski. Rough set based reasoning about changes. Fundamenta Informaticae 2012;119(3-4):421–437. doi:10.3233/FI-2012-746.
- [PA05] J. Bazan, S. Buregwa-Czuma, A. Jankowski. A Domain Knowledge as a Tool For Improving Classifiers. Fundamenta Informaticae 2013;127(1-4):495–511. doi:10.3233/FI-2013-923.
- [PA06] A. Jankowski, A. Skowron, R. W. Swiniarski. Perspectives on uncertainty and risk in rough sets and interactive rough-granular computing. Fundamenta Informaticae 2014;129(1-2):69–84. doi:10.3233/FI-2014-961.
- [PA07] A. Jankowski, A. Skowron, R. Swiniarski. Interactive complex granules. Fundamenta Informaticae 2014;133(2-3):181–196. doi:10.3233/FI-2014-1070.
- [PA08] S. Dutta, A. Jankowski, A. Skowron. Interactive logical structures. Fundamenta Informaticae 2017;154(1-4):95–108. doi:10.3233/FI-2017-1554.
- [PA09] A. Skowron, A. Jankowski, P. Wasilewski. Rough sets and sorites paradox. Fundamenta Informaticae Fundamenta Informaticae 2018;157 doi:10.3233/FI-2018-1600 (przyjęto do druku).
- [PA10] A. Skowron, A. Jankowski. Interactive computations: Toward risk management in interactive intelligent systems. Natural Computing 2016;15(3):465–476. doi:10.1007/s11047-015-9486-5.

- [PA11] A. Jankowski. A Conjunctions in closure spaces. *Studia Logica* 1984;43(4):341–351. doi:10.1007/BF00370506.
- [PA12] A. Jankowski. Universality of the closure space of filters in the algebra of all subsets. *Studia Logica* 1985;44(1):1–9. <https://doi.org/10.1007/BF00370806>.
- [PA13] A. Jankowski. Disjunctions in closure spaces. *Studia Logica* 1985;44(1):11–24.
- [PA14] A. Jankowski. Galois structures. *Studia Logica* 1985;44(2):109–124. <http://www.jstor.org/stable/20015208>.
- [PA15] A. Jankowski, M. Zawadowski. Sheaves over Heyting Lattices. *Studia Logica* 1985;44(3):237–356. <http://www.jstor.org/stable/20015223>.
- [PA16] A. Jankowski. Retracts of the closure space of filters in the lattice of all subsets. *Studia Logica* 1986;45(2):135–154. <http://www.jstor.org/stable/20015254>.
- [PA17] A. Jankowski, J. Achinger. On decidable consequence operators. *Studia Logica* 1986;45(4):415–424. <http://www.jstor.org/stable/20015284>.
- [PA18] A. Jankowski. On closure spaces of filters in complete lattices of sets. *Journal of Symbolic Logic* 1980;45(2):394–396. (Logic Colloquium 78, Mons). <https://doi.org/10.1007/BF00373270>.
- [PA19] A. Jankowski. Recursive closure spaces. *Journal of Symbolic Logic* 1983;48(2):1220–1220. (Logic Colloquium 81, Marseille).
- [PA20] A. Jankowski. Some modifications of Scott’s theorem on injective spaces. *Journal of Symbolic Logic* 1984;48(2):693–694. (Logic Colloquium 82, Florence).

**Publikacje Andrzeja Jankowskiego nie wymienione
w Journal Citation Reports (JRC) i niewchodzące
w skład *osiągnięcia naukowego***

- [PA21] A. Jankowski. Formalizacja pewnych zależności między logikami. Master's Thesis, Univeristy of Warsaw, Warsaw, 1976. (in Polish).
- [PA22] A. Jankowski. Embedding of logical structures. Forschungsinstitut Oberwolfach Tagensberich 18, 1980, Mathematische Logic 20.04 bis 26.04, 1980;18:3–5.
- [PA23] A. Jankowski. Zanurzenia Struktur Logicznych, Ph. D. Thesis, vol. 10 seria B, February 1980. Institute of Mathematics Polish Academy of Sciences, Warsaw 1980. (in Polish).
- [PA24] A. Jankowski. Logical foundation approach to users domain restriction in data bases. Department of Computer Science, Polish Academy of Science, Warsaw 1980. (wstępna wersja [PA01]).
- [PA25] A. Jankowski. An alternative characterization of elementary logic. Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Série des Sciences Mathématiques 1982;30:9–13.
- [PA26] A. Jankowski. A characterization of the closed subsets of an $\langle \alpha, \beta \rangle$ -closure space using $\langle \alpha, \beta \rangle$ -base. Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Série des Sciences Mathématiques 1982;30:1–8.
- [PA27] A. Jankowski. Absolute retracts and absolute extensors in the category of closure spaces. In: W. Guzicki, W. Marek, A. Pelc, C. Rauszer (Eds.), Proceedings of a Conference held in September 1981 at Jadwisin, near Warsaw—Open Days in Model Theory and Set, University of Leeds, Leeds 1984 pp. 135–143.
- [PA28] Z. Ras, M. Emrich, A. Jankowski (Eds.). Proceedings of Second International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems - Colloquia Program. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge 1987.
- [PA29] A. Jankowski, Z. Michalewicz. Relational databases with boolean structured values of attributes. In: ISMIS88. North-Holland, Amsterdam 1988 pp. 180–189.

- [PA30] S. Chen, A. Jankowski, Z. Michalewicz. A neural network approach to database systems. In: Proceedings of the International Computer Symposium, Taipei, Taiwan, December 15-17, 1988.
- [PA31] A. Jankowski, J. M. Żytkow. A methodology for multisearch systems. In: ISMIS88. North-Holland, Amsterdam 1988 pp. 343–352.
- [PA32] P. Yadev, A. Jankowski. Robotic sensor for object recognition. In: Southeastcon 89, Energy and Information Technologies in the Southeast. IEEE, April 9-12, 1989, Columbia, South Carolina.
- [PA33] J. Żytkow, A. Jankowski. Hierarchical control and heuristics in multisearch systems. In: Proceedings of the Fourth International Symposium (ISMIS 1989), Charlotte, NC, USA, 11–14 October 1989.
- [PA34] J. Żytkow, A. Jankowski. Multisearch systems with hierarchical control: a tool for solving complex AI problems. In: IEEE International Workshop on Tools for Artificial Intelligence: Architectures, Languages and Algorithms, TAI 1989, Fairfax, VA, USA, October 23-25, 1989. IEEE, 1989 pp. 132–137. <http://dx.doi.org/10.1109/TAI.1989.65312>.
- [PA35] A. Jankowski, Z. Michalewicz, Z. Ras, D. Shoff. Issues on evolution programming. In: R. Janicki, W.W. Koczkodaj (Eds.), Computing and Information, North-Holland, Amsterdam. 1989 pp. 459–463.
- [PA36] Z. Michalewicz, A. Jankowski. The constraints problem in genetic algorithms. In: Emrich, M.S. Phifer (Ed.), Fourth International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems, Charlotte, NC, ORNL/DSRD-24, Oak Ridge National Laboratory, Knoxville, TN 1990 pp. 142–157.
- [PA37] B. Dunin-Kęplich, A. Jankowski, A. Skowron, M. Szczuka (Eds.). Monitoring, Security, and Rescue Tasks in Multiagent Systems (MSRAS 2004), vol. 28 of Advances in Soft Computing. Springer, Heidelberg 2005. ISBN: 978-3-540-23245-2, 978-3-540-32370-9
- [PA38] A. Jankowski, A. Skowron. Toward perception based computing: A rough-granular perspective. In: N. Zhong, J. Liu, Y. Yao, J. Wu, S. Lu, K. Li (Eds.), Web Intelligence Meets Brain Informatics, First WICI International Workshop, 2006, Beijing, China, December 15-16, 2006, Revised Selected and Invited Papers.

- Springer, vol. 4845 of Lecture Notes in Computer Science 2006 pp. 122–142. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77028-2_7.
- [PA39] A. Jankowski, A. Skowron. Toward rough-granular computing. In: A. An, J. Stefanowski, S. Ramanna, C. J. Butz, W. Pedrycz, G. Wang (Eds.), *Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing*, 11th International Conference, RSFDGrC 2007, Toronto, Canada, May 14-16, 2007, Proceedings. Springer, 2007, vol. 4482 of Lecture Notes in Computer Science 2007 pp. 1–12. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-72530-5_1.
- [PA40] A. Jankowski, A. Skowron. Logic for artificial intelligence: The Rasiowa - Pawlak School perspective. In: A. Ehrenfeucht, V. Marek, M. Srebrny (Eds.), *Andrzej Mostowski and Foundational Studies*, IOS Press, Amsterdam 2008, pp. 106–143. doi:10.3233/978-1-58603-782-6-106.
- [PA41] A. Jankowski, A. Skowron. Wisdom granular computing. In *Handbook of Granular Computing* (eds W. Pedrycz, A. Skowron and V. Kreinovich), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK 2008. doi:10.1002/9780470724163.ch14.
- [PA42] A. Jankowski, A. Skowron, M. S. Szczuka. Interactive granular computing in rightly judging systems. In: P. Wen, Y. Li, L. Polkowski, Y. Yao, S. Tsumoto, G. Wang (Eds.), *Rough Sets and Knowledge Technology*, 4th International Conference, RSKT 2009, Gold Coast, Australia, July 14-16, 2009. Proceedings. Springer, vol. 5589 of Lecture Notes in Computer Science 2009 pp. 1–16. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02962-2_1.
- [PA43] H. S. Nguyen, A. Jankowski, A. Skowron, J. Stepaniuk, M. Szczuka. Discovery of process models from data and domain knowledge: A rough-granular approach. In: J. T. Yao (Ed.), *Novel Developments in Granular Computing: Applications for Advanced Human Reasoning and Soft Computation*, IGI Global, Hershey, PA 2010, pp. 16–47. doi:10.4018/978-1-60566-324-1.ch002.
- [PA44] A. Skowron, J. Stepaniuk, A. Jankowski, J. Bazan. Rough derivatives as dynamic granules in rough granular calculus. In: S. Greco, B. Bouchon-Meunier, G. Coletti, M. Fedrizzi, B. Matarazzo, R. R. Yager (Eds.), *Advances on Computational Intelligence - Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU 2012)*, Catania, Italy, July 9-13, 2012. Part I, Springer, Heidelberg, vol. 297 of Communications in Computer

- and Information Science 2012 pp. 321–330. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31709-5_33.
- [PA45] A. Skowron, A. Jankowski, P. Wasilewski. Interactive computational systems: Rough granular approach. In: L. Popova-Zeugmann (Ed.), Proceedings of the 21th International Workshop on Concurrency, Specification and Programming, Berlin, Germany, September 26-28, 2012. CEUR-WS.org, vol. 928 of CEUR Workshop Proceedings 2012 pp. 358–369. <http://ceur-ws.org/Vol-928/0358.pdf>.
- [PA46] A. Jankowski, A. Skowron, P. Wasilewski. Risk management and interactive computational systems. Journal of Advanced Mathematics and Applications 2012;1(1):61–73. <https://doi.org/10.1166/jama.2012.1006>.
- [PA47] M. Durzewski, A. Jankowski, L. Szydełko, E. Wiszowata. On digitalizing the geographical dictionary of Polish Kingdom published in 1880. In: R. Bembenik, L. Skonieczny, H. Rybinski, M. Kryszkiewicz, M. Niezgodka (Eds.), Intelligent Tools for Building a Scientific InformationPlatform - Advanced Architectures and Solutions, Springer, vol. 467 of Studies in Computational Intelligence 2013 pp. 53–64. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35647-6_5.
- [PA48] A. Jankowski, A. Skowron, R. W. Swiniarski. Interactive computations: Toward risk management in interactive intelligent systems. In: P. Maji, A. Ghosh, M. N. Murty, K. Ghosh, S. K. Pal (Eds.), Proceedings of the 5th International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence (PReMI 2013), Kolkata, India, December 10-14, 2013, Springer, Heidelberg, vol. 8251 of Lecture Notes in Computer Science 2013 pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45062-4_1.
- [PA49] A. Krasuski, A. Jankowski, A. Skowron, D. Ślęzak. From sensory data to decision making: A perspective on supporting a fire commander. In: 2013 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, Atlanta, Georgia, USA, 17-20 November 2013, Workshop Proceedings. IEEE Computer Society 2013 pp. 229–236. <http://dx.doi.org/10.1109/WI-IAT.2013.188>.
- [PA50] A. Jankowski, A. Skowron, R. W. Swiniarski. Interactive rough-granular computing in Wisdom Technology. In: T. Yoshida, G. Kou, A. Skowron, J. Cao, H. Hacid, N. Zhong (Eds.), Proceedings

- of the 9th International Conference on Active Media Technology (AMT 2013), Maebashi, Japan, October 29-31, 2013, Springer, Heidelberg, vol. 8210 of Lecture Notes in Computer Science 2013 pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02750-0_1.
- [PA51] A. Jankowski, A. Skowron, R. Swiniarski. Interactive complex granules. In: M. Szczuka, L. Czaja, M. Kacprzak (Eds.), Proceedings of the 22nd International Workshop on Concurrency, Specification and Programming (CS&P'2013), Warsaw, Poland, September 25–27, 2013, vol. 1032 of CEUR Workshop Proceedings, RWTH Aachen University 2014 pp. 206–218. urn:nbn:de:0074-1032-7
- [PA52] A. Skowron, A. Jankowski, R. W. Swiniarski. 30 years of rough sets and future perspectives. In: D. Ciucci, M. Inuiguchi, Y. Yao, D. Slezak, G. Wang (Eds.), Proceedings of the 14th International Conference on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing (RSFDGrC 2013), Halifax, Canada, October 11-14, 2013. Springer, Heidelberg, 2013, vol. 8170 of Lecture Notes in Computer Science. 2013 pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41218-9_1
- [PA53] A. Jankowski, A. Skowron, R. Swinarski. Interactive computations on complex granules. In: M. Kryszkiewicz, C. Cornelis, D. Ciucci, J. Medina-Moreno, H. Motoda, Z. W. Ras (Eds.), Proceedings of the Second International Conference on Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms (RSEISP 2014), Springer, Heidelberg, vol. 8537 of Lecture Notes in Computer Science. 2014 pp. 123–134. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08729-0_11.
- [PA54] A. Jankowski, A. Skowron, R. Swinarski. Dealing with uncertainty: From rough sets to interactive rough-granular computing. In: M. Chakraborty, A. Skowron, M. Maiti, S. Kar (Eds.), Factes of uncertainties and applications, IFCUA, Kolkata, India, December 2013, Springer Proceedings in Mathematics and Statistics, Springer, New Delhi 2015 pp. 17–32. doi:10.1007/978-81-322-2301-6_2.
- [PA55] M. Szczuka, A. Jankowski, A. Skowron, D. Ślęzak. Building granular systems – from concepts to applications. In: Y. Yao, Q. Hu, H. Yu, J. W. Grzymala-Busse (Eds.), Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining, and Granular Computing - 15th International Conference, RSFDGrC 2015, Tianjin, China, November 20-23, 2015, Proceedings. Springer, 2015, vol. 9437 of Lecture Notes in Computer Science 2015 pp. 245–255. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-25783-9_22.

- [PA56] A. Skowron, A. Jankowski. Interactive granular computing. In: D. Ciucci, G. Wang, S. Mitra, W.Wu (Eds.), *Rough Sets and Knowledge Technology - 10th International Conference, RSKT 2015*, held as part of the International Joint Conference on Rough Sets, IJCRS 2015, Tianjin, China, November 20-23, 2015, *Proceedings*. Springer, vol. 9436 of *Lecture Notes in Computer Science 2015* pp. 50–61. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-25754-9_5P20.
- [PA57] A. Skowron, A. Jankowski. Rough sets and vague concepts. In: *Annals of the University of Bucharest*, vol. LXII(3) of *Informatics Series 2015* pp. 119–133.
- [PA58] A. Skowron, A. Jankowski, S. Dutta. Toward problem solving support based on big data and domain knowledge: Interactive granular computing and adaptive judgement. In: N. Japkowicz, J. Stefanowski (Eds.), *Big Data Analysis: New Algorithms for a New Society*, vol. 16 of *Series Big Data*. Springer, Heidelberg 2015 pp. 44–90. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26989-4_3.
- [PA59] A. Skowron, A. Jankowski, R. W. Swiniarski. Foundations of rough sets. In: J. Kacprzyk, W. Pedrycz (Eds.), *Springer Handbook of Computational Intelligence*, Springer 2015 pp. 331–348. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2_21.
- [PA60] A. Skowron, A. Jankowski, P. Wasilewski. Rough sets and sorites paradox. In: H. Schlingloff (Ed.), *International Workshop on Concurrency, Specification and Programming (CS&P 2016)*, Rostock, Germany, September 28-30, *CEUR-WS.org 2016*, vol. 1698 of *CEUR Workshop Proceedings 2017* pp. 49–60. [urn:nbn:de:0074-1698-4](http://nbn:de:0074-1698-4).
- [PA61] A. Skowron, A. Jankowski, S. Dutta. Interactive granular computing. In: *Granular Computing*, Springer, Heidelberg 2016;1(2): 95–113. doi:10.1007/s41066-015-0002-1.
- [PA62] M. Szczuka, A. Skowron, A. Jankowski, D. Ślęzak. Granular systems: From granules to systems. In: J. Webster (Ed.), *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. 2016, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ 2016 pp. 1–8.
- [PA63] A. Skowron, H. Nguyen, A. Jankowski. Rough sets in pattern recognition. In: S. Pal, A. Pal (Eds.), *Granular Computing*, World Scientific. 2017, pp. 293–321.

- [PA64] A. Skowron, E. Orłowska, A. Jankowski. Helena Rasiowa (1917-1994). In: A. K. Wroblewski (Ed.), Portrety Uczonych. Profesorowie Uniwersytetu Warszawskiego po 1945 roku, Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2017 pp. 566–573. (in print).

Patenty

- [PT1] A. Jankowski, Z. Michalewicz. US Patent 09/920,732 (2001): System and method for analysis and clustering of documents for search engine. URL http://scholar.google.pl/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=zVpMZBkAAAAJ&citation_for_view=zVpMZBkAAAAJ:u5HHmVD_u08C
- [PT2] A. Jankowski, Z. Michalewicz. US Patent 09/920,739 (2001): Internet search engine with interactive search criteria construction. URL http://scholar.google.pl/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=zVpMZBkAAAAJ&citation_for_view=zVpMZBkAAAAJ:9yKSN-GCB0IC

Literatura zewnętrzna

- [1] Cyber-physical and ultra-large scale systems, 2013.
URL <http://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?assetid=85282>.
- [2] Amershi S., Cakmak M., Knox W.B., Kulesza T.: Power to the people: The role of humans in interactive machine learning. *AI Magazine*, 2014;35:105–120. URL <https://doi.org/10.1609/aimag.v35i4.2513>.
- [3] Anthony M., Biggs N.: *Computational Learning Theory. An Introduction*. Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science. Cambridge University Press, Cambridge UK, 1992.
- [4] Arbib M.A. (ed.): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks (Second Edition)*. MIT Press, Cambridge, MA, 2002. ISBN: 9780262011976.
- [5] Åström K.J., Wittenmark B. (eds.): *Adaptive Control*. Dover Publications, New York, NY, 2008. ISBN: 0486462781.
- [6] Auyang S.Y.: *Foundations of Complex-system Theories in Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2008. ISBN:10:0521778263, 13: 978-0521778268.
- [7] Aven T.: *Risk Analysis Assessing Uncertainties beyond Expected Values and Probabilities*. Wiley, New York, NY, 2008. ISBN: 978-0-470-51736-9.
- [8] Bar-Yam Y.: *Dynamics of Complex Systems. Studies in Nonlinearity*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997.
- [9] Bar-Yam Y.: *The When Systems Engineering Fails - Toward Complex Systems Engineering*. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems*, vol. 2 of *Man & Cybernetics*, Washington, DC 2003, pp. 16–31.
- [10] Barabasi A.L.: *Network Science*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2016. ISBN: 9781107076266.
- [11] Bargiela A., Pedrycz W.: *Granular Computing: An Introduction*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003.

- [12] Barrat A., Barthélemy M., Vespignani A.: *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2008. ISBN: 0521879507, 9780521879507.
- [13] Barwise J.: Absolute logics and $l_{\infty, \omega}$. *Annals of Mathematical Logic*, 1972;4:309–340.
- [14] Barwise J., Cooper R.: Generalized quantifiers and natural language. *Linguistics and Philosophy*, 1981;4(2):159–219.
- [15] Barwise J., Seligman J.: *Information Flow: The Logic of Distributed Systems*. Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997. ISBN: 0521583861, 9780521583862.
- [16] Bazan J.: Hierarchical classifiers for complex spatio-temporal concepts. *Transactions on Rough Sets: Journal Subline*, vol. 5390 of LNCS, Springer, Heidelberg, 2008;9:474–750.
- [17] Behnke S.: *Hierarchical Neural Networks for Image Interpretation*, vol. 2766 of LNCS, Springer, Heidelberg, 2003. doi:10.1007/b11963.
- [18] Ben-Jacob E.: Learning from bacteria about natural information processing. *Annals of the New York Academy of Sciences: Natural Genetic Engineering and Natural Genome Editing* 2009;1178:79–90. doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05022.x.
- [19] Béziau J.Y. (ed.): *Universal Logic: An Anthology From Paul Hertz to Dov Gabbay*. Birkhauser, Basel, 2012. ISBN: 978-3-0346-0144-3.
- [20] Bianchini M., Maggini M., Jain L.C. (eds.): *Handbook on Neural Information Processing*. Series Intelligent Systems Reference Library. Springer, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-3-642-36657-4.
- [21] Birkhoff G.: *Lattice Theory* (3rd Ed), AMS Colloquium Publications, vol. 25 of American Mathematical Society, Providence, RI, 1967.
- [22] Blanchard B.S.: *System Engineering Management*. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2008. ISBN: 10:0470167351, 13:978-0470167359.
- [23] Bloom S.L., Brown D.J., Suszko R.: Some Theorems on Abstract Logics. In: Béziau [19], 1970, pp. 257–262.

- [24] Blume L., Durlauf S. (eds.): The Economy as an Evolving Complex System, III. Current Perspectives and Future Directions. Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity. Oxford University Press, Oxford, UK, 2005. ISBN: 10:0195162595, 13:978-0195162592.
- [25] Boardman A., Greenberg D., Vining A., Weimer D.: Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice (4 edition). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2010. ISBN: 10:0137002696, 13:978-0137002696.
- [26] Boccaletti S., Latorab V., Morenod Y., Chavezf M., Hwang D.U.: Complex networks: Structure and dynamics. Physics Reports, 2006;424(4-5):175–308. URL <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.
- [27] Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G.: Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, Oxford, UK, 1999. ISBN: 0-19-513159-2.
- [28] Borsuk K.: Theory of Retracts. Monografie matematyczne t. 44. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warsaw, 1967.
- [29] Bower J.M., Bolouri H. (eds.): Computational Modeling of Genetic and Biochemical Networks. MIT Press, Cambridge, MA, 2001. ISBN: 9780262024815.
- [30] Boy G.A. (ed.): The Handbook of Human-Machine Interaction. Ashgate, Farnham UK, 2011. ISBN: 978-0-7546-7580-8.
- [31] Brandt F., Conitzer V., Endriss U., Lang J., Procaccia A.D. (eds.): Handbook of Computational Social Choice. Cambridge University Press, New York, NY, 2016. ISBN: 1107060435, 9781107060432.
- [32] Brooks F.P.: No silver bullet - essence and accident in software engineering. In: H.J. Kugle (ed.) Proceedings of the IFIP Tenth World Computing Conference, pp. 1069–1076. Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [33] Brooks F.P.: The Mythical Man-Month: Essays on Software Engineering. Addison-Wesley, Boston, MA, 1995. ISBN SBN 0-201-83595-9.
- [34] Caldarelli G.: Scale-Free Networks. Complex Webs in Nature and Technology. Oxford University Press, New York, NY, 2007. ISBN: 13:978-0199211517.

- [35] Caldarelli G., Vespignani A.: Large Scale Structure and Dynamics of Complex Networks. From Information Technology to Finance and Natural Science. World Scientific, Singapore, 2007 ISBN: 981270664X, 9789812706645.
- [36] Calvert G.A., Spence C., Stein B.E. (eds.): The Handbook of Multisensory Processes. The MIT Press, Cambridge, MA, 2004. ISBN: 9780262033213.
- [37] Calvo P., Symons J. (eds.): The Architecture of Cognition. Rethinking Fodor and Pylyshyn's Systematicity Challenge. The MIT Press, Cambridge, MA, 2008. ISBN: 9780262027236.
- [38] Cao L.: Data science: challenges and directions. Communications of the ACM, Volume 60 Issue 8, August 2017, pp. 59-68. doi:10.1145/3015456.
- [39] Chella A., Lebiere C., Noelle D. C., Samsonovich A. V.: On a Roadmap to Biologically Inspired Cognitive Agents. Biologically Inspired Cognitive Architectures 2011 - Proceedings of the Second Annual Meeting of the BICA Society, Arlington, Virginia, USA, November 4-6, 2011. pp. 453-460. doi:10.3233/978-1-60750-959-2-453.
- [40] Chen G., Wang X., Li, X.: Fundamentals of Complex Networks: Models, Structures and Dynamics. Wiley, Hoboken, NJ, 2015. ISBN: 978-1-118-71811-7.
- [41] Cherifi H., Gonçalves B., Menezes R., Sinatra R. (eds.): Complex Networks VII. Proceedings of the 7th Workshop on Complex Networks (CompleNet 2016), vol. 644 of Studies in Computational Intelligence. Springer, Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-319-30569-1.
- [42] Chilton P.: Language, Space and Mind. The Conceptual Geometry of Linguistic Meaning. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2014. ISBN: 10:1107010136, 13:978-1107010130.
- [43] Chiong R.: Intelligent Systems for Automated Learning and Adaptation: Emerging Trends and Applications. IGI Global, Herehey, PA, 2010. doi:10.4018/978-1-60566-798-0.
- [44] Cohen R., Havlin S.: Complex Networks. Structure, Robustness and Function. Cambridge University Press, New York, NY, 2010. ISBN: 9780521841566.

- [45] Cox L.A.J.: Risk Analysis of Complex and Uncertain Systems. vol 129 of International Series in Operations Research & Management Science. Springer Verlag US, 2009. doi:10.1007/978-0-387-89014-2.
- [46] Csermely P.: Weak Links. Stabilizers of Complex Systems from Proteins to Social Networks. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006. doi:10.1007/978-3-540-31157-7.
- [47] Curry H.: Lessons on Algebraic Logic. Introduction and Chapters I and II. In: Béziau [19], 1952, pp. 133–162.
- [48] D’Agostino G., Scala A. (eds.): Networks of Networks: The Last Frontier of Complexity. Springer International Publishing. 2014. doi:10.1007/978-3-319-03518-5.
- [49] Darley V., Outkin A.V.: A NASDAQ Insights on a Major Market from the Science of Complex Adaptive Systems. World Scientific, Singapore, 2007. ISBN: 9812700013.
- [50] Davis A.: 201 Principles of Software Development. McGraw-Hill, New York, NY, 1995. ISBN: 10:0070158401, 13:978-0070158405.
- [51] Dehmer M. (ed.): Structural Analysis of Complex Networks. Birkhäuser Boston, Springer, Heidelberg 2011. ISBN: 978-0-8176-4788-9, 978-0-8176-4789-6.
- [52] Dehmer M., Emmert-Streib F. (eds.): Analysis of Complex Networks. From Biology to Linguistics. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-527-32345-6.
- [53] Dehmer M., Emmert-Streib F., Mehler A. (eds.): Towards an Information Theory of Complex Networks. Statistical Methods and Applications. Birkhäuser Basel, Springer, Heidelberg, 2011. doi:10.1007/978-0-8176-4904-3.
- [54] Department of Defense Systems Management College: Systems Engineering Fundamentals. CreateSpace Independent Publishing Platform, Fort Belvoir, VA, 2001.
- [55] Desai A.: Adaptive complex enterprises. Communications ACM, 2005:48(5):32–35. doi:10.1145/1060710.1060736.
- [56] Desai R., Kapral R.: Dynamics of Self-Organized and Self-Assembled Structures. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2009. ISBN: 9780521883610.

- [57] Doherty P., Łukaszewicz W., Skowron A., Szałas A.: Knowledge Engineering: A Rough Set Approach, vol. 202 of Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer, Heidelberg. 2006. doi:10.1007/3-540-33519-6.
- [58] Duda R., Hart P., Stork R.: Pattern Classification. John Wiley & Sons, New York, NY. 2002.
- [59] Ehrentreich, N. (ed.): Agent Based Modeling. The Santa Fe Institute Artificial Stock Market Model Revisited, vol. 602 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, Heidelberg. 2008. doi:10.1007/978-3-540-73879-4.
- [60] Eliasmith C.: How to Build a Brain. A Neural Architecture for Biological Cognition. Oxford University Press, New York, NY. 2013. doi:10.1093/acprof:oso/9780199794546.001.0001.
- [61] Ellis N.C. Larsen-Freeman D. (eds.): Language as a Complex Adaptive System. Language Learning Research Club, University of Michigan, MI, 2009.
- [62] Estep M.: Self-Organizing Natural Intelligence. Issues of Knowing, Meaning, and Complexity. Springer-Verlag, Heidelberg, 2014. doi:10.1007/1-4020-5299-5.
- [63] Evans J.: Hypothetical Thinking: Dual Processes in Reasoning and Judgement. Essays in Cognitive Psychology. Psychology Press, New York, NY, 2007. doi:10.4324/9780203947487.
- [64] Fahle M., Poggio T.: Perceptual Learning. MIT Press, Cambridge, MA, 2002. ISBN: 9780262062213.
- [65] Fan J., Han F., Liu H.: Challenges of big data analysis. National Science Review, 2014;1(2):293–314. URL <https://doi.org/10.1093/nsr/nwt032>.
- [66] Feistel R., Ebeling W.: Physics of Self-Organization and Evolution. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2011. doi:10.1002/9783527636792.
- [67] Feldman J.A.: From Molecule to Metaphor. A Neural Theory of Language. The MIT Press, Cambridge, MA, 2006. ISBN: 9780262062534.
- [68] Feng J., Jost J., Minping Q. (eds.): Network: From Biology to Theory. Springer, Berlin, 2007. doi:10.1007/978-1-84628-780-0.

- [69] Firesmith D., Capell P., Hammons C., Latimer D., Merendino T., Falkenthal D.: The Method Framework for Engineering System Architectures. Auerbach Publications. Boston, MA, USA 2008. ISBN: 1420085751, 9781420085754.
- [70] Fourman M., Scott D.: Sheaves and logic. In: M. Fourman, C. Mulvey, D. Scott (eds.) Applications of Sheaves, vol. 753 of Lecture Notes in Mathematics, Springer, Heidelberg, 1979 pp. 302–401. ISBN: 978-3-540-34849-8.
- [71] Frankish K., Ramsey W. (eds.): The Cambridge Handbook of Cognitive Science. Cambridge University Press, Cambridge, 2012. ISBN: 10: 0521691907, 13: 978-0521691901.
- [72] Friesz T.L., Bernstein D.: Foundations of Network Optimization and Games. vol. 3 of Complex Networks and Dynamic Systems. Springer, Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-1-4899-7594-2.
- [73] Fu X., Small M., Chen G.: Propagation Dynamics on Complex Networks. Models, Methods and Stability Analysis. Wiley, Chichester, UK, 2014. ISBN: 978-1-118-53450-2.
- [74] Gallagher S., Schmicking D. (eds.): Handbook of Phenomenology and Cognitive Science. Springer, Heidelberg, 2010. doi:10.1007/978-90-481-2646-0.
- [75] Gärdenfors P.: The Geometry of Meaning. Semantics Based on Conceptual Spaces. The MIT Press, Cambridge, MA, 2014. ISBN: 9780262026789.
- [76] Garling D.J.H. (Ed.) A Course in Galois Theory. Cambridge University Press, New York, NY, 1987. ISBN: 9780521312493
- [77] Gell-Mann M.: The Quark and the Jaguar - Adventures in the Simple and the Complex. Brown and Co., London, 1994.
- [78] Gentner D., Holyoak K.J., Kokinov B.K. (eds.): The Analogical Mind. Perspectives from Cognitive Science. The MIT Press, Cambridge, MA, 2001. ISBN: 0262316056, 9780262316057.
- [79] Gershenson C. (ed.): Design and Control of Self-organizing Systems. CopIt ArXives, Mexico City, Boston, MA, 2007. ISBN: 0983117233, 9780983117230.
- [80] Gillies D.: Revolutions in Mathematics. Oxford Science Publications, The Calderon Press, Oxford University, Oxford, 1992. ISBN: 0198539401, 9780198514862.

- [81] Givant S.R., McKenzie R.N. (eds.): The Collected Papers of Alfred Tarski, 4 vols. Birkhäuser, Basel, 1986.
- [82] Glivenko V.: Sur quelques points de la logique de M. Brouwer. Academie Royale de Belgique, Bulletins de la classe des sciences, 1929;15(5):183–188.
- [83] Godel K.: Zur intuitionistischen Arithmetik und Zahlentheorie. In: Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums ed. Menger Heft 4 Wien, 1931, pp. 34–38.
- [84] Goldin D., Smolka S., Wegner P. (eds.): Interactive Computation: The New Paradigm. Springer, Heidelberg, 2006. ISBN: 10:354034666X, 13:978-3540346661.
- [85] Gordon D.M.: Ant Encounters. Interaction Networks and Colony Behavior. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2010. ISBN: 10:0691138796, 13:978-0691138794.
- [86] Greenspan A.: The Map and the Territory: Risk, Human Nature, and the Future of Forecasting. Penguin Press HC, New York, NY, 2013.
- [87] Gros C.: Complex and Adaptive Dynamical Systems. A Primer. Springer, Heidelberg, 2008. doi:10.1063/1.3177233.
- [88] Gross T., Sayama H. (eds.): Adaptive Networks. Theory, Models and Applications. Springer, Heidelberg, 2009. ISBN: 13:978-3642012839, 10:3642012833.
- [89] Grossi D., Pigozzi G.: Judgment Aggregation: A Primer (Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning) 1st Edition.. Morgan & Claypool, San Rafael, CA 2014. ISBN: 10:1627050876, 13:978-1627050876.
- [90] Hager P., Halliday J.: Recovering Informal Learning Wisdom, Judgement and Community. Springer, Heidelberg, 2006. doi:10.1007/1-4020-5346-0.
- [91] Haken H.: Information and Self-Organization A Macroscopic Approach to Complex Systems. Springer, Berlin, 2006. doi:10.1007/3-540-33023-2.
- [92] Harnad S.: The symbol grounding problem. Physica. 1990;42(1-3):335–346. URL [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6).

- [93] Harvard Business School Press: SWOT Analysis I: Looking Outside for Threats and Opportunities. Harvard Business School Publishing Corporation, Boston, MA, 2006.
- [94] Harvard Business School Press: SWOT Analysis II: Looking Inside for Strengths and Weaknesses. Harvard Business School Publishing Corporation, Boston, MA, 2006.
- [95] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H.: The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer-Verlag, Heidelberg, 2001. doi:10.1007/978-0-387-21606-5.
- [96] Hausser R.: A Computational Model of Natural Language Communication Interpretation, Inference, and Production in Database Semantics. Springer, Heidelberg, 2006. doi:10.1007/3-540-35477-8.
- [97] Hawkins J.A., Gell-Mann M. (eds.): The Evolution of Human Languages. Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1992. URL <http://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20150925-094620162>.
- [98] Helbig H.: Knowledge Representation and the Semantics of Natural Language. Springer, Heidelberg, 2006. doi:10.1007/3-540-29966-1.
- [99] Helbing D. (ed.): Social Self-Organization Agent-Based Simulations and Experiments to Study Emergent Social Behavior. Springer, Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-642-24003-4, 978-3-642-24004-1.
- [100] Helbing D.: Globally networked risks and how to respond. Nature, 2013;497:51–59. doi:10.1038/nature12047.
- [101] Heller M.: The Ontology of Physical Objects. Four Dimensional Hunks of Matter. Cambridge Studies in Philosophy. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990. ISBN: 10: 052138544X, 13:978-0521385442.
- [102] Higgs, D.: A category approach to Boolean-valued set theory. University of Waterloo, Waterloo, 1973.
- [103] Hoekstra A.G., Kroc J., Sloot P.M. (eds.): Simulating Complex Systems by Cellular Automata. Springer, Heidelberg, 2010. doi:10.1007/978-3-642-12203-3.

- [104] Holland J.H.: Signals and Boundaries. Building Blocks for Complex Adaptive Systems. The MIT Press, Cambridge, MA, 2014. ISBN: 9780262017831.
- [105] Höller J., Tsiatsis V., Mulligan C., Avesand S.K.S., Boyle D.: From Machine-to-Machine to the Internet of Things. Introduction to a New Age of Intelligence. Academic Press, Elsevier, Waltham, MA, 2014. ISBN: 10:012407684X, 13:978-0124076846.
- [106] Holme P., Saramäki J. (eds.): Temporal Networks. Springer, Heidelberg, 2011. doi:10.1016/j.physrep.2012.03.001.
- [107] Hooker C.: Introduction to philosophy of complex systems part a: Towards a framework for complex systems. In: C. Hooker (ed.) Handbook of the of Science Philosophy vol. 10 of Philosophy of Complex Systems, Elsevier, Amsterdam, 2011, pp. 3–90. ISBN: 9780444520760.
- [108] Hooker C.: Introduction to philosophy of complex systems part b: Scientific paradigm + philosophy of science for complex systems: a first presentation c. 2009. In: C. Hooker (ed.) Handbook of the of Science Philosophy, vol. 10 of Philosophy of Complex Systems, Elsevier, Amsterdam, 2011, pp. 841–909. ISBN: 9780444520760.
- [109] Huhns M.N., Singh M.P.: Readings in Agents. Morgan Kaufmann, San Mateo, 1998. ISBN:1-55860-495-2.
- [110] Jackendoff R.: Foundations of Language. Brain, Meaning, Grammar. Oxford University Press, Oxford, UK, 2002.
- [111] Jagadish H., Gehrke J., Labrinidis A., Papakonstantinou Y., Patel J.M., Ramakrishnan R., Shahabi C.: Big data and its technical challenges. Communications of The ACM, 2014;57(7):86–94. doi:10.1145/2611567.
- [112] Johnson-Laird P.N.: How We Reason. The MIT Press, Cambridge, MA, 2008.
- [113] Kacprzyk J., Pedrycz W.: Springer Handbook of Computational Intelligence. Springer, Heidelberg, 2015. doi:10.1007/978-3-662-43505-2.
- [114] Kahneman D.: Thinking, Fast and Slow. Farrar, Straus and Giroux, New York, NY, 2011. ISBN: 1429969350, 9781429969352.

- [115] Kari L., Rozenberg G.: The many facets of natural computing. *Communications of the ACM*, 2008;51(10):72–83. doi:10.1145/1400181.1400200.
- [116] Kelly J.E., Hamm S.: *Smart Machines. IBM’s Watson and the Era of Cognitive Computing*. Columbia University Press, New York. NY, 2013. ISBN: 9780231168564, 9780231537278.
- [117] Kèpés F. (ed.): *Biological Networks*. World Scientific, Singapore, 2007. ISBN: 978-981-270-695-9.
- [118] Kiel F.: *Return on Character: The Real Reason Leaders and Their Companies Win*. Harvard Business Review Press, Brighton, MA, 2015. ISBN-10:1625271301, 13:978-1625271303.
- [119] Kloesgen W., Żytkow J. (eds.): *Handbook of Knowledge Discovery and Data Mining*. Oxford University Press, Oxford, 2002. ISBN: 0-19-511831-6.
- [120] Knight C., Hurford M.S.K.J.R. (eds.): *The Evolutionary Emergence of Language. Social Function and the Origins of Linguistic Forms*. Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000. ISBN: 0521786967, 9780521786966.
- [121] Koehler D.J., Harvey N.: *Blackwell Handbook of Judgment and Decision Making*. Blackwell Publishing, Malden, MA, 2004.
- [122] Kossiakoff A., Sweet W., Seymour S., Biemer S.: *Systems Engineering Principles and Practice*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2011. ISBN: 978-0-470-40548-2.
- [123] Kravtsov Y. (ed.): *Limits of Predictability*. Springer, Heidelberg, 1993. ISBN: 978-3-642-51010-6, 978-3-642-51008-3.
- [124] Krohn W., Küppers G., Nowotny H. (eds.): *Selforganization. Portrait of a Scientific Revolution*. Kluwer, Springer, Dordrecht, 2008.
- [125] Kuratowski K., Mostowski A.: *Set Theory, with an Introduction to Descriptive Set Theory*. Polish Scientific Publishers PWN, Warszawa, 1976. ISBN: 0720404703, 9780720404708.
- [126] Kotseruba I, Gonzalez O. A., Tsotsos J. F.: *A Review of 40 Years of Cognitive Architecture Research: Focus on Perception, Attention, Learning and Applications*. CoRR vol. abs/1610.08602. 2016. URL <http://arxiv.org/abs/1610.08602>.

- [127] Kyan M., Muneesawang P., Jarrah K., Guan L.: *Unsupervised Learning: A Dynamic Approach*. IEEE Press Series on Computational Intelligence. Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, 2014. ISBN: 978-0-470-27833-8.
- [128] Laird J. (ed.): *The Soar Cognitive Architecture*. MIT Press, Cambridge, MA, 2012. ISBN: 0262122960 9780262122962.
- [129] Landau I.D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. (eds.): *Adaptive Control. Algorithms, Analysis and Applications*. Springer, Heidelberg, 2011. ISBN: 978-0-85729-663-4, 978-0-85729-664-1.
- [130] Leitner S., Wall F. (eds.): *Artificial Economics and Self Organization. Agent-Based Approaches to Economics and Social Systems*. Springer, Heidelberg, 2014. doi:10.1007/978-3-319-00912-4.
- [131] Lerner J., Wagner D., Zweig K.A. (eds.): *Algorithmics of Large and Complex Networks. Design, Analysis, and Simulation*. Springer, Heidelberg, 1998.
- [132] Lindström P.: First order predicate logic with generalized quantifiers. *Theoria*, 1966;32(3):166–195. doi:10.1111/j.1755-2567.1966.tb00600.x.
- [133] Lindström P.: On extensions of elementary logic. *Theoria*, 1969; 35(1):1–11. doi:10.1111/j.1755-2567.1969.tb00356..
- [134] Liu J.: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems: Explorations in Learning, Self-Organization and Adaptive Computation*. World Scientific Publishing, Singapore, 2001. ISBN: 978-981-02-4282-4.
- [135] Loritz D.: *How the Brain Evolved Language*. Oxford University Press, Oxford, UK, 1999. ISBN: 0198027966, 9780198027966.
- [136] Lü J., Yu X., Chen G., Yu W. (eds.): *Complex Systems and Networks. Dynamics, Controls and Applications*. Springer, Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-662-47824-0.
- [137] Lu X.B., Qin B.Z.: *Synchronization in Complex Networks*. Nova Science Publishers, New York, NY, 2011.
- [138] Łukasiewicz J.: O logice trójwartościowej (on three-valued logic). *Ruch Filozoficzny*, 1920;5:170–171.
- [139] Łukasiewicz J.: On the intuitionistic theory of deduction. *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 1952;55:202–212.

- [140] Łukasiewicz J.: Selected works (Studies in logic and the foundations of mathematics). North-Holland, Amsterdam, 1970. ISBN: 10:0720422523, 13:978-0720422528.
- [141] Mac Lane S., Birkhoff G.: Algebra. American Mathematical Soc., Providence, Rhode Island, 2010.
- [142] Mac Lane S., Moerdijk I.: Sheaves in Geometry and Logic: A First Introduction to Topos Theory. Science & Business Media, Inc. New York, NY. 1992.
- [143] MacKenzie I.S.: Human-Computer Interaction: An Empirical Research Perspective. Morgan Kaufmann, Burlington, Massachusetts, 2013. ISBN: 10:0124058655, 13:978-0124058651.
- [144] Maimon O., Rokach L. (eds.): The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. Springer, Heidelberg, 2005. ISBN: 978-0-387-24435-8, 978-0-387-25465-4.
- [145] Margolis E., Laurence S. (eds.): The Conceptual Mind. New Directions in the Study of Concepts. The MIT Press, Cambridge, MA, 2015. ISBN: 9780262028639.
- [146] Marr D.: Vision. A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. The MIT Press, Cambridge, MA, 2010. ISBN: 10:0262514621, 13:978-0262514620.
- [147] Martin W.M. (ed.): Theories of Judgment: Psychology, Logic, Phenomenology. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2006. ISBN: 1139447742, 9781139447744.
- [148] Mei S., Zarrabi N., Lees M., Sloot P.: Complex agent networks: An emerging approach for modeling complex systems. Journal Applied Soft Computing, 2015;37(C):311–321.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494615005049>
- [149] Mendel J.M., Wu D.: Perceptual Computing. Aiding People in Making Subjective Judgments. IEEE Press Series on Computational Intelligence. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2010. ISBN: 978-0-470-47876-9.
- [150] Menezes R., Evsukoff A., González M.C. (eds.): Complex Networks. Vol. 424 of Studies in Computational Intelligence. Springer, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-3-642-30287-9.

- [151] Meyn S.: Control Techniques for Complex Networks. Cambridge University Press, New York, NY, 2008. ISBN: 13:9780521884419.
- [152] Miikkulainen R., Bednar J.A., Choe Y., Sirosh J. (eds.): Computational Maps in the Visual Cortex. Science+Business Media, Inc., New York, NY, 2005. ISBN: 978-0-387-22024-6, 978-0-387-28806-2.
- [153] Miller J.H., Page S.E.: Complex Adaptive Systems. An introduction to computational models of social life. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2007. ISBN: 9780691127026.
- [154] Minsky M.: Society of Mind. Simon & Schuster, New York, NY, 1985.
- [155] Minsky M.: Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Mind. Simon & Schuster, New York, NY, 2006. ISBN: 13:978-0743276641, 10: 0743276647.
- [156] Mishra R.K., MaaB D., Zwierlein E. (eds.): On Self-Organization. An Interdisciplinary Search for a Unifying Principle. Springer, Heidelberg, 1993.
- [157] Mitchel T.M.: Machine Learning. McGraw-Hill Series in Computer Science, Boston, MA, 1999.
- [158] Mitchell M.: Complex systems: Network thinking. Artificial Intelligence, 2006;170(18):1194–1212. URL <https://doi.org/10.1016/j.artint.2006.10.002>.
- [159] Mitchell M. (ed.): Complexity: A Guided Tour. Oxford University Press, Oxford, UK, 2009. ISBN: 9780195124415.
- [160] Montgomery K.: Clinical Judgment and the Practice of Medicine. Oxford University Press, 2005.
- [161] Mooney R.: Learning to connect language and perception. In: D. Fox, C.P. Gomes (eds.) Proceedings of the 23rd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Chicago, IL, July 13–17, 2008, pp. 1598–1601. (Senior Member Paper). URL <http://www.cs.utexas.edu/users/ai-lab/?mooney:aaai08>.
- [162] Moore E.H.: Introduction to a Form of General Analysis. In: The New Haven Mathematical Colloquium, New Haven: Yale University Press, vol. 2, 1910, pp. 1–150.

- [163] Mostowski A.: On a generalization of quantifiers. *Fundamenta Mathematicae*, 1957;44(1):12–36.
- [164] Namatame A., Kaizouji T., Aruka Y. (eds.): *The Complex Networks of Economic Interactions*. Springer, Heidelberg, 2006. doi: 10.1007/3-540-28727-2.
- [165] National Aeronautics and Space Administration: *NASA Systems Engineering Handbook*. NASA Headquarters, Washington, D.C, 2007.
- [166] Newman, M.E.J.: The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.* 2006;45(2):167–256. URL <https://doi.org/10.1137/S003614450342480>.
- [167] Niazi M.A., Hussain A.: *Cognitive Agent-based Computing-I. A Unified Framework for Modeling Complex Adaptive Systems Using Agent-based & Complex Network-based Methods*. Springer, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-94-007-3852-2.
- [168] Nicolis J.: *Dynamics of Hierarchical Systems an Evolutionary Approach*. Springer, Berlin 1986. doi:10.1007/978-3-642-69692-3.
- [169] Noë A.: *Action in Perception*. MIT Press, Cambridge, MA, 2004. ISBN: 9780262140881.
- [170] Nolfi S., Mirolli M. (eds.): *Evolution of Communication and Language in Embodied Agents*. Springer, Heidelberg, 2010. doi:10.1007/978-3-642-01250-1.
- [171] Northrop L.: *Does Scale Really Matter?: Ultra-Large-Scale Systems Seven Years after the Study*. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, PA, 2013. URL http://2013.icse-conferences.org/documents/publicity/ICSE_Keynote-Northrop.pdf.
- [172] Northrop L., Feiler P., Gabriel R., Goodenough J., Lingerand R., Longstaff T., Kazman R., Klein M., Schmidt D., Sullivan K., Wallnau K.: *Ultra-Large-Scale Systems The Software Challenge of the Future Software Engineering*. Institute Carnegie Mellon, Pittsburg, PA, 2006. ISBN: 0-9786956-0-7.
- [173] Łoś J., Suszko R.: Remarks on sentential logics. In: Béziau [19], ser. A vol. 61, 1958, pp. 177–186.

- [174] Ore O.: Galois connexions. Transactions of the American Mathematical Society. 1944;55:493–513. URL <https://doi.org/10.1090/S0002-9947-1944-0010555-7>.
- [175] Pahl N., Richter A.: Swot Analysis. Idea, Methodology and a Practical Approach. GRIN Verlag GmbH, München, 2009. ISBN: 3640303032, 9783640303038.
- [176] Park K., Willinger W. (eds.): The Internet as a Large-Scale Complex System. Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005. ISBN: 0195157214.
- [177] Pastor-Satorras R., Rubi M., Diaz-Guilera A. (eds.): Statistical Mechanics of Complex Networks. Springer, Heidelberg, 2003. doi:10.1007/b12331.
- [178] Pawlak Z.: Classification of Objects by Means of Attributes, vol. 429 of Reports, Institute of Computer Science, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland, 1981.
- [179] Pawlak Z.: Information systems - theoretical foundations. Information Systems, 1981;6(3):205–218. URL [https://doi.org/10.1016/0306-4379\(81\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0306-4379(81)90023-5).
- [180] Pawlak Z.: Rough Relations. vol. 435 of Reports. Institute of Computer Science, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland, 1981.
- [181] Pawlak Z.: Rough sets. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982;11(5):341–356. URL <https://doi.org/10.1007/BF01001956>.
- [182] Pawlak Z.: Systemy Informacyjne. Podstawy Teoretyczne (Information Systems. Theoretical Foundations). Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warsaw, Poland, 1983. URL <http://bcpw.bg.pw.edu.pl/dlibra/docmetadata?id=2327>. In Polish
- [183] Pawlak Z.: Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data, vol. 9 of System Theory, Knowledge Engineering and Problem Solving. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1991. doi:10.1007/978-94-011-3534-4.
- [184] Pawlak Z., Skowron A.: Rough sets and boolean reasoning. Information Sciences 2007;177(1):41–73. doi:10.1016/j.ins.2006.06.007.

- [185] Pawlak Z., Skowron A.: Rough sets: Some extensions. *Information Sciences*, 2007;177(1):28–40. URL <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.06.006>.
- [186] Pawlak Z., Skowron A.: Rudiments of rough sets. *Information Sciences*, 2007;177(1):3–27. doi:10.1016/j.ins.2006.06.003.
- [187] Pearl J.: Causal inference in statistics: An overview. *Statistics Surveys* vol. 3. 2009. pp 96–146.
- [188] Pedrycz W.: *Granular Computing Analysis and Design of Intelligent Systems*. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2013. ISBN: 10:1439886814, 13:978-1439886816.
- [189] Pedrycz W., Skowron S., Kreinovich V. (eds.): *Handbook of Granular Computing*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2008. ISBN: 978-0-470-03554-2.
- [190] Pessoa L.: *The Cognitive-Emotional Brain. From Interactions to Integration*. The MIT Press, Cambridge, MA, 2013. ISBN: 10:0262019566, 13:978-0262019569.
- [191] Pietarinen A.V.: *Signs of Logic Peircean Themes on The Philosophy of Language, Games, and Communication*. Springer, Heidelberg, 2006. doi: 10.1007/1-4020-3729-5.
- [192] Poggio T., Smale S.: The mathematics of learning: Dealing with data. *Notices of the AMS*, 2003;50(5):537–544.
- [193] Pollak B. (ed.): *Ultra-Large-Scale Systems. The Software Challenge of the Future*. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2006. ISBN: 10:0978695607, 13:978-0978695606.
- [194] Portugali J.: *Self-Organization and the City*. Springer, Berlin, 2000. ISBN: 978-3-642-08481-2, 978-3-662-04099-7.
- [195] Prokopenko M. (ed.): *Guided Self-Organization: Inception*. vol. 9 of *Emergence, Complexity and Computation*. Springer, Heidelberg, 2014. doi:10.1007/978-3-642-53734-9.
- [196] Pylyshyn Z.W.: *Things and Places: How the Mind Connects with the World*. The MIT Press, Cambridge, MA, 2007. ISBN: 9780262162456.

- [197] Rasiowa H.: An Algebraic Approach to Non-Classical Logics (Studies in logic and the foundations of mathematics vol.78). Elsevier Science, Amsterdam, 1974. ISBN: 10:0720422647, 13:978-0720422641.
- [198] Rasiowa H., Sikorski R.: The Mathematics of Metamathematics. Polish Scientific Publishers, Warsaw, 1963.
- [199] Richter U.M. (ed.): Controlled Self-Organisation. Using Learning Classifier Systems. KIT Scientific Publishing, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2009. ISBN: 10:3866444311, 13:978-3866444317.
- [200] Rozenberg G., Bäck T., Kok J. (eds.): Handbook of Natural Computing. Springer, Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-540-92909-3, 978-3-540-92910-9.
- [201] Russell S.J., Norvig P.: Artificial Intelligence A Modern Approach. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, 2010. ISBN: 0136042597, 9780136042594.
- [202] Russo N., Antonchenko V.Y., Kryachko E. (eds.): Self-Organization of Molecular Systems. From Molecules and Clusters to Nanotubes and Proteins. Springer, Heidelberg, 2009. doi:10.1007/978-90-481-2590-6
- [203] Sage A., Rouse W.: Handbook of Systems Engineering and Management. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J., 2014. ISBN: 978-0-470-08353-6.
- [204] Samsonovich A. V.: Extending Cognitive Architectures. Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012 - Proceedings of the Third Annual Meeting of the BICA Society, Palermo, Sicily, Italy, October 31 - November 3, 2012. URL https://doi.org/10.1007/978-3-642-34274-5_11. doi:10.1007//978-3-642-34274-5-1.
- [205] Scott, D.S.: Completeness and axiomatizability in many-valued logic. In: Béziau [19], pp. 281–299. 1974
- [206] Scott D.S.: Continuous lattices. In: Toposes, Algebraic Geometry and Logic, F.W. Lawvere (ed), Lecture Notes in Mathematics, 1972;274:97–136. URL <https://doi.org/10.1007/BFb0073967>.
- [207] Segel, L.A., Cohen I.R. (eds.): Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems. Oxford

- University Press, New York, NY, 2001. ISBN: 10:0195137000, 13:978-0195137002.
- [208] Seising R., Trillas E., Moraga C., Termini S. (eds.): On Fuzziness. A Homage to Lotfi A. Zadeh – Volume 1& 2, vol. 298-299 of Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-3-642-35641-4, doi:10.1007/978-3-642-35644-5.
- [209] Shen H.W.: Community Structure of Complex Networks. Springer, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-3-642-31821-4.
- [210] Shevchenko P. (ed.): Modelling Operational Risk Using Bayesian Inference. Springer, Heidelberg, 2011. doi:10.1007/978-3-642-15923-7.
- [211] Shoham Y., Brown K.L.: Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. Cambridge University Press, New York, NY, 2009. ISBN: 978-0-521-89943-7.
- [212] Siegelmann H.T.: Computation beyond the Turing limit. *Science*, 1995;268(5210):545–548. doi:10.1126/science.268.5210.545.
- [213] Siegelmann H.T.: Neural Networks and Analog Computation. Beyond the Turing Limit. Springer Science & Business Media, New York, NY, 1999. doi:10.1007/978-1-4612-0707-8.
- [214] Silva T.C., Zhao L.: Machine Learning in Complex Networks. Springer, Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-319-17290-3.
- [215] Skowron A., Nguyen H.S.: Boolean reasoning scheme with some applications in data mining. In: Proceedings of the 3-rd European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases, vol. 1704 of LNCS, Springer Verlag, Berlin, 1999, pp. 107–115. URL https://doi.org/10.1007/978-3-540-48247-5_12.
- [216] Skowron A., Nguyen H.S.: Rough sets: From rudiments to challenges. In: Skowron and Suraj [217], pp. 75–173 URL https://doi.org/10.1007/978-3-642-30344-9_3.
- [217] Skowron A., Suraj Z. (eds.): Rough Sets and Intelligent Systems. Professor Zdzislaw Pawlak in Memoriam, vol. 42-43 of Series Intelligent Systems Reference Library, Springer, Heidelberg, 2013. doi:10.1007/978-3-642-30344-9.
- [218] Sporns O., Chialvo D.R., Kaiser M., Hilgetag C.C.: Organization, development and function of complex brain networks.

- Trends in Cognitive Sciences, 2004:8(9):418–425. doi:10.1016/j.tics.2004.07.008.
- [219] Staddon J.E.R.: Adaptive Dynamics. The Theoretical Analysis of Behavior. Columbia University Press, New York, NY, 2001. ISBN: 9780262194532.
- [220] Steels L.: The Talking Heads Experiment: origins of words and meanings (Computational Models of Language Evolution). Language Science Press, Berlin, 2015. doi: 10.17169/langsci.b49.75.
- [221] Strogatz S.H.: Exploring complex networks. Nature, 2001;410: 268–276. doi:10.1038/35065725.
- [222] Sun R.: Duality of the Mind: A Bottom-up Approach Toward Cognition. Lawrence Erlbaum Associate, Mahwah, NJ, 2001. ISBN: 10:0805838805, 13:9780805838800.
- [223] Sun R. (ed.): Cognition and Multi-Agent Interaction. From Cognitive Modeling to Social Simulation. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006. ISBN: 0521839645, 9780521839648.
- [224] Sutton R.S., Barto A.G.: Reinforcement Learning: An Introduction. The MIT Press, Cambridge, MA, 1998. ISBN: 9780262193986.
- [225] Sycara K.: Multiagent systems. AI Magazine, 1998, pp. 79–92.
- [226] Tamir D.E., Rishe N.D., Kandel A. (eds.): Fifty Years of Fuzzy Logic and its Applications, vol. 326 of Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer, Heidelberg, 2015. doi:10.1007/978-3-319-19683-1.
- [227] Tarski A.: Remarks on Fundamental Concepts of the Methodology of Mathematics. In: Béziau [19], 1928, pp. 67–70.
- [228] Tarski A.: Pojęcie prawdy w językach nauk dedukcyjnych (The concept of truth in deductive science). Prace Towarzystwa Naukowego Warszawskiego, Wydział III Nauk Matematyczno-Fizycznych, 1933;34:1–114. (in Polish); English Transl. in [81].
- [229] Tarski A.: Der Aussagenkalkul und die Topologie. Fundamenta Mathematicae, 1938;31:103–134.
- [230] Terzis G., Arp R. (eds.): Information and Living Systems. Philosophical and Scientific Perspectives. The MIT Press, Cambridge, MA, 2013.

- [231] Thai M.T., Pardalos P.M. (eds.): Handbook of Optimization in Complex Networks. Springer, Heidelberg, 2012. doi:10.1007/978-1-4614-0754-6.
- [232] Ulam S., Bednarek A., Ulam F.: Analogies Between Analogies: The Mathematical Reports of S.M. Ulam and His Los Alamos Collaborators. University of California Press, Oakland, CA, 1990. URL <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/ft9g50091s/>.
- [233] Väänänen J.: Lindström Theorem. In: Béziau [19], 1969, pp. 231–236.
- [234] Valiant L.: Probably Approximately Correct. Nature's Algorithms for Learning and Prospering in a Complex World. Basic Books, A Member of the Perseus Books Group, New York, NY, 2013. ISBN: 10:0465032710, 13:978-0465032716.
- [235] Valiant L.: Research interests (WWW). URL people.seas.harvard.edu/~valiant/researchinterests.htm.
- [236] van Dalen D. (ed.): Brouwer's Cambridge Lectures on Intuitionism, 1951. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1981.
- [237] van der Aalst W.M.P. (ed.): Process Mining Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Springer, Heidelberg, 2011. ISBN: 978-3-642-19344-6.
- [238] Vapnik V.: Statistical Learning Theory. John Wiley & Sons, New York, NY, 1998. ISBN: 978-0-471-03003-4.
- [239] Skowron A., Wasilewski P.: Interactive information systems: Toward perception based computing. Theoretical Computer Science. vol. 454. 2012. pp 240-260.
- [240] Wasson C.: System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2005. ISBN: 10:0471393339, 13:978-0471393337.
- [241] Wasson C.: Software Engineering Best Practices: Lessons from Successful Projects in the Top Companies. McGraw-Hill Osborne Media, New York, NY, 2009. ISBN: 10:007162161X, 13:978-0071621618.
- [242] Weiss G. (ed.): Multiagent Systems. MIT Press, Cambridge, MA, 2013. ISBN: 978-0-262-01889-0.

- [243] Wilson R.A., Keil F. (eds.): The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences. The MIT Press, Cambridge, MA, 1999. ISBN: 9780262731249.
- [244] Wittgenstein L.: Philosophical Investigations. (1953 translated by G.E.M. Anscombe), 3rd Ed. Blackwell, Oxford, UK, 1967.
- [245] Yang A., Shan Y.: Intelligent Complex Adaptive Systems. IGI Global, Herehey, PA, 2008. ISBN-10: 1599047179, 13:978-1599047171.
- [246] Yang X.: Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press, Frome, UK, 2010. ISBN: 1905986289, 9781905986286.
- [247] Yourdon E.: Death March (2nd edition). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003. ISBN:10: 013143635X, 13:978-0131436350.
- [248] Zadeh L.: Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. Fuzzy Sets and Systems, 1997;90(2):111–127. URL [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00077-8).
- [249] Zadeh L.A.: Foreword. In: Rough-Neural Computing: Techniques for Computing with Words, 2004, pp. IX–XI.
- [250] Zadeh, L.A.: Fuzzy sets. Information and Control 1965;8:338–353.
- [251] Zadeh L.A.: Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1973;SMC-3(1):28–44. doi:10.1109/TSMC.1973.5408575.
- [252] Zadeh L.A.: Fuzzy sets and information granularity. In: Advances in Fuzzy Set Theory and Applications. North-Holland, Amsterdam, 1979, pp. 3–18.
- [253] Zadeh L.A.: From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1999;46(1):105–119. doi:10.1109/81.739259.
- [254] Zadeh L.A.: A new direction in AI: Toward a computational theory of perceptions. AI Magazine, 2001;22(1):73–84. URL <https://doi.org/10.1609/aimag.v22i1.1545>.

- [255] Zadeh L.A.: Generalized theory of uncertainty (GTU)-principal concepts and ideas. Computational Statistics and Data Analysis, 2006;51(1):15–46. URL <https://doi.org/10.1016/j.csda.2006.04.029>.
- [256] Zadeh L.A. (ed.): Computing with Words: Principal Concepts and Ideas, vol. 277 of Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer, Heidelberg, 2012. doi:10.1007/978-3-642-27473-2.
- [257] Zhang W. (ed.): Self-Organization. Theories and Methods. Nova Science Publishers, New York, NY, 2008.
- [258] Zhong N., Ma J., Huang R., Liu J., Yao Y., Chen Y.Z.J.: Research challenges and perspectives on Wisdom Web of Things (W2T). Journal of Supercomputing, 2013;64:862–882. URL <https://doi.org/10.1007/s11227-010-0518-8>.
- [259] Zhong N., Ma J., Liu J., Huang R., Tao X. (eds.): Wisdom Web of Things (W2T). Springer, Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-319-44198-6.

Andrzej Janowski