

Andrzej Kisielewicz

sztuczna inteligencja i logika

podsumowanie
przedsięwzięcia naukowego

Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2011

1. Przedmowa
2. Spis treści

Przedmowa

Pół wieku temu logika należała do dziedzin nauki święcących największe sukcesy. Ostateczna formalizacja całej matematyki, twierdzenia Gödla, maszyny Turinga — zaliczone zostały do osiągnięć ludzkiego geniuszu. Jednocześnie rozpoczął się rozwój technologii informatycznej, w dużej mierze opartej właśnie na osiągnięciach logiki, metodę formalną zaczęto stosować w innych naukach, także humanistycznych, postępy logiki zrewolucjonizowały metodologię nauk i filozofię.

W tej atmosferze w roku 1956 narodziła się dziedzina *sztuczna inteligencja*. Uczni podjęli otwarty atak na odwieczne ludzkie marzenie — zbudowanie sztucznego człowieka. Badania objęły wkrótce również konstrukcję sztucznych zmysłów i sztucznego ciała (robotyka), ale główny wysiłek skierowano początkowo na sztuczny umysł — stąd ogólna nazwa dziedziny. Centralne miejsce w tych badaniach zajęła logika formalna; próbowano wprost osiągnięcia logiki zastosować do wyposażenia komputera w zdolność logicznego rozumowania.

Szeroka publiczność informowana była o postępach, a jeszcze bardziej o otwierających się perspektywach. Zaczęto dys-

kutować czekające nas wkrótce problemy etyczne i filozoficzne związane z pojawieniem się sztucznej formy inteligentnego życia; nowego impetu nabrała dyskusja dotycząca fenomenu świadomości. Humanisci w milczeniu przyglądali się tej ofensywie. Z braku matematycznej kompetencji nie byli w stanie podjąć merytorycznej dyskusji, ale — jak wskazują niektóre reakcje — przerażeni byli tym, że oto odwieczne problemy filozofii, zagadki świadomości i umysłu rozwiązują teraz matematycy i inżynierowie.

Niestety (lub na szczęście) mijały kolejne dekady, a zapowiadanych osiągnięć jak nie było, tak nie ma. Pomimo tego, że minęło już pół wieku od czasu, gdy rozpoczęto badania, że parametry techniczne współczesnych komputerów znacznie przewyższają wyobrażenia sprzed lat, a w wielu innych pokrewnych kierunkach postęp jest znacznie większy niż przewidywano, to nie udało się jak dotąd skonstruować niczego, co zasługiwałoby na miano myślącej maszyny. Co do tego wszyscy są już raczej zgodni, bardzo różne jednak wyciągają wnioski z tego faktu.

Sami badacze długo nie chcieli rozpoznać tej sytuacji, nie chcieli przyznać się do tego; i wielu nadal nie chce — trudno im się dziwić. Za projektami sztucznej inteligencji, szczególnie tymi, które obiecywały budowę „już zaraz”, szły wielkie pieniądze. Ostatnio jednak sami założyciele tej dziedziny badań przyznają otwarcie, że (używając słów Marvin'a Minsky'ego) *prawdziwa sztuczna inteligencja czeka dopiero na swojego odkrywcę!*

Brak spektakularnego sukcesu i coraz większy rozdziew pomiędzy rezultatami badań a zbyt lekkomyślnie czynionymi zapowiedziami doczekały się wreszcie krytyki wygłaszanej już nie tylko przez zwykłych niedowiarków, ale przez takie

autorytety dziedzin pokrewnych jak Penrose czy Edelman. To otworzyło wrota krytyce humanistów. Niektórzy z nich z nieukrywanym triumfem obwieścili ostateczną klęskę badań nad sztuczną inteligencją, a znaleźli się i tacy, którzy głoszą klęskę metody formalnej w ogóle i „koniec ery kartezjańskiej”!

Te ostatnie twierdzenia formułowane są jednak z tak oczywistą przesadą, że same przez się lokują się w sferze niepoważnych prowokacji. Nie ma raczej wątpliwości, że technologia informatyczna dopiero zaczęła zmieniać świat, a jest to dziedzina, dla której metoda formalna jest esencją. Jednakże pół wieku bezowocnych prób skonstruowania sztucznej inteligencji stanowi intrygującą zagadkę i jest dobrą okazją do całościowego przyjrzenia się dotychczasowemu podejściu do zagadnienia. Czy dotarliśmy właśnie do granicy stosowności metod formalnych i matematycznych, czy też metody są dobre, a wybraliśmy jedynie niewłaściwe, zbyt bezpośrednie i niecierpliwe podejście?

*

Kryzys w danej dziedzinie badań naukowych może oznaczać upadek, może też jednak oznaczać początek transformacji lub przełom — historia nauki dostarcza wiele przykładów. Ponieważ chodzi tu przede wszystkim o przełom myślowy, o nowe idee, nie widać żadnego powodu, aby ów odkrywca, o którym mówi Minsky — ów „nowy Kopernik” — nie miał pochodzić z Polski. Przeciwnie, dałoby się wymienić kilka powodów, dla których szanse są tu nawet nieco większe niż w wielu innych krajach... Przyznam, że książkę tę postanowiłem napisać przede wszystkim dlatego, żeby młodym polskim adeptom informatyki umożliwić dostrzeżenie tej niezwyklej szansy i żeby zachęcić ich do podjęcia studiów w zakresie

sztucznej inteligencji — mimo kryzysu tej dziedziny na świecie lub właśnie z powodu tego kryzysu.

Dla dokonania przełomu nie wystarczą akademickie podręczniki, które z natury rzeczy raczej dziedzinę gloryfikują i koncentrują się na technicznych szczegółach, ani dzieła krytyków, którzy stwierdziwszy brak spektakularnego sukcesu coraz śmieiej próbują wylać dziecko z kąpielą. Potrzebna jest rzetelna próba zrozumienia istoty dotychczasowego podejścia oraz przyczyn trudności i niepowodzeń. W tym sensie książkę tę można traktować jako wstęp i uzupełnienie do akademickich podręczników, a także jako punkt wyjścia do rzetelnej refleksji nie tylko nad perspektywami sztucznej inteligencji, ale i nad stosowaną do tej pory metodą naukową.

Można się z niej dowiedzieć ogólnie, co to jest sztuczna inteligencja, czym się zajmuje, jaka jest jej historia i jakie są jej aktualne osiągnięcia, jednakże głównym celem jest analiza idei — osiągnięć logiki, matematyki i informatyki, które legły u podstaw badań w dziedzinie sztucznej inteligencji i które sprawiły, że tak wielu mądrych ludzi uwierzyło, że sztuczny umysł jest już w zasięgu naszych możliwości.

Czy idee te są zasadniczo słuszne i jedynie wymagają znacznie więcej szczegółowych pomysłów i pracy niż to sobie wyobrażano, czy potrzebna jest nowa przełomowa myśl, czy też może kompletna zmiana kierunku badań i poszukiwań? Czy sztuczna inteligencja to natrętna mrzonka, kolejna w historii ludzkości próba zbudowania homunkulusa, czy też — tym razem — bliska i nieuchronnie zbliżająca się przyszłość? Mam nadzieję, że książka ta pomoże czytelnikowi wyrobić sobie własny, rzetelnie uzasadniony pogląd w tej sprawie.

*

Popularność tematu, liczne fora dyskusyjne w Internecie,

filozoficzne i pseudofilozoficzne rozważania na temat sztucznej inteligencji, a przede wszystkim mnóstwo nieporozumień i przesądów związanych z tym tematem — wszystko to sprawiło, że postanowiłem udostępnić treść tej książki możliwie szerokiemu gronu czytelników, i starałem się napisać ją tak, aby do jej przeczytania i zrozumienia wystarczyła ciekawość, ogólne wykształcenie i naturalna inteligencja. W szczególności liczę, że zainteresuje ona wszystkich naukowców, którym nieobca jest ogólna refleksja nad nauką i metodą naukową.

Nie zmienia to faktu, że w sposób szczególny książka adresowana jest do studentów, nie tylko informatyki i matematyki, ale również innych kierunków studiów, także humanistycznych, bo kontynuowanie przedsięwzięcia pod nazwą *sztuczna inteligencja* może wymagać większej współpracy naukowców różnych dziedzin niż dotąd praktykowano. Choć książka skonstruowana jest przede wszystkim jako opis pewnego przedsięwzięcia naukowego i towarzysząca opisowi refleksja, to zawiera tyle konkretnych faktów i wiedzy, że może służyć także jako podręcznik uzupełniający do różnych wykładów z zakresu sztucznej inteligencji, inteligencji obliczeniowej, systemów ekspertowych, czy też systemów wspomaganie decyzji (*business intelligence*). Poza wydziałami matematyczno-informatycznymi może służyć jako podręcznik podstawowy w kursie logiki ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w sztucznej inteligencji. Może wreszcie być podstawą do zajęć seminaryjnych dotyczących zastosowania metod matematycznych w nauce, filozofii matematyki i logiki, granic naukowego poznania.

Mam wreszcie nadzieję, że szczególnie zainteresuje ona naukowców pracujących w dziedzinie sztucznej inteligencji, a także w dziedzinach pokrewnych. Spojrzenie kogoś, kto nie

prowadził bezpośrednich badań w tym zakresie, nie jest zainteresowany w wytwarzaniu dobrego lub złego obrazu dziedziny, ale kto pracując dostatecznie blisko w dziedzinach matematyki, logiki i informatyki teoretycznej, przez wiele lat śledził postępy sztucznej inteligencji, prowadził wykłady dla studentów na ten temat — spojrzenie w miarę kompetentnego i starającego się zachować obiektywność recenzenta, może być — mam nadzieję — przydatne w dalszym rozwoju dziedziny.

*

Pierwsza część książki składa się z rozdziałów stanowiących w miarę popularne wprowadzenia do różnych przewijających się w dalszych częściach tematów. Na początek zwracam uwagę na najważniejsze aspekty działania komputera: czytelnika mniej obeznanego z informatyką staram się zapoznać z istotą działania tego, być może największego, wynalazku XX wieku. Dalej wskazuję na nieporozumienia związane z popularnym testem Turinga, opisuję krótką, lecz pełną wzlotów i upadków historię badań nad sztuczną inteligencją, przedstawiam z „lotu ptaka” historię logiki.

Współczesna logika i metoda formalna związane są nierozdzielnie z matematyką. Dlatego za niezbędne uważam zapoznanie czytelnika z obrazem współczesnej matematyki — może okazać się on bardzo różny od tego, który czytelnik pamięta ze szkoły średniej. Autorzy popularnonaukowych książek z zakresu nauk ścisłych często próbują zachęcić czytelników obietnicą, że w książce nie będzie zbyt wiele matematyki. Ja muszę obiecać coś odwrotnego: będzie sporo matematyki, ale mam nadzieję, że nawet czytelnikom bez matematycznego przygotowania zaprezentowane tematy wydadzą się nie

tylko bardzo interesujące, ale przy tym przedstawione jasno i prawdziwie.

W szczególności rozdział ?? stanowi specjalne, bo napisane dla ogólnego audytorium, wprowadzenie do pewnych idei współczesnej matematyki, niezbędne między innymi do prawidłowego zrozumienia rzeczywistych osiągnięć współczesnej logiki. W części pierwszej zdecydowałem się także umieścić rozdziały prezentujące dokładniej najstarszą dziedzinę sztucznej inteligencji: *problem solving* (techniki rozwiązywania problemów). Jest ona stosunkowo łatwa do przedstawienia, stanowi świetną ilustrację nowych metod matematycznych, których czytelnik może nie znać ze szkoły średniej, a wreszcie daje możliwość wyjaśnienia, jakimi metodami osiągnięto jeden z największych sukcesów dziedziny: zbudowanie programu komputerowego, który w grze w szachy pokonał mistrza świata.

Część druga ma formę wykładu prezentującego najważniejsze osiągnięcia logiki współczesnej. Studenci kierunków humanistycznych znajdą w niej, mam nadzieję, zrozumiały dla nich język i sposób wykładu. Studenci kierunków ścisłych znajdą spojrzenie całościowe i refleksję nad sensem prezentowanych osiągnięć. Wybór tematów i prezentacja ma charakter subiektywny o tyle, iż rzeczy, które uważam za istotne z punktu widzenia mechanizmów logicznych rozumowań, prezentuję dość szczegółowo, podczas gdy liczne inne osiągnięcia sygnalizuję tylko, stwierdzając, że mają one dla naszych rozważań — dla sztucznej inteligencji i dla mechanizmów myślenia — znaczenie drugorzędne. W szczególności wykład ten uwzględnia teorię obliczeń, która dziś traktowana jest jako dział informatyki teoretycznej.

Część trzecia zawiera podsumowanie i prezentację osią-

gnięć dziedziny sztucznej inteligencji: przede wszystkim tych, które bazowały właśnie na logice i tworzyły do tej pory główny nurt tej dziedziny, ale także innych, opartych na podejściu przeciwnym, tych, które dziś określane są mianem *inteligencja obliczeniowa*. Jest to opis pewnego trwającego pół wieku przedsięwzięcia naukowego. Ponieważ przedsięwzięcie to w obecnej formie zostało zasadniczo zakończone (a przynajmniej, jak argumentuję, zakończył się jego pierwszy etap), samo w sobie zasługuje na opis i podsumowanie jako rodzaj wyjątkowej wyprawy naukowej w nieznaną, rzekłbym nawet „awanturniczej” — bo jak się okazało, bez odpowiednich narzędzi i odpowiedniego rozeznania — ale przecież tym bardziej ciekawej. Bez względu na to czy w dziedzinie sztucznej inteligencji nastąpi przełom i nowe otwarcie, czy też badania będą kontynuowane pod innymi nazwami, przedsięwzięcie *artificial intelligence* (AI) domaga się opisu i podsumowania właśnie dziś. Jest mało prawdopodobne, żeby taki opis został zdezaktualizowany nowymi zaskakującymi wynikami badań — takie bowiem, jeśli się pojawiają, będą (jestem o tym przekonany) oparte na nowym paradygmacie.

*

Książkę wyposażyłem w dość szczegółową bibliografię i skrowidz kluczowych terminów. W wielu miejscach, po dalsze szczegóły pozwałam sobie odesłać czytelnika do Internetu. W istocie rzeczy mógłbym nawet zarekomendować tę książkę jako uporządkowane wprowadzenie do dziedzin sztucznej inteligencji i logiki pozwalające korzystać z zasobów Internetu *z rozeznaniem*.

W Internecie zawarta jest dziś olbrzymia wiedza, z każdej niemal dziedziny, jednak ze swej natury jest to wiedza nie-

uporządkowana, nie zawsze wiarygodna, i nie zawsze przedstawiona w sposób umożliwiający właściwe z niej korzystanie. W przypadku tematyki tej książki, szczególnie godne polecenia są *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, bardzo rzetelnie prowadzony projekt, z artykułami zredagowanymi przez fachowców, oraz — z pewnym zastrzeżeniem — *Wikipedia*. Ta ostatnia, mimo anonimowości i zespołowego redagowania haseł, i mimo krytyki ze strony różnych ekspertów, jest w miarę wiarygodna w dziedzinach wiedzy szczegółowej. Zawartość haseł w tego typu dziedzinach oparta jest zwykle (mniej lub bardziej literalnie) na bardziej wiarygodnych drukowanych źródłach i pozwala wyrobić sobie ogólne wyobrażenie o opisywanej tematyce w sposób znacznie głębszy niż na podstawie drukowanych encyklopedii i leksykonów. Jako taka *Wikipedia* staje się nieoceniona.

Przy korzystaniu z tego źródła należy jednak zwrócić uwagę na dwa potencjalne problemy. Pierwszy, w przypadku haseł dotyczących nauki, to częsty brak wyjaśnień na bardziej elementarnym poziomie, wchodzenie od razu w specjalistyczną terminologię i wiedzę. Tak zredagowane hasła przydatne są tylko dla tych, którzy posiadają już odpowiednią wiedzę i rozeznanie w danej dziedzinie, a poszukują dalszych szczegółów. Dla laików, dla mniej zorientowanych, takie hasła są mało użyteczne. Drugi problem to tendencyjność informacji. Wiele haseł tworzonych jest przez bezpośrednio zainteresowanych odpowiednią wymową hasła lub też na podstawie tendencyjnych źródeł (czego redagujący nie umie rozpoznać). W rezultacie, całości projektu brak jest odpowiedniej równowagi, fachowego spojrzenia z dystansu, i często się zdarza, że znaczenie jakichś współczesnych osiągnięć — ograniczam się tylko do nauki — jest przecenione lub nieodpowiadające

stanowi faktycznemu. (Zdarzają się też niestety przypadki błędnego zreferowania tematu wynikające z niezrozumienia istoty zagadnienia przez autorów hasła, ale te są stosunkowo rzadkie).

Nie można polecić więc Wikipedii, czy w ogóle Internetu, jako podstawowego źródła wiedzy (tak jak nie można polecić przeczytania encyklopedii z danej dziedziny jako sposobu na poznanie tej dziedziny). Wikipedię można natomiast śmiało polecić jako źródło uzyskania dalszych szczegółów dla osób zorientowanych w danej dziedzinie (zdolnych do ocenienia wiarygodności artykułów na dany temat), a także jako dodatek do ogólnych opracowań, w których rozległość tematyki zmusza do pominięcia wielu bardziej szczegółowych tematów i zagadnień. Celem mojej książki jest w szczególności danie czytelnikowi odpowiedniego rozeznania, pozwalającego korzystać swobodnie z bardziej specjalistycznej wiedzy zawartej w *Stanford Encyclopedia of Philosophy* i *Wikipedii*. Hasła w skorowidzu umieszczonym na końcu książki są na ogół podkreślone w tekście i mogą służyć doskonale jako słowa kluczowe wyszukiwań w wymienionych źródłach. Błyskawiczny dostęp do tych haseł czyni Internet bardziej efektywnym źródłem wiedzy uzupełniającej niż spis literatury.

*

W tym miejscu chciałbym podziękować profesorom George'owi Grätzerowi z University of Manitoba w Winnipeg, Rudolfowi Willemu z Technische Hochschule Darmstadt, Ralphowi McKenziemu z Vanderbilt University w Nashville i Marinowi Gutanowi z Université Blaise Pascal w Clermont--Ferrand, dzięki którym ponad cztery lata mojego życia mogłem spędzić na zagranicznych uniwersytetach i — między

innymi — studiować na bieżąco osiągnięcia w dziedzinie sztucznej inteligencji. Dziękuję Wiesławowi Dziobiakowi z University of Puerto Rico za podarowanie mi swojego osobistego egzemplarza *Artificial Intelligence. A Modern Approach* Russella i Norviga. Szczególne podziękowania składam Jerzemu Surmie z SGH w Warszawie. Jego entuzjazm i przyjacielskie wsparcie znacznie przyspieszyły ukończenie i wydanie tej książki. Chciałbym wreszcie wspomnieć tu Stanisława Lema i podziękować mu za komentarze do moich wczesnych tekstów na temat logiki oraz sprowokowanie mnie do głębszych studiów nad sztuczną inteligencją.

Część ilustracji inspirowana jest podobnymi ilustracjami w (Russell, Norvig 2009), a dwie są wprost skopiowane za zezwoleniem Stuarta Russella, za co mu niniejszym dziękuję. Dziękuję również redakcji Wydawnictw Naukowo-Technicznych, a w szczególności redaktorowi Krzysztofowi Kossobudzkiemu, za bardzo życzliwe przyjęcie mojej książki i znakomitą współpracę.

Wrocław, grudzień 2010 r.

Andrzej Kisielewicz

Spis treści

Przedmowa

CZĘŚĆ I: WPROWADZENIE

1. Komputer	
1.1. Kółko i krzyżyk	
1.2. Kodowanie	
1.3. Odrobina fantazji	
1.4. Komputer z pudełek	
1.5. Programowanie w języku maszynowym	
1.6. Architektura von Neumanna	
1.7. System binarny	
1.8. Programowanie w języku wyższego rzędu	
1.9. Praktyczne możliwości komputera	
2. Wizja Turinga	
2.1. Przedmiot badań	
2.2. Test Turinga	
2.3. Czy komputer może myśleć?	
2.4. Sukces czy porażka?	
2.5. Silna AI i słaba AI	

3. Pół wieku sztucznej inteligencji	.....
3.1. Entuzjastyczne początki	.....
3.2. Doza realizmu	.....
3.3. Inżynieria wiedzy	.....
3.4. Piąta Generacja	.....
3.5. Rok 2001	.....
3.6. Kierunki badań	.....
3.7. Stan badań w roku 2010	.....
3.8. Inteligencja obliczeniowa	.....
3.9. HLAI i GAI — sztuczna inteligencja na ludzkim poziomie	.....
4. Techniki rozwiązywania problemów	.....
4.1. Kombinatoryczna eksplozja	.....
4.2. Problemy logiczne	.....
4.3. Ogólne metody rozwiązywania problemów	.....
4.4. Algorytm	.....
4.5. Problemy przeszukiwania	.....
4.6. Reprezentacje graficzne problemów	.....
4.7. Przeszukiwanie grafu	.....
4.8. Przeszukiwanie kierowane informacją	.....
4.9. Heurystyki	.....
4.10. Naśladowanie natury	.....
5. Mechaniczny szachista	.....
5.1. Szachy	.....
5.2. Minimax i strategie gry	.....
5.3. Funkcja ewaluacyjna	.....
5.4. Algorytm alfa-beta	.....
5.5. Sukces	.....
5.6. Warcaby	.....
5.7. Go	.....

5.8.	Dalsze perspektywy	
6.	Dwa tysiące lat logiki	
6.1.	Arystoteles	
6.2.	Piąty postulat	
6.3.	Wizje Leibniza	
6.4.	Obalenie Euklidesa	
6.5.	Matematyzacja logiki	
6.6.	Światowy kongres matematyczny	
6.7.	Antynomie	
6.8.	Program Hilberta	
6.9.	Nierozstrzygalność	
6.10.	Istota obliczania	
7.	Idee współczesnej matematyki	
7.1.	Odkrycie liczby niewymiernej	
7.2.	Rachunek prawdopodobieństwa	
7.3.	Wzór Bayesa	
7.4.	Wielkie twierdzenie Fermata	
7.5.	Problem czterech barw	
7.6.	Matematyka dyskretna	
7.7.	Zawodna intuicja	
7.8.	Ciała i grupy	
7.9.	Teoria zbiorów	
7.10.	Co to jest liczba?	
7.11.	Paradoksy nieskończoności	
7.12.	Argument przekątniowy	
7.13.	Twierdzenie Cantora	
7.14.	Zbiór wszystkich słów	

CZEŚĆ II: LOGIKA

8.	Klasyczny rachunek zdań	
8.1.	Sylogistyka	

8.2.	Rachunek zdań	
8.3.	Koniunkcja i alternatywa	
8.4.	Implikacja	
8.5.	Negacja	
8.6.	Inne spójniki	
8.7.	Metoda zero-jedynkowa	
8.8.	Schematy wnioskowań	
8.9.	Inne ujęcia	
9.	Pełna formalizacja	
9.1.	Kwantyfikatory	
9.2.	Relacje	
9.3.	Aksjomatyzacja	
9.4.	Teorie	
9.5.	Formalizacja języka matematyki	
9.6.	Hipoteza Goldbacha	
9.7.	Język formalny	
9.8.	Termy	
9.9.	Formuły	
9.10.	Zmienne	
9.11.	Aksjomaty logiczne	
9.12.	Reguły wnioskowania	
9.13.	Arytmetyka elementarna	
9.14.	Twierdzenia i dowody	
10.	Metamatematyka	
10.1.	Semantyka	
10.2.	Definicja prawdy	
10.3.	Twierdzenie Gödla o pełności	
10.4.	Twierdzenie o niesprzeczności	
10.5.	Redukcja pojęć	
10.6.	Redukcja matematyki do logiki	

10.7.	Antynomie	
10.8.	Aksjomatyzacja teorii zbiorów	
10.9.	System ZF	
10.10.	Aksjomatyzacja matematyki	
10.11.	Aksjomat wyboru	
10.12.	Program Hilberta	
10.13.	Półrozstrzygalność	
11.	Twierdzenie Gödla	
11.1.	Formalizacja metamatematyki	
11.2.	Dowód	
11.3.	Immanentna niezupełność	
11.4.	Nieudowodnialność niesprzeczności	
11.5.	Nierozstrzygalność logiki	
11.6.	Metateoria	
12.	Teoria obliczeń	
12.1.	Wyrażenia i terminy	
12.2.	Algorytm	
12.3.	Efektywne rozstrzyganie	
12.4.	Kodowanie	
12.5.	Kodowanie binarne	
12.6.	Funkcje rekurencyjne	
13.	Maszyny Turinga	
13.1.	Definicja maszyny Turinga	
13.2.	Przykład I.....	
13.3.	Obliczanie funkcji	
13.4.	Przykład II	
13.5.	Równoważność definicji	
13.6.	Maszyna RAM	
13.7.	Teza Churcha	
13.8.	Rozstrzygalność	

13.9.	Języki formalne	
13.10.	Rozumowanie	
13.11.	Klasy rekurencyjności	
13.12.	Argument z teorii mnogości	
13.13.	Problem stopu	
13.14.	Inne problemy nierozstrzygalne	
14.	Praktyka obliczeń	
14.1.	Teoria i praktyka	
14.2.	Algorytmy praktyczne	
14.3.	Czas wielomianowy	
14.4.	Złożoność obliczeniowa	
14.5.	Klasa NP	
14.6.	$P \neq NP$	
14.7.	Szyfrowanie	
15.	Logiki nieklasyczne i metodologia nauk	
15.1.	Logiki wielowartościowe	
15.2.	Logiki modalne	
15.3.	Logika intuicjonistyczna	
15.4.	Logiki dopuszczające sprzeczność	
15.5.	Logika rozmyta	
15.6.	Logika indukcji	
15.7.	Wiedza analityczna i syntetyczna	
15.8.	Bayesianizm	
15.9.	Zakład holenderski	
15.10.	Logika prawdopodobieństwa	
15.11.	Logika nieformalna	
15.12.	Dedukcjonizm	
15.13.	Metodologia nauk	
15.14.	Definicje	
15.15.	Braki logiki formalnej	

CZEŚĆ III: SZTUCZNA INTELIGENCJA

16. Inżynieria wiedzy	
16.1. Bazy wiedzy	
16.2. Mechanizm wnioskowania	
16.3. Rezolucja	
16.4. Koniunkcyjna postać normalna	
16.5. Eliminacja kwantyfikatorów	
16.6. Unifikacja	
16.7. W kierunku praktyki	
16.8. Walka z kombinatoryczną eksplozją	
16.9. Automatyczne dowodzenie twierdzeń	
16.10. Hipoteza Robbinsa	
16.11. Programowanie logiczne	
16.12. Systemy ekspertowe	
17. Rozumowania zdroworozsądkowe	
17.1. Formalizacja wiedzy zdroworozsądkowej	
17.2. Ontologia	
17.3. CYC	
17.4. Ramy i sieci semantyczne	
17.5. Logiki deskrypcji	
17.6. Kłopoty z logiką pierwszego rzędu	
17.7. Niepewność wiedzy	
17.8. Sieci bayesowskie	
17.9. Logiki niemonotoniczne	
17.10. Logika domniemań	
17.11. Perspektywy	
18. Inteligencja obliczeniowa	
18.1. Obliczeniowy model mózgu	
18.2. Perceptron	
18.3. Uczenie neuronu	

18.4.	Sztuczne sieci neuronowe
18.5.	Perspektywy sieci neuronowych
18.6.	Mózg i komputer
18.7.	Algorytmy genetyczne
18.8.	Obliczenia ewolucyjne
18.9.	Inteligencja rojowiska
18.10.	Inteligencja obliczeniowa
18.11.	Perspektywy inteligencji obliczeniowej
19.	Maszyny uczące się
19.1.	Drzewa decyzyjne
19.2.	Funkcje boolowskie i hipotezy
19.3.	Uczące się programy
19.4.	Uczenie gier logicznych
19.5.	Teoria uczenia się
19.6.	Uczenie obliczeniowe
19.7.	Ogólna teoria wnioskowania indukcyjnego
19.8.	Prawdopodobieństwo algorytmiczne
19.9.	Maszyna Gödla
20.	Przetwarzanie języka naturalnego
20.1.	Trzy problemy
20.2.	Rozpoznawanie mowy
20.3.	Struktura gramatyczna
20.4.	Analiza znaczenia
20.5.	Znaczenie zdania
20.6.	NLP
20.7.	Tłumaczenie maszynowe
20.8.	Mówiące bazy danych
20.9.	Komputer rozumny
20.10.	Wyszukiwanie informacji
20.11.	Chatboty i inne

21. Sztuczna inteligencja i otoczenie	
21.1. Automatyczne planowanie	
21.2. Robotyka	
21.3. Komputerowe widzenie	
21.4. Kognitywistyka	
21.5. Prawo Moore'a	
21.6. Futurologia	
22. Perspektywy	
22.1. Problem badań interdyscyplinarnych	
22.2. Problemy z logiką	
22.3. Rozpoznanie klęski poznawczej	
22.4. Logika formalna i sztuczna inteligencja	
22.5. Metoda naukowa	
22.6. Podejście inżynierskie	
22.7. Sceptycyzm i optymizm	
22.8. Sztuczna inteligencja w matematyce	
22.9. Wiedza nieformalna	
22.10. Realne perspektywy	
22.11. Ograniczone dziedziny	
22.12. W kierunku rozumienia języka naturalnego	
Bibliografia	
Skorowidz	