doc.dr inż.ANDRZEJ KACZMARCZYK

Przemysłowy Instytut
Automatyki i Pomiarów MERA–PIAP

Warszawa

GŁÓWNE KONCEPCJE I REZULTATY BADAŃ NAD SZTUCZNĄ INTELIGENCJĄ W ZASTOSOWANIU DO STEROWANIA ROBOTÓW

W artykule przedstawiono główne metodologie i techniki sztucznej inteligencji tj. rozumowanie według zasad zdrowego rozsądku, dedukcję i rozwiązywanie problemów, modelowanie i reprezentację wiedzy, poszukiwanie heurystyczne, systemy oprogramowania i języki sztucznej inteligencji, programowanie ewolucyjne, wielkości i procedury rozmyte. Podano informacje o zastosowaniu metod i rozwiązań sztucznej inteligencji w robotyce, w przedsięwzięciach badawczych i w aplikacjach przemysłowych.

1. Wstęp

Hasło sztuczna inteligencja jest jednym z bardziej kontrowersyjnych we współczesnej nauce. Na temat sztucznej inteligencji toczy się wiele zaciętych sporów, w których przedstawione są przeciwstawne poglądy odnoszące się do różnych stron zagadnienia. Na przykład:

- szarlataneria czy droga ku nowym rubieżom cywilizacji?
- czy realizacja jest w ogóle możliwa?
- dobrodziejstwo czy zagrożenie dla ludzkości?
- czy hasło ma w ogóle rację bytu bo jego istotna treść znajduje się już w innych hasłach?
- czy, z punktu widzenia filozofii, dostarczy dowodu na monistyczną materialność świata?

Dzisiejszy stan badań i osiągnięte dotychczas rezultaty uzasadniają istnienie kontrowersji i nie pozwalają na jednoznaczną, nie pozostawiającą wątpliwości odpowiedź na takie i inne pytania. Jak to wyraził obrazowo jeden z badaczy tej dziedziny, nauka o sztucznej inteligencji obecnie dopiero odkaszlnęła przed wypowiedzeniem właściwej kwestii.

Tym niemniej hasło sztuczna inteligencja istnieje i pracując nad tym hasłem liczna grupa badaczy w wielu krajach świata osiągnęła istotne rezultaty teoretyczne i praktyczne, zawarte między innymi w publikacjach liczących już tysiące tytułów. W dalszym ciągu artykułu przedstawiono informacje i poglądy wywodzące się z tego kręgu działalności.

Termin sztuczna inteligencja (SzI) ma dwojakie znaczenie, określa: dziedzinę badań oraz wytwór tych badań (i opartych na nich działań inżynierskich). Sytuacja jest więc analogiczna, jak w przypadku innych tego typu terminów — termin automatyka oznacza zarówno dziedzinę badań, jak i wytwór (np. automatyka statku)

Przedmiotem badań SzI jako dyscypliny naukowej są procesy informacyjne percepcji i myślenia występujące na różnych polach i poziomach złożoności i w różnych obiektach — zarówno u ludzi, zwierząt jak i w maszynach. SzI poszukuje wspólnych mechanizmów tych procesów dla rozmaitych przypadków działalności intelektualnej, takich jak np.rozgrywanie gier, dowodzenie twierdzeń matematycznych, a także kierowanie samochodem. czy powrót dziecka ze szkoły do domu. Relacja odkrywanych praw

do maszyn i organizmów żywych jest podobna jak np.w przypadku aerodynamiki — prawa aerodynamiki pozwalają zrozumieć i wyjaśnić lot ptaków a zarazem umożliwiają budowę maszyn latających. Maszyny myślące, wyposażone w sztuczną inteligencję (w drugim znaczeniu tego terminu) stanowią cel pragmatyczny, który winien być osiągnięty w rezultacie rozwoju SzI jako dziedziny badań. Węższym, utylitarnym celem jest stworzenie maszyn wykonujących takie działania, do których obecnie jest potrzebny intelekt człowieka, w celu automatyzacji różnorodnych obszarów ludzkiej działalności. Dalsza część artykułu będzie dotyczyła SzI jako dziedziny badań, głównych ich kierunków i osiągniętych rezultatów, przede wszystkim z punktu widzenia możliwości ich wykorzystania do sterowania robotów przemysłowych.

2. SzI jako dziedzina badań

Na rysunku 1 przedstawiono mapę SzI jako dziedziny badań, opublikowaną przez N.J.Nilsona [15]. Schemat uwidacznia podstawowe metodologie i techniki SzI oraz ich główne zastosowania; za pomocą strzałek zaznaczono powiązania z zewnętrznymi, w stosunku do SzI, dziedzinami badań.
Podstawowe metodologie i techniki SzI są to według Nilsona główne (a właściwie będące przedmiotem badań jako główne) mechanizmy inteligencji i techniki implementacyjne, znajdujące zastosowanie na różnych polach aplikacji. Mechanizmy te i techniki są ze sobą nawzajem silnie powiązane, a ich wyodrębnienie na schemacie jest w znacznej mierze arbitralne.

2.1. Metodologie i techniki SzI

Rozumowanie według zasad zdrowego rozsądku, dedukcja i rozwiązywanie problemów.

Są to procesy związane z użytkowaniem wiedzy, przede wszystkim do przeprowadzania wnioskowań, przewidywań, odpowiadania na pytania, sporządzania planów działania. Wyróżnić tu można trzy główne tematy badań:

Rozwiązywanie łamigłówek

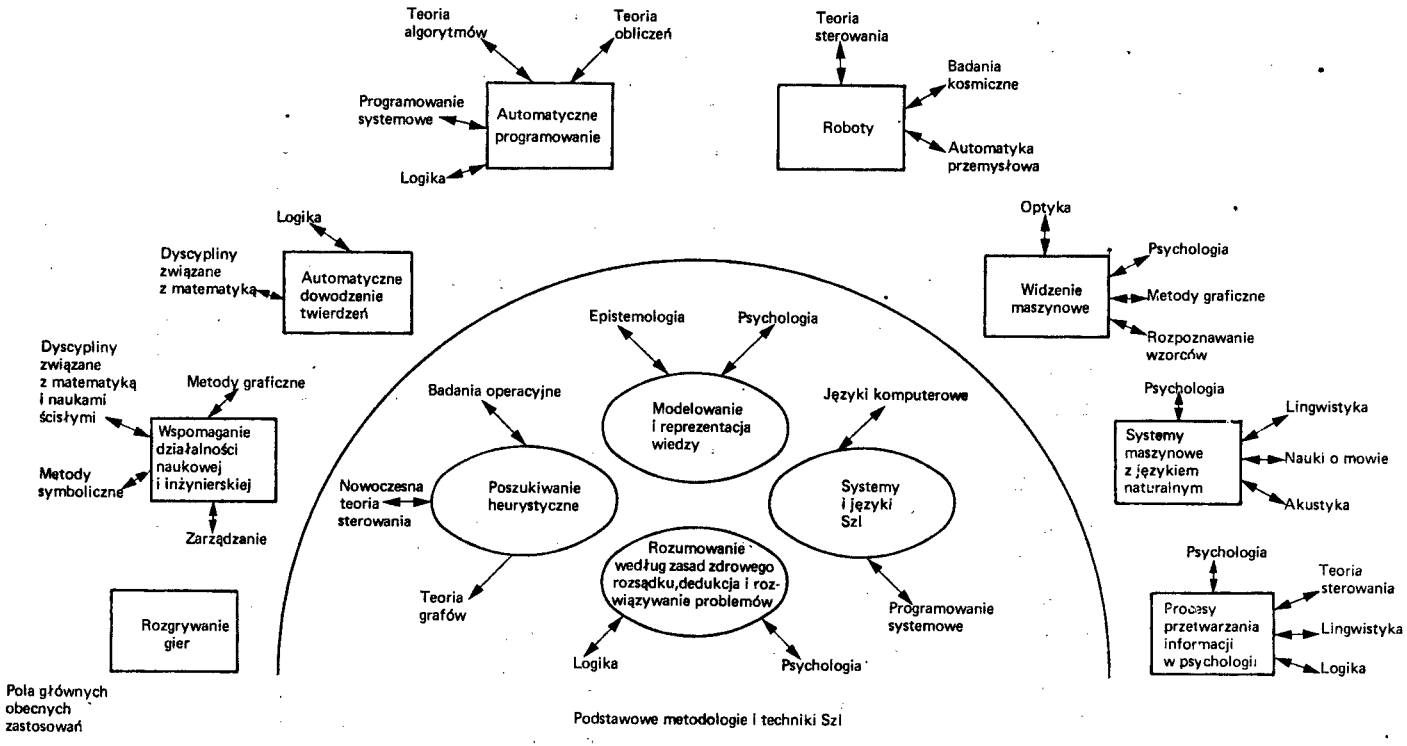
Wczesne prace dotyczące rozumowania i rozwiązywania problemów (a zarazem i wczesne prace nad SzI, lata 50-te) polegały na opracowywaniu programów komputerowych służących do rozwiązywania łamigłówek i prostych zadań logicznych. Pojawiły się również programy o pewnej uniwersalności jak LT (Logic Theorist — Logik—teoretyk) i GSP (General Problem Solver — Generalny rozwiązywacz problemów). Powstały i rozwinęły się również koncepcje ogólniejsze związane z rozwiązywaniem problemów, które znalazły szersze rozpowszechnienie i zastosowanie, np.koncepcja poszukiwania heurystycznego, rozumowania wstecznego (od wniosku do przesłanek), przestrzeni i stanu problemu oraz operatora dokonującego transformacji jednego stanu problemu w inny.

Odpowiadanie na pytania

Systemy odpowiadające na pytania, zrealizowane środkami komputerowymi, gromadzą w pamięci znaczną liczbę faktów i są w stanie udzielać odpowiedzi na takie pytania, na które odpowiedź może być wydedukowana z tych faktów. Działanie systemów opiera się na mechaniźmie sformalizowanego wnioskowania logicznego. Powstały np.systemy QA2 oraz QA3 (Question—Answering = Odpowiadanie na pytania), SIR (Semantic Information Retrieval = Wyszukiwanie informacji semantycznej).

Rozumowanie według zasad zdrowego rozsądku

Następny krok stanowią systemy, które oprócz odpowiadania na pytania, potrafią budować proste plany działania, w oparciu o posiadaną wiedzę i zasady wnioskowania logicznego. Istotne jest to, że przedmiotem rozumowań realizowanych przez takie systemy są już nie tylko określone, za pomocą niewielu jednoznacznych reguł problemy łamigłówkowe czy teoretyczno—logiczne, ale problemy zbliżone do rzeczywistych, występujących w codziennej praktyce życiowej. Jeśli tego rodzaju system



Rys. 1. Mapa Sztucznej Inteligencji

posiada na przykład niezbędną wiedzę o rozkładach lotów, portach lotniczych, możliwościach dojazdu do tych portów i inne, praktyczne ale dostatecznie różnorodne informacje, to potrafi udzielić odpowiedzi na pytanie „jak dostać się do Timbuktu", przy czym odpowiedź będzie propozycją planu działania: (1) idź do biura linii lotniczych i dowiedź się o loty do Timbuktu (2) używając tej informacji wybierz lot i dokonaj rezerwacji (3) jedź do portu lotniczego o odpowiedniej porze (4) zaparkuj samochód (5) wsiądź do odpowiedniego samolotu. Pierwszym tego rodzaju systemem był Advice Taker (Radobiorca). Tworzenie planów działania ma bardzo duże znaczenie w sterowaniu robotami wyższych generacji. Dlatego w tym nurcie prac powstało i powstaje wiele systemów zorientowanych na roboty, opartych na koncepcji uproszczenia do maksymalnych możliwych granic modelu świata, w którym działa robot. Koncepcja ta bywa określana jako świat robota, świat klockowy czy środowisko proste.

Modelowanie i reprezentacja wiedzy

Koncepcje, jak reprezentować wiedzę w systemach SzI, wyniknęły z zastosowań, głównie z widzenia maszynowego oraz systemów maszynowych z językiem naturalnym, gdyż te zastosowania wymagają wprowadzenia do systemu bardzo dużej wiedzy bazowej. Reprezentacja wiedzy może być asertoryczna (stwierdzająca) lub proceduralna. Na przykład reprezentacja asertoryczna spirali polega na podaniu listy punktów (współrzędnych punktów) krzywej, a jej reprezentacja proceduralna — na podanie programu rysującego spiralę. W SzI stosuje się kombinowanie metody reprezentacji, wykorzystujące oba podejścia. Dąży się do stworzenia pewnego modelu wiedzy, a więc o ustosunkowanie się do problemu jaki ma być zasięg wiedzy, w jaki sposób i w jakim zakresie wiedza ta ma podlegać zmianom. Do modelowania wiedzy stosuje się różne środki, np.rachunek predykatów, grafy, struktury listowe i inne.

Poszukiwanie heurystyczne

Termin heurystyka oznacza naukę o twórczym działaniu (teorię twórczości) lub przepis na działanie w celu znalezienia rozwiązania zawierającego elementy twórcze. W tym drugim znaczeniu heurystyka jest przepisem innym niż algorytm, gdyż nie gwarantuje uzyskania rozwiązania i dopuszcza znajdowanie rozwiązań niepełnowartościowych (przybliżonych). Warto przy tym zaznaczyć, że procedura heurystyczna wykorzystuje algorytmy, są to jednak algorytmy określające sposób poszukiwania, a nie sposób znalezienia rozwiązania. Istota metody heurystycznej polega na redukcji liczby poszukiwań (prób) przez zastosowanie na każdym etapie poszukiwania pewnych reguł ograniczających,najczęściej określeniu dla danego kierunku poszukiwań wartości tak zwanej funkcji oceniającej i przyjęciu lub odrzuceniu danego kierunku w zależności od spełnienia przez tę wartość określonego kryterium. Oprócz poszukiwania heurystycznego można mówić także o programowaniu heurystycznym (program poszukiwania heurystycznego) czy modelowaniu heurystycznym (model poszukiwania heurystycznego). Procedury heurystyczne stosowane w SzI są takie same, jak znajdujące zastosowanie w badaniach operacyjnych czy teorii sterowania (optymalizacja).

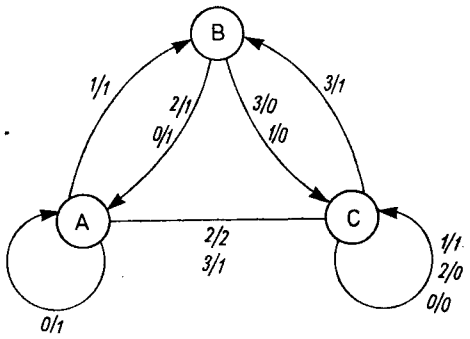
Systemy oprogramowania i języki SzI

Języki programowania rozwijane i używane w SzI wykorzystują większość spośród przedstawionych dotychczas idei, a zarazem stanowią podstawowe narzędzie realizacyjne. Z punktu widzenia informatyki problemy rozpatrywane w SzI są problemami nienumerycznymi, czyli przy rozwiązywaniu ich za pomocą komputera, słowa zawarte w pamięci są traktowane nie jako liczby (choć faktycznie są liczbami),lecz jako ciągi symboli. Symbole te są poddawane manipulacji, procedurze innej niż operacje arytmetyczne właściwe dla problemów numerycznych, na przykład operacjom logicznym lub analizie wyrażeń symbolicznych. Dla tego rodzaju operacji stosuje się specyficzną organizację pamięci komputera, w postaci list (struktur listowych). Uporządkowanie uzyskuje się nie przez kolejne ustawianie słów w poszczególnych miejscach pamięci, ale przez zastosowanie wskaźników, adres danego słowa jest podany w słowie poprzedzającym. Tworzenie różnych list, zestawień słów, nie wymaga przemiesz-

czania słów do innych komórek pamięci, a tylko wykonywania operacji na adresach. Języki Szl są językami programowania umożliwiającymi przetwarzanie list. Pierwszymi językami Szl były: IPL (Information Processing Language — Język przetwarzania informacji) oraz LISP (List Processing Language — Język przetwarzania list), stworzone pod koniec lat 50-tych. Obecnie pojawiła się następna generacja języków Szl (QA4, PLANNER, POP–2, INTERLISP, QLISP, POPLER, CONNIVER i inne), polegających przede wszystkim na przetwarzaniu list, umożliwiających jednak stosunkowo łatwe programowanie bardziej złożonych procedur, takich jak poszukiwanie, wyszukiwanie wyrażeń czy wykrywanie wzorców. Jak stwierdza Nilson: bardzo znaczna część badań w dziedzinie Szl polega obecnie na eksperymentowaniu z systemami oprogramowania napisanymi w nowych językach.
Oprócz czterech metodologii pokazanych przez Nilsona na jego mapie Szl i omówionych dotychczas, trzeba przedstawić jeszcze dwie ważne metodologie: programowanie ewolucyjne oraz wielkości i procedury rozmyte.

Programowanie ewolucyjne

Najogólniej biorąc, programowanie ewolucyjne polega na tym, że obiekt realizujący pewną procedurę w celu wykonania określonego zadania-rozwiązujący problem-ulega przekształceniom przypadkowym, a są utrwalane tylko te przekształcenia, które polepszają wyniki czyli przystosowują obiekt do coraz lepszego wykonywania zadania. Jest to ta sama zasada, która rządzi ewolucją biologiczną, stąd nazwa metody.
Jako obiekt rozwiązujący problem rozpatrzmy abstrakcyjny automat skończony, zwany także maszyną cybernetyczną. Jak wiadomo, automat taki służy do wyrażenia przebiegu procesów dyskretnych, w których wyróżnić można: wejścia, wyjścia i stany wewnętrzne (w postaci zbiorów skończonych). Problemem, który ma rozwiązać nasz automat, niech będzie predykcja sygnału wejściowego, którym jest pewna powtarzająca się cyklicznie sekwencja wartości dyskretnych (słów), na przykład pewien ciąg liczb. Na wyjściu automatu, zmieniającym się pod wpływem każdej zmiany wejścia, muszą pojawić się wartości, możliwie najdokładniej takie same, jak słowa, które w następnym kroku pojawią się na wejściu. Zauważmy, że konkretną treścią tak sformułowanego problemu ogólnego mogą być różnorodne zadania z zakresu diagnostyki, identyfikacji czy sterowania.



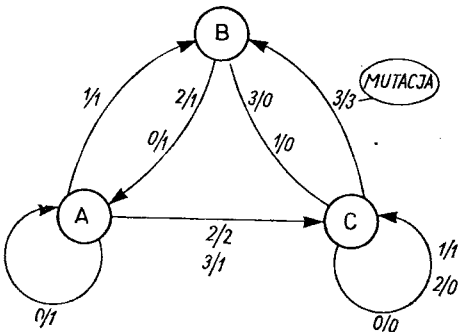
Rys.2. Automat M

Załóżmy przyjmijmy automat M przedstawiony za pomocą grafu na rys.2. Automat ma trzy stany A, B i C. Alfabet wejściowy składa się ze słów 0, 1, 2, 3,a alfabet wyjściowy ze słów 0, 1, 2. Graf pokazuje, że jeśli np.na automat w stanie A podziała sygnał 1, to automat osiągnie stan B i na wyjściu pojawi się również sygnał 1. Jeżeli do automatu znajdującego się w stanie początkowym B podamy sekwencję

np. 11-tu słów 2,2,1,0,1,3,3,0,3,0,1, tą będzie on zmieniał stany i sygnały wyjściowe zgodnie z poniższą tabelą:

Stan	B	A	C	C	C	C	B	C	C	B	A	
Wejście	2	2	1	0	1	3	3	0	3	0	1	
Wyjście		1	2	1	0	1	1	0	0	1	1	Wskaźnik błędu
Błąd predykcji		1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	$\frac{8}{10} = 0,8$

W tabeli zaznaczono istnienie błędu predykcji (niezgodności wyjścia z wejściem w kroku następnym) jako 1, a brak błędu jako 0. Wskaźnik błędu dla całej sekwencji jest ilorazem błędnych predykcji i wszystkich przeprowadzonych predykcji.
Automat M ulega teraz mutacji, czyli przypadkowej zmianie (używa się liczb losowych) jednej z cech, np.zmianie sygnału wyjściowego przy przejściu ze stanu C do B (i odpowiednio alfabetu wyjściowego). Na rysunku 3 przedstawiono automat M_1 powstały w drodze takiej mutacji.



Rys.3. Automat M1

Przejścia automatu M_1 pod wpływem tej samej co poprzednio sekwencji słów na wejściu przedstawia poniższa tabela:

Stan	B	A	C	C	C	C	B	C	C	B	A	
Wejście	2	2	1	0	1	3	3	0	3	0	1	
Wyjście		1	2	1	0	1	3	0	0	3	1	Wskaźnik błędu
Błąd predykcji		1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	$\frac{7}{10} = 0,7$

Widać więc, że w automacie „potomku" zmniejszył się wskaźnik błędu predykcji. Dalszym mutacjom podlega więc automat M_1, przy czym gdyby wskaźnik błędu automatu M_1 był gorszy niż automatu M, to automat M_1 zostałby odrzucony, a dalszej mutacji podlegałby w dalszym ciągu automat „rodzicielski"M. Zarówno ocena błędu jak i mechanizm mutacji mogą być bardziej skomplikowane niż w naszym przykładzie. Wskaźnik błędu może uwzględniać na przykład zróżnicowaną ważność słów alfabetu wejściowego. Mutacje mogą obejmować także zmianę liczby stanów, a ocena zdatności nowego automatu może uwzględniać również np.karę za złożoność. Można również rozpatrywać wejścia niecykliczne, w postaci nieskończonego ciągu sygnałów. W przeprowadzonych dotychczas eksperymentach realizowano automat i jego ewolucję w postaci programu komputerowego. W eksperymentach tych automaty miały do 10 stanów, a ewolucja rozciągała się na kilka tysięcy automatów potomnych, przy czym, w przypadku powtarzalnych sekwencji wejściowych złożonych z kilkunastu słów uzyskano idealną(pełną) predykcję.

Wielkości i procedury rozmyte

Istnieje pogląd, że istotną cechą ludzkiego sposobu rozumowania, cechą związaną ze zdolnością do twórczego myślenia, jest posługiwanie się przez człowieka pojęciami niejednoznacznymi i stosowanie nieprecezyjnych procedur w operowaniu tymi pojęciami. L.A.Zadeh, twórca tego kierunku w SzI sformułował zasadę niezgodności, stwierdzającą, że wysoka precyzja jest niezgodna z wysoką kompleksowością.

Wśród pojęć związanych z rozmytością znaczenie fundamentalne ma sformułowane przez Zadeha, na gruncie matematyki, pojęcie zbioru rozmytego.

$$S = \{(x, \mu_s(x))\}; \quad \mu_s : X \rightarrow [0,1]; \quad x \in X$$

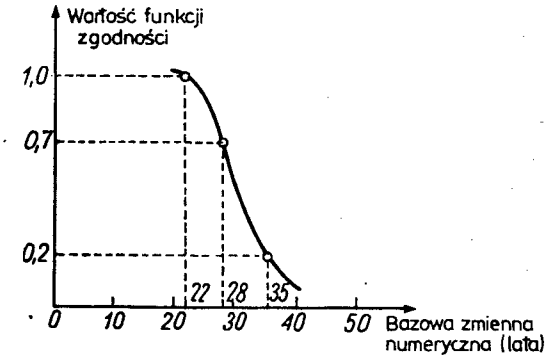
Każdemu elementowi x zbioru rozmytego S jest przyporządkowana funkcja przynależności $\mu_s(x)$, wartość tej funkcji zawarta w granicach 0...1 określa w jakim stopniu dany element należy do danego zbioru.

Zbiór konwencjonalny (nierozmyty) można rozpatrywać jako szczególny przypadek zbioru rozmytego, w którym wartość funkcji przynależności wszystkich elementów wynosi 1. W pewnych przypadkach funkcję przynależności można interpretować jako prawdopodobieństwo, że dany element należy do danego zbioru.

Drugim pojęciem, należącym już wyraźnie do dziedziny SzI, jest pojęcie zmiennej lingwistycznej. Przy klasycznym podejściu do zagadnienia. mamy do czynienia ze zmienną numeryczną (por.problemy numeryczne w omówieniu języków SzI) przebiegającą zbiór wartości liczbowych. Wartości zmiennej lingwistycznej, to słowa lub zdania języka sztucznego lub naturalnego. Rozpatrzmy na przykład za [26] zmienną lingwistyczną „wiek" i zbiór jej wartości (znak „+" oddziela elementy zbioru):

wiek = młody + niemłody + bardzo młody + niebardzo młody + bardzo młody +...+ stary + niestary + bardzo stary + niebardzo stary +...+ w średnim wieku + nie w średnim wieku +...+ niestary i nie w średnim wieku +...+ skrajnie stary +...

Istnieje pewna odpowiedniość między zmienną lingwistyczną tego typu, a odpowiadającą jej zmienną numeryczną, wiek można przedstawić jako zbiór wartości liczbowych, dla człowieka np.0...100. Odpowiedniość ta nosi nazwę funkcji zgodności. Ma ona oczywiście charakter subiektywny. Przykładowo wartości tej funkcji dla wartości numerycznych 22, 28 i 35 w stosunku do wartości lingwistycznej „młody" mogą wynosić odpowiednio 1, 0,7 i 0,2 (przebieg funkcji zgodności dla tego przypadku przedstawiono na rysunku 4).



Rys.4. Przebieg funkcji zgodności dla wartości „młody" zmiennej lingwistycznej „wiek".

Są zmienne lingwistyczne innego typu, nie mające odpowiednika w postaci zmiennej numerycznej. Przykładem może być zmienna „wygląd" o wartościach (w odniesieniu do człowieka): ładny + piękny +...+ atrakcyjny +...,. Tutaj funkcja zgodności ma inny charakter, na przykład dla wartości „piękny" wyraża stopień przynależności konkretnych obiektów np.do klasy „piękna kobieta" (subiektywnie przyporządkowujemy Marioli 0,9, Izydorze 0,7, a Praksedzie 0,8).
Istnieje pewna zmienna lingwistyczna, pierwszego typu, czyli mająca bazową zmienną numeryczną, o szczególnym znaczeniu dla procedur rozmytych. Jest to zmienna:
prawdziwość = prawdziwy + nieprawdziwy + bardzo prawdziwy + mniej lub więcej prawdziwy +...+ fałszywy +...
Logika oparta na tej zmiennej nosi nazwę logiki rozmytej*)
Rozumowania przeprowadzane przy użyciu zmiennych lingwistycznych noszą nazwę rozumowań przybliżonych. L.A.Zadeh opracował reguły takich rozumowań, w których wykorzystuje się funkcje zgodności do przejścia z wartości lingwistycznych na bazowe wartości numeryczne, przeprowadza się operacje nad wartościami numerycznymi i z uzyskanego wyniku numerycznego można na końcu przejść ponownie na wartość lingwistyczną.
Przykładowo jeśli u i v mogą przybierać wartości 1, 2, 3, 4 i wiadomo, że „u jest małe" oraz że „u i v są w przybliżeniu równe", to w wyniku rozumowania przybliżonego, mającego na celu stwierdzenie jakie jest y, (wymagającego wprowadzenie pewnych subiektywnych ustaleń, np.że: mały = 1/1 + 0,6/2 +0,2/3/) otrzymujemy wynik określający v jako:

1/1 + 0,6/2 + 0,5/3 + 0,2/4 = mniej lub bardziej mały [27]

W przyjętym tu zapisie część numeryczna jest przedstawiona jako zbiór rozmyty, przy czym elementy zbioru (przed którymi oddzielone ukośną kreską są podane liczby określające ich stopień przynależności czyli wartości funkcji przynależności) są oddzielone od siebie znakiem „+".

2.2. Główne zastosowania metodologii i technik SzI

Zastosowania pokazane na mapie Nilsona, które omówiono poniżej,dotyczą przede wszystkim projektów realizowanych dla celów eksperymentalnych, w laboratoriach SzI. Zastosowania użytkowe, przynoszące efekty ekonomiczne, są jeszcze mało zaawansowane.

*) *koncepcja logiki rozmytej jest zbliżona do logiki wielowartościowej stworzonej w 1922 roku przez polskiego logika Jana Łukasiewicza.*

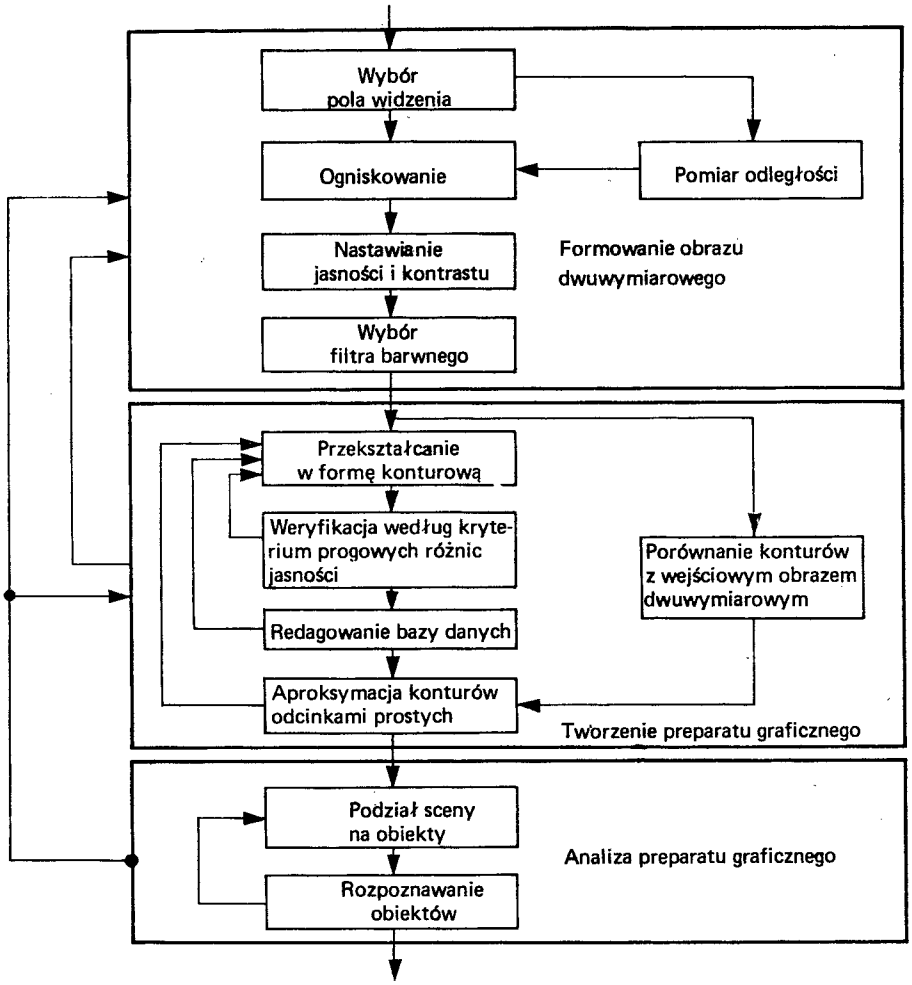
Rozgrywanie gier. Opracowuje się głównie programy komputerowe do gry w szachy, wykorzystując metody poszukiwania heurystycznego. Zgodnie z systemem ocen Federacji Szachowej Stanów Zjednoczonych uzyskano dotychczas programy na poziomie około 1750, jest to poziom pięćsetnego wśród najlepszych graczy Wielkiej Brytanii, mistrz świata Bobby Fischer jest oceniany na 2810. Słabością programów jest brak w nich koncepcji strategicznych wyższego poziomu.

Wspomaganie działalności naukowej i inżynierskiej. Przedmiotem wczesnych prac z zakresu SzI były między innymi programy komputerowe umożliwiające symboliczne (nie numeryczne) rozwiązywanie pewnych prostych równań algebraicznych i całek. Bardziej zaawansowanym użytkowo przedsięwzięciem jest system DENDRAL, formułujący hipotezy co do struktury chemicznej substancji na podstawie spektogramu masowego i danych o magnetycznym rezonansie jądrowym. System ten został zbudowany przy wykorzystaniu wielu reguł praktycznych i miniteorii mających zastosowanie tylko w danej aplikacji.

Automatyczne dowodzenie twierdzeń. O pierwszych programach zbudowanych w celu dowodzenia twierdzeń wspomniano już przy omawianiu rozwiązywania łamigłówek. Były to programy służące do dowodzenia twierdzeń logiki formalnej (LT), a także twierdzeń geometrii płaskiej. Programy były zbudowane w oparciu o reguły wnioskowania dedukcyjnego. Późniejsze prace oparły się na rachunku predykatów z widoczną tendencją do wykorzystywania w coraz szerszym zakresie metod lingwistycznych.

Automatyczne programowanie. Istnieją dwa zadania automatycznego programowania komputerów: weryfikacja programów (stwierdzenie czy dany program działa w założony sposób) oraz generacja (syntetyzowanie) programów. Pierwsze zadanie wypełnia się przez włączanie do właściwego programu pewnych dodatkowych stwierdzeń testowych i sprawdzaniu podczas weryfikacji czy są one spełnione. Są to procedury zbieżne z dowodzeniem twierdzeń. W drugim zadaniu wykorzystuje się metody SzI określone poprzednio jako rozumowanie zgodne z zasadami zdrowego rozsądku. Automatyczna generacja programów wymaga konstruowania planów, w czym istnieje zbieżność z zastosowaniami SzI do sterowania robotów, spora liczba prac z zakresu generacji programów odnosi się wprost do programowania robotów i wykorzystuje koncepcje uproszczonego modelu świata. Systemem automatycznego programowania w świecie klockowym jest HACKER, umożliwiający generację prostych programów na poziomie „wierzmy, że to będzie działało", a następnie usuwanie z nich błędów.

Widzenie maszynowe. Wczesne prace (z lat 50-tych) dotyczyły klasyfikacji obrazów dwuwymiarowych przy niewielkiej liczbie klas, np. rozpoznawania znaków alfanumerycznych. Dzięki tym pracom ukształtował się osobny kierunek badawczy – rozpoznawanie wzorców – mający istotne osiągnięcia i zastosowanie praktyczne. W połowie lat 60-tych zainteresowania badaczy SzI zwróciły się ku analizie sceny trójwymiarowej. Przedmiotem analizy była scena zawierająca obiekty w postaci prostych brył geometrycznych i kompozycji z takich brył (wymieniony już poprzednio świat klockowy).
Na rysunku 5 przedstawiono schemat funkcjonalny analizy sceny trójwymiarowej według [22]. Pierwszy etap, formowanie obrazu dwuwymiarowego, jest dokonywany w organie wizyjnym, na przykład w automatycznie sterowanej kamerze telewizyjnej (schemat odnosi się do układu z dalmierzem). Stosowane są również układy o widzeniu stereoskopowym, z dwoma obrazami dwuwymiarowymi. Pozostałe dwa etapy, mające za przedmiot tak zwany preparat graficzny utworzony na podstawie obrazu pierwotnego, są realizowane w części komputerowej układu analizującego.
W ostatnich latach można obserwować próby wyjścia poza świat klockowy. Opracowano między innymi programy dla tworzenia preparatów graficznych twarzy ludzkich na podstawie zdjęć, jak również programy analizujące sceny złożone z obiektów naturalnych takich jak narzędzia i zabawki (w tym zabawki o miękkiej strukturze — lalki, zwierzęta).



Rys.5. Widzenie maszynowe — analiza sceny trójwymiarowej

Systemy maszynowe z językiem naturalnym. Ten kierunek badawczy ma bardzo duże znaczenie dla SzI zarówno bezpośrednie ze względu na możliwość efektywnych zastosowań, jak i pośrednie dla ogólnego rozwoju badań i postępu w kierunku wytworzenia sztucznej inteligencji. Działanie systemów mających rozumieć język naturalny bazuje na tym, że wyrażenie wejściowe jest porównywane z pewnymi strukturami prawdopodobnymi semantycznie, przechowywanymi w pamięci komputera. Struktury te, stanowią schematy lub scenariusze, wypełniane konkretnymi danymi (zmiennymi) podczas porównywania. Zrealizowano systemy odnoszące się do świata klockowego, gdzie język jest bardzo zbliżony do naturalnego, ale opisywany obiekt jest ograniczony do klocków i manipulacji nimi. W Stanach Zjednoczonych obecnie jest realizowany (lub już został zrealizowany) system rozumiejący nieco uproszczony,mówiony język amerykański o zasobie około 1000 słów.

Procesy przetwarzania informacji w psychologii. Pewna liczba prac jest poświęcona zastosowaniu metodologii powstałych na gruncie SzI do badania i wyjaśniania procesów przetwarzania informacji u ludzi i zwierząt. W psychologii człowieka przede wszystkim badano w ten sposób zjawiska pamięci, percepcji i rozwiązywania problemów.

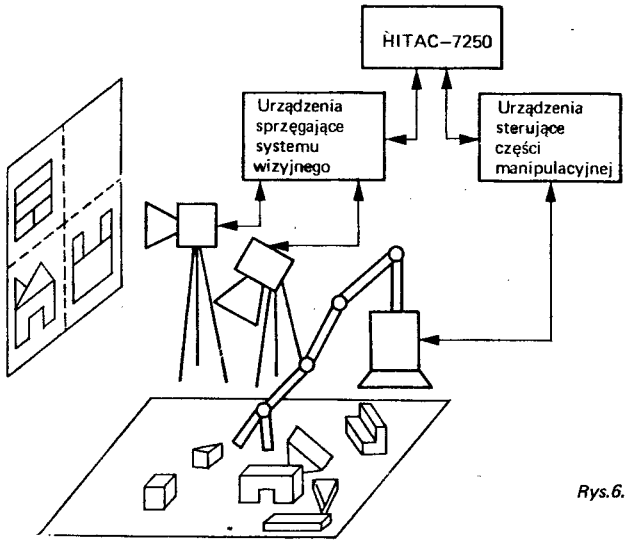
3. Metody i rozwiązania SzI w zastosowaniu do sterowania robotów

W robotyce głównymi i najbardziej zaawansowanymi zastosowaniami metodologii i technik SzI były przedsięwzięcia eksperymentalne zrealizowane w kilku laboratoriach badawczych, w różnych krajach świata. Badania te przeprowadzono w drugiej połowie lat sześćdziesiątych (był to okres szczególnego ożywienia w pracach na temat inteligentnych robotów). Ich wspólną cechą było zaopatrzenie robota sterowanego komputerowo w sensoryczny układ widzenia, najczęściej oparty na kamerze telewizyjnej, umożliwiający analizę sceny trójwymiarowej, a ponadto w oprogramowanie służące do formowania i wykonywania prostych planów działania, w oparciu o model uproszczonego świata robota.

Robot Stanford Research Institute (SRI) został zbudowany w kształcie trójkołowego wózka z napędem elektrycznym, z zainstalowaną na nim zdalnie sterowaną kamerą telewizyjną oraz czujnikami dotyku (w postaci metalowych wąsów). Część manipulacyjna robota komunikowała się za pośrednictwem łącza radiowego z komputerem. Robot dokonywał analizy sceny trójwymiarowej w uproszczonym świecie klockowym i był w stanie formować oraz realizować proste plany działania – nawigacyjne.

Na Uniwersytecie Stanford zrealizowano system oko–ręka, złożony z kamery telewizyjnej, manipulatora i komputera sterującego. Robot rozwiązywał problemy w świecie klockowym wznosząc konstrukcje z klocków, z uwzględnieniem zróżnicowanych kolorów ich ścian. Przewidywano, że system będzie trójczłonowy: oko–ucho–ręka mianowicie, że zadania będą stawiane w postaci dyspozycji podawanych głosem do mikrofonu. Nie udało się jednak znaleźć doniesień o zrealizowaniu tej części planu.

Podobne systemy oko–ręka zrealizowano w MIT, na Uniwersytecie Edynburskim, a także opracowano (lub opracowuje się) na Uniwersytecie Londyńskim i w Instytucie Cybernetyki AN Ukraińskiej SRR w Kijowie.



Rys.6. Robot HIVIP firmy Hitachi (Japonia)

W laboratoriach japońskich powstały systemy robotowe oko—ręka wznoszące budowlę z klocków na podstawie rysunku rzutów budowli. W laboratorium firmy Hitachi opracowano robota pn.HIVIP (Hitachi Visual Image Processing—Robot). Robot składa się z manipulatora, dwóch kamer telewizyjnych (jedna do czytania rysunku, druga do obserwacji pola działania) oraz komputera z urządzeniami peryferyjnymi (rys.6). Zastosowano komputer HITAC—7250, z pamięcią operacyjną 32 k 16—bitowych, dwoma pamięciami taśmowymi i trzema bębnowymi. Obraz pola widzenia składa się z 76800 punktów (240 rzędów pionowych i 320 poziomów, które analizowane są kolejno. Oprogramowanie użytkowe robota (wraz z obszarem pamięci zarezerwowanym do analizy obrazu) zajmuje 400 k na bębnie o pojemności 512 k. Czasy wykonania procedur wynoszą: 240 s-na obróbkę informacji wizualnej z kamery obserwującej pole działania, 20 s-na rozpoznanie rysunku, 50 s-na rozpoznanie każdego obiektu, 10 s na przyjęcie rozwiązania oraz średnio około 180 s-na wykonanie działań.
Podobny system zbudowano w japońskim Laboratorium Elektrotechnicznym (E T L). W robocie ETL zastosowano nie kamerę telewizyjną, lecz urządzenie specjalne, które zostało nazwane okiem przemysłowym (industrial eye), w publikacjach bliżej nie opisane, a także czujniki dotykowe w chwytaku manipulatora. Robot może — w pewnym zakresie — rozpoznawać kształt klocków również dotykiem. Podczas wykonywania zadań rozpoznawczych i klasyfikacyjnych, jest możliwa konwersacja z robotem za pomocą dalekopisu, w języku zbliżonym do naturalnego.
Układy sensoryczne widzenia i obróbkę informacji wizualnej, zbliżoną do analizy sceny trójwymiarowej, zastosowano również w urządzeniach przeznaczonych do badań kosmicznych. Nie są to właściwie w pełni autonomiczne roboty lecz urządzenia zdalnie sterowane lub nadzorowane przez operatora — półroboty. Przedsięwzięcia badawcze tego rodzaju prowadzono w Jet Propulsion Laboratory, ale podobną genezę ma również wiele omówionych poprzednio projektów amerykańskich.
Jedno z najbardziej zaawansowanych na świecie przedsięwzięć podjęto na Tokijskim Uniwersytecie Waseda, gdzie założono zbudowanie robota o następujących właściwościach:

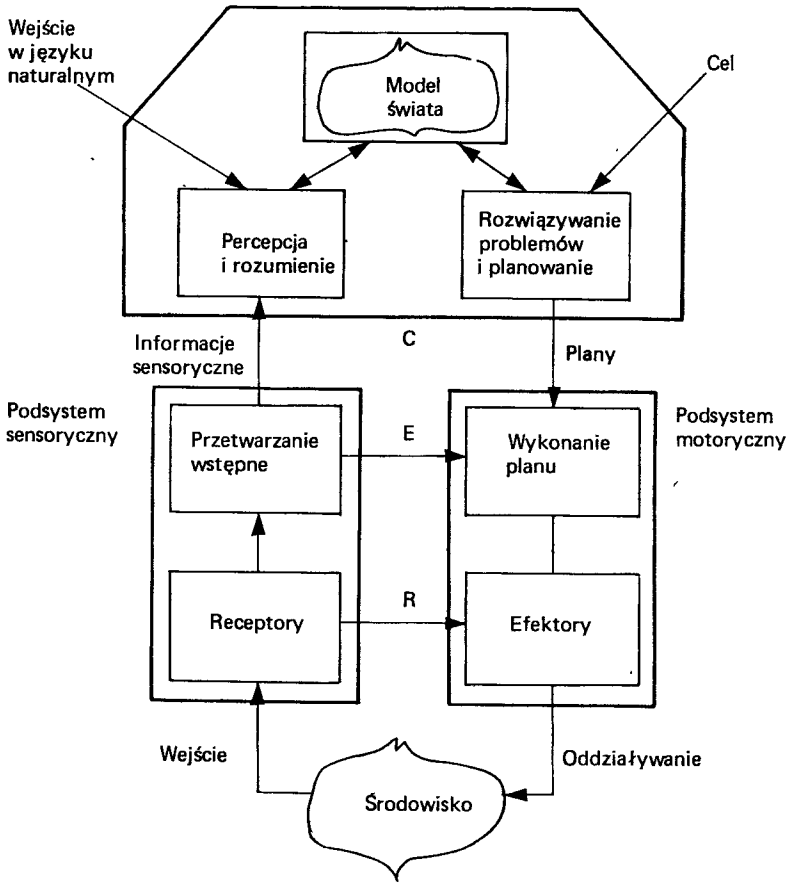
- poruszającego się na sposób ludzki, jako dwunożną maszyną kroczącą,
- wykonującego pracę za pomocą dwóch rąk ludzkiego typu,
- wyposażonego w proprioceptywne*) czujniki położenia kątowego umieszczone we wszystkich stawach rąk i nóg,
- wyposażonego w zmysł równowagi dla ruchu dwunożnego,
- wyposażonego w zmysł dotyku do pracy za pomocą rąk,
- wyposażonego w sztuczne oczy jako zdalne receptory,
- używającego minikomputera jako mózgu,
- wymawiającego i słyszącego zdania japońskie.

Zastosowania przemysłowe metodologii i technik SzI są w robotyce mniej zaawansowane niż zastosowania w przedsięwzięciach badawczych. Również nie zawsze mają tę formę, którą można uznać za charakterystyczną dla przedsięwzięć badawczych, to znaczy dosyć uniwersalnego robota stanowiącego system oko—ręka, są to jednak urządzenia wyposażone w układy wizyjne.
Firma Hitachi zastosowała układ wizyjny w postaci kamery telewizyjnej oraz pomocnicze czujniki dotykowe w automatycznym urządzeniu służącym do wkręcania śrub mocujących połówki metalowej formy do produkcji betonowych słupów. Forma, silnie wydłużoma, ma różne elementy wystające: kołnierze, żebra, a także dziesiątki śrub, które trzeba wkręcić. Układ wizyjny służy do rozpoznania śruby wśród innych elementów wystających oraz określenia jej położenia. Następnie manipulator hydrauliczny wkręca śrubę. Czujniki dotykowe spełniają funkcje pomocnicze, ustalają średnicę formy i położenie kołnierzy. Oczywiście urządzenie może być zastosowane do montażu form o różnych wymiarach. Sterowanie odbywa się nie za pomocą komputera, lecz specjalizowanych układów elektro-

*) *służące do obserwacji wewnętrznego stanu organizmu*

nicznych. Firma Hitachi zastosowała również układ wizyjny zawierający kamerę telewizyjną z optyką mikroskopową do montażu tranzystorów. W układy takie są wyposażone zgrzewarki, na których są wykonywane miniaturowe połączenia drutowe, układ służy do określenia wzajemnego położenia elementów, które trzeba połączyć. Sterowanie jest komputerowe, przy czym minikomputer HIDIC–150 steruje pięćdziesięcioma zgrzewarkami. Informacje z kamer telewizyjnych są dostarczane do komputera za pośrednictwem specjalnych urządzeń sprzęgających (image processor), a sterowanie zgrzewarkami odbywa się za pośrednictwem sterowników grupowych.
Amerykańska firma GTE zastosowała czujniki optyczne w robocie służącym do przenoszenia kineskopów z jednego transportera na drugi, podczas ciągłego, niezsynchronizowanego ruchu obu transporterów.
Firma Unimation we współpracy z Uniwersytetem Stanford oraz firmami General Motors i Ford (jako użytkownikami) przygotowuje znajdujące się obecnie w różnych fazach zaawansowania aplikacje swoich robotów, wyposażonych w układy wizyjne, do prac montażowych w przemyśle samochodowym. Najbliższe urzeczywistnienia jest zastosowanie do wkręcania śrub mocujących elementy podwozia do pudła karoserii samochodu (śruby są wkręcane od spodu), praca ta jest dla człowieka uciążliwa.
Na ramieniu robota Unimate, uzbrojonym w odpowiednie narzędzia, jest umieszczana kamera typu vidicon. Naprowadzanie narzędzia, najważniejsza i najtrudniejsza ze względu na dość szerokie tolerancje rozmieszczenia otworów część operacji, jest przeprowadzane w trzech etapach.
Etap pierwszy (naprowadzanie zgrubne) jest zaprogramowany konwencjonalnie w układzie otwartym. Etap drugi (naprowadzanie dokładne) jest realizowany przy wykorzystaniu kamery, w układzie zamkniętym z wizyjnym sprzężeniem zwrotnym. Wreszcie etapem trzecim jest komputerowa korekcja uwzględniająca cechy i położenie narzędzia.
W fazie mniejszego zaawansowania (laboratoryjnej) jest budowa linii montażowej wyposażonej w trzy manipulatory (o pięciu i sześciu stopniach swobody, dwa z napędem hydraulicznym, jeden z elektrycznym) oraz układ wizyjny zawierający trzy kamery typu vidicon. Manipulatory są wyposażone w tensometryczne czujniki sześciu składowych obciążenia w przegubie (kiści). Sterowanie linią odbywa się w układzie hierarchicznym, za pomocą sterowników mikroprocesorowych poszczególnych manipulatorów oraz komputera nadrzędnego (PDP–10). Programowanie ma się odbywać nie przy użyciu pulpitu z przyciskami ręcznymi, ale za pomocą dźwigni typu drążka sterowego samolotu. Przewidziana jest komunikacja głosem z systemem robotowym, przy czym w pierwszym etapie system ma odpowiadać tekstem na wyświetlaczu, a w drugim etapie również głosem z syntetyzatora dźwięków. Ruch linii montażowej ma być przerywany, – 15 s przesunięcie transportowe i 8 s praca robotów. Przewiduje się bezpośrednią współpracę manipulatorów z ludźmi, w tej samej linii montażowej.
Również w innych laboratoriach badawczych trwa nadal doskonalenie badawczych systemów oko–ręka przede wszystkim przez dostosowywanie ich do prac nie przy użyciu klocków, ale rzeczywistych, choć prostych, przedmiotów. Realizuje się w laboratoriach eksperymentalne montaże prostych pomp (pompa wodna samochodu), silników czy zawiasów drzwiowych. Ważne udoskonalenia są związane z wprowadzaniem mikroprocesorów i półprzewodnikowych czujników wizyjnych (typu sztuczna siatkówka).
Globalną trudnością na jaką natrafiono w badawczych pracach aplikacyjnych była ogromna kompleksowość zagadnienia: w układzie sterowania inteligentnego robota wszystko jest ze sobą powiązane. Jest to trudność zarówno koncepcyjna jak i realizacyjna. Gdy chodzi o ten drugi aspekt, to przy obecnym stanie techniki, przetwarzanie informacji w ilości i z szybkością jakiej wymaga efektywne stosowanie technik i metodologii SzI w pojedynczym robocie może być zrealizowane dopiero za pomocą układu hierarchicznego, obejmującego lokalne układy mikroprocesowe, minikomputer i nadrzędny duży komputer. Jest to rozwiązanie zbyt kosztowne i należy się spodziewać, że pojawią się specjalizowane rozwiązania sprzętowe, o wielkiej skali integracji, nie tylko cyfrowe lecz także analogowe lub hybrydowe. W aspekcie koncepcyjnym odczuwa się potrzebę (zaspokojeniu tej potrzeby poświęca się wiele opracowań) stworzenia ogólnego schematu problemu. Przez to określenie rozumie się pewną niezmienną,

dosyć uniwersalną strukturę układów sterowania inteligentnego robota, izolowaną od zmian, którym podlegają poszczególne podsystemy i techniki realizacji.
Przykładem pracy w tym kierunku jest [9], której niektóre ważniejsze idee, nawiązujące do przedstawionych wcześniej pojęć SzI, zostaną pokrótce omówione.
Autorzy rozpatrują robota jako system cybernetyczny i określają go (ściślej robota poznawczego) jako integralny system sterowany komputerowo, zdolny do samodzielnego wzajemnego oddziaływania z środowiskiem rzeczywistym, zgodnie z generalnymi celami podanymi przez człowieka. Odpowiednio do tego, robot taki posiada zdolność percepcji i rozumienia środowiska, tworzenia i aktualizacji wewnętrznego modelu środowiska oraz używa tego modelu jako podstawy do planowania swego zachowania. Schemat funkcjonalny robota przedstawiono na rys.7. Centralny system scalający odpowiada centralnemu systemowi nerwowemu w żywych organizmach, podobna odpowiedniość istnieje także co do podsystemu sensorycznego



Rys.7. Schemat funkcjonalny robota poznawczego

i motorycznego. Zachowanie się robota jest rezultatem dwustopniowej działalności zorientowanej wyjściowo:

- etap planowania, realizowany w centralnym systemie scalającym, plan jest czymś podobnym do programu komputerowego, zawiera rozkazy oraz odgałęzienia warunkowe;
- etap wykonania, realizowany w podsystemie motorycznym. W etapie tym blok wykonania planu rozpatruje plan i przekazuje polecenia do odpowiednich efektorów. Potrzebne jest przy tym uzyskiwanie informacji z podsystemu sensorycznego (przy odgałęzieniach warunkowych), za pośrednictwem sprzężenia wykonawczego (E).

Oprócz sprzężenia (E), średniego poziomu, istnieją w robocie jeszcze dwa inne sprzężenia. Najniższy poziom bezpośrednio między receptorami i efektorami zajmuje sprzężenie odruchowe (R). Najwyższe pod względem poziomu i najbardziej złożone jest sprzężenie poznawcze (C), umożliwiające budowę, uaktualnianie i użytkowanie modelu świata.

Rozpatrzono uproszczone środowisko robota, złożone jedynie z trzech klocków A, B i C, które mogą leżeć obok siebie lub na sobie w różnych konfiguracjach, tworząc różne stany środowiska np.:

			A
	B		B
ABC,	AC,	AB (C)	C

gdzie nawias oznacza, że robot trzyma dany klocek w uchwycie. Działanie robota w tym środowisku, mające na celu przekształcenie jednego stanu w inny opisują dwa operatory:

chwyć (X) — chwyć klocek X

połóż (X, Y) — położ klocek X na klocku Y

Funkcjonowanie operatorów jest następujące:

$$ABC \xrightarrow{\text{chwyć } C} AB\ (C)$$

$$ABC \xrightarrow{\text{połóż } C, A} \begin{matrix} C \\ AB \end{matrix}$$

Reprezentacją tego uproszczonego środowiska w rozpatrywanym robocie jest przestrzeń stanu środowiska (problemu):

$$\psi = \langle S, \emptyset \rangle$$

gdzie

$S = \{s_i\}$ — zbiór stanów środowiska

$\emptyset = \{\varphi_i\}$ — zbiór operatorów

Problemem, który robot ma rozwiązać jest.

$$\langle s_o, G \rangle$$

gdzie:

$s_o \in S$ — stan początkowy

$G \subset S$ — zbiór stanów odpowiadających warunkom rozwiązania (każdy ze stanów tego zbioru stanowi rozwiązanie problemu).

Planem rozwiązania problemu jest sekwencja operatorów.

$$(\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_n)$$

dająca sekwencję zmian stanu:

$$s_o \xrightarrow{\varphi_1} s_1 \xrightarrow{\varphi_2} \cdots \xrightarrow{\varphi_n} s_n$$

w której $s_n \in G$, czyli s_n jest rozwiązaniem problemu.

W przypadku świata trzech klocków A, B, C planem rozwiązania jakiegoś problemu może być sekwencja:

[(chwyć (B), połóż (B, C), chwyć (A), połóż (A, B)]

W problemach użytkowych uproszczone środowisko ma tysiące stanów i do znalezienia planu rozwiązania problemu trzeba użyć metod heurystycznych.

4. Podsumowanie

Prace nad zastosowaniem metod i rozwiązań SzI w robotyce straciły obecnie nieco na rozmachu w porównaniu do końca lat sześćdziesiątych. Jak to zazwyczaj bywa, trudności okazały się większe niż sądzono początkowo. Nie można spodziewać się gwałtownego skoku, szybkiego wprowadzenia do praktyki przemysłowej robotów uniwersalnych drugiej i trzeciej generacji. Należy oczekiwać rozwoju powolniejszego, którego kolejnymi stadiami będą realizacje generacji ułamkowych, połówkowych, a może nawet ćwiartkowych. Można przypuszczać, że metodologie i techniki SzI będą wprowadzane przede wszystkim w postaci rozwiązań specyficznych dla określonych zadań wypełnianych przez robota określonego typu. Jest przy tym rzeczą oczywistą, że w rozwiązaniach przemysłowych będą wykorzystywane rezultaty osiągnięte dotychczas w laboratoriach, w pierwszej kolejności dotyczące widzenia (percepcji obrazu) oraz rozumowania i planowania w uproszczonym świecie robota.
Można sądzić, że metodologie i techniki SzI w pierwszych etapach ich stosowania w robotyce będą użyte w następujących celach:

- rozpoznawanie wzrokowe (widzenię maszynowe) znanych przedmiotów – rozpoznawanie niewielu klas przedmiotów i określanie ich położenia przy użyciu technik wspomagających takich jak specjalne oświetlenie (w tym również sondowanie światłem laserowym), specjalne oznaczanie przedmiotów, a także zastosowanie czujników wspomagających nie–wizyjnych. Problemem istotnym, a dotychczas jeszcze nie podjętym, jest ewentualne rozszerzenie na roboty wyposażone w układy wizyjne wypróbowanych w robotach złożonych pierwszej generacji metod programowania przez uczenie, prostych i łatwych do opanowania przez personel bez wysokich kwalifikacji specjalistycznych;
- ułatwienia w programowaniu robotów dzięki umożliwieniu formułowania pewnych zadań jako problemów do rozwiązania przez określenie celu jaki ma być osiągnięty w postaci pożądanego stanu na przestrzeni problemu;
- samodzielny wybór przez robota optymalnego wariantu działania (przede wszystkim czasowooptymalnego – minimalny czas akcji);
- autodiagnostyka robota.

Uzupełnieniem artykułu jest krótki słownik wybranych terminów z dziedziny sztucznej inteligencji. W słowniku ujęto angielskie i/lub rosyjskie odpowiedniki niektórych terminów polskich użytych w artykule, w większości zaproponowanych przez autora, wobec braku dotychczas polskiej terminologii w tej dziedzinie.

Słownik wybranych terminów z dziedziny SzI

analiza sceny trójwymiarowej	~ three–dimensional scene analysis ~ анализ трехмерной сцены
funkcja przynależności (do zbioru rozmytego)	~ membership function ~ функция принадлежности
funkcja zgodności (wartości zmiennej lingwistycznej)	~ compatibility function

heurystyczna funkcja oceniająca	~ heuristic evaluation function
logika rozmyta	~ fuzzy logic
odpowiadanie na pytania	~ question–answering ~ отвечание на вопросы
poszukiwanie heurystyczne	~ heuristic search ~ эвристический поиск
preparat graficzny	~ графический препарат
programowanie ewolucyjne	~ эволюционное программирование
proste środowisko	~ simple environment
przestrzeń problemu	~ problem space пространство задачи
rachunek predykatów	~ predicate calculus ~ исчисление предикатов
reprezentacja wiedzy	~ knowledge representation ~ представление знаний
rozumowanie przybliżone	~ approximate reasoning
rozumowanie według zasad zdrowego rozsądku	~ common–sense reasoning
rozumowanie wsteczne	~ reasoning backward ~ рассуждение от заключения к посылкам
rozwiązywanie łamigłówek	~ puzzle–solving ~ решение игровых задач
rozwiązywanie problemów	~ problem solving ~ решение задач
stan problemu	~ problem state ~ состояние задачи
system oko–ręka	~ hand–eye system ~ система глаз-рука
sztuczna inteligencja (SzI)	~ artificial intelligence (AI) ~ исскуственный интеллект (ИИ)
świat klockowy	~ blocks world
świat robota	~ robot world ~ мир робота
widzenie maszynowe	~ machine vision
wyszukiwanie wyrażeń	~ expression–retrieval
wykrywanie wzorców	~ pattern–matching

zbiór rozmyty	~ fuzzy set ~ размытые множество
zmienna lingwistyczna	~ linguistic variable

Literatura

[1] Automatic Bolt Tightening System Through Pattern Recognition. Materiały firmy Hitachi.

[2] Basch E.E. i inni: A Tracking System for an Industrial Robot; 23-rd International Congress on Electronics, Rome, 76 (abstrakt).

[3] Bołdyrew A.I. i inni: Niekotorije problemy organizaciji stierieozrieniji robota, Tiechniczeskaja Kibiernietika 3/75.

[4] Feigenbaum E.A. i inni: Computers and Thought, w tłumaczeniu polskim, PWN 1972.

[5] Fogel L.J. i inni: Artificial Intelligence through Simulated Evolution, w tłumaczeniu rosyjskim, Mir 1969.

[6] Foster J.M.: Przetwarzanie struktur listowych, PWN 1976.

[7] Fully Automated Transistor Assembly System. Materiały firmy Hitachi.

[8] Gusiew Ł.A. i inni: Razmytyje mnozestwa. Tieorija i prilożenija Awtomatika i Tieliemiechanika 5/73.

[9] Havel I.M. i inni: The role of problem solving in cognitive robotic systems, RoManSy 1976, On Theory and Practice of Robots and Manipulators, Warsaw 1976.

[10] Intiegralnyje roboty – sbornik statiej, Mir 1973.

[11] Inskusstwiennyj intiellekt i psichologija. Praca zbiorowa, Nauka 1976.

[12] Łukasiewicz J.: Z zagadnień logiki i filozofii, PWN 1961.

[13] Moriya Oda i inni: A Survey of Heuristic Search Method of Multimodal Optimum Point, US–Japan Seminar on Learning Control and Intelligent Control, Gainesville 1973.

[14] Nevatia R. i inni: Description and Recognition of Curved Objects, Artifical Intelligence 1/77.

[15] Nilson N.J: Artificial Intelligence, IFIP Information Processing 74, Stockholm 1974.

[16] Ohteru S. i inni: Eyes of the Wabot, US–Japan Seminar on Learning Control and Intelligent Control, Gainesville 1973

[17] Popplestone R.J. i inni: Automatic Assembly with the Edinburgh Arm–Eye System, Conference on Industrial Robots, Lausanne 1974 (abstrakt).

[18] Rosen C.A.: Computation Reouirements for AI–based Manipulation Systems, 1975 International Conference on Cybernetics and Society IEEE, San Francisko (abstrakt).

[19] Seminarium, Nowoczesne roboty Unimation, Warszawa 1977 (nie publikowane drukiem).

[20] Sussman G.J.: A Computer Model of Skill Acquisition, American Elsevier Publishing Co., Inc. 1975.

[21] Uprawlenije, informacija, intellekt, pod redakcją Berga A.I. i inni, Mysl 1976.

[22] Vajnštein G.G. i inni: Obrabotka Wizualnoj informaciji robotami, Awtomatika i Tielemiechanika 6/74.

[23] Weinstein M.;A. Design for a Virtual Robot, Computer Science Conference, Washington D.C. 1975 (abstrakt).

[24] Womack B.F.: Basic Search Patterns in Heuristic Searsch US—Japan Seminar on Learning Control and Intelligent Control, Gainesville 1973.

[25] Wóltański S.: Język programowania LISP, Biuletyn MERA—PIAP nr 6/1977.

[26] Zadeh L.A.: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, US—Japan Seminar on Learning Control and Intelligent Control, Geinesville 1973.

[27] Zadeh L.A.: Fuzzy Logic and Its Application to Approximate Reasoning, IFIP Information Processing 74, Stockholm 1974.