

prof. nzw. dr hab. Robert A. Kosiński
Centralny Instytut Ochrony Pracy,
Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
Email: rokos@ciop.waw.pl

dr Barbara Siemiątkowska
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Świętokrzyska 21, 00-040 Warszawa
Email: bsiem@ippt.gov.pl
i Centralny Instytut Ochrony Pracy
adres jw.

Układ sieci neuronowych do analizy sytuacji niebezpiecznych na zautomatyzowanym stanowisku pracy

W pracy przedstawiono zastosowanie układu komórkowych sieci neuronowych do analizy sytuacji niebezpiecznych na zautomatyzowanym stanowisku pracy. Obrazy z kamery telewizyjnej są przekazywane do układu sieci neuronowych. Czas reakcji systemu jest dostatecznie mały, aby system bezpieczeństwa mógł pracować w czasie rzeczywistym.

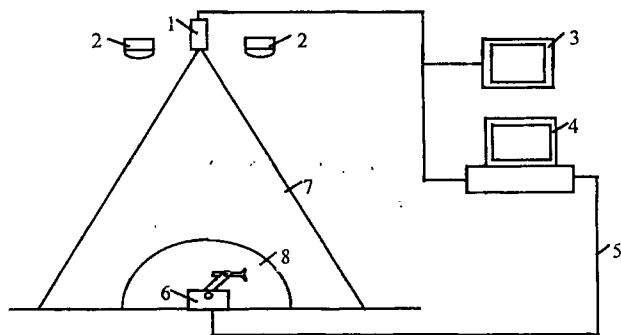
Cellular Neural Network for Safety Control at Robot Work Stand

An application of neural network in robotics is presented. The task for the system is to protect the work of an industrial robot. The images of the camera are analyzed using hybrid system of Cellular Neural Networks (CNN). The time of reaction of CNN is small enough to work in a real time.

1. Wstęp

W niniejszej pracy zostanie przedstawiony system analizujący sytuacje niebezpieczne na zrobotyzowanym stanowisku pracy. Obszar pracy robota jest obserwowany przez umieszczoną nad nim kamerę TV. Sygnały z kamery są magazynowane w komputerowej karcie wizyjnej. Obraz zapisywany w tej karcie jest przekazywany do układu sztucznych sieci neuronowych, wartość sygnału odpowiada jasności odpowiadającego piksela. Układ sieci jest zrealizowany software'owo w komputerze klasy PC procesorem *Pentium*. Komputer jest połączony z układem sterowania robota. W przypadku powstania sytuacji niebezpiecznej w polu pracy robota obserwowanym przez kamerę TV wysłany jest sygnał zatrzymujący robota. Schemat całego systemu bezpieczeństwa pokazuje rys. 1.1. W projekcie skoncentrowano się na zaprojektowaniu i oprogramowaniu układu sztucznych sieci neuronowych dokonującego klasyfikacji obrazów z pola pracy robota na obrazy sytuacji

bezpiecznych i sytuacji niebezpiecznych, które tworzą zagrożenie dla pracowników lub grożą uszkodzeniem. W pracy odniesiono się do robota przemysłowego typu IRp6/60 o maksymalnym zasięgu ramienia 110 cm, kamery telewizyjnej typu Mintron MCV1801CB z obiektywem Ermitec GCD-0314 o maksymalnym kącie widzenia $\phi = 35^\circ$, karcie wizyjnej typu Matrox Meteor, która odnawia zawartość pamięci zgodnie z obrazem pola widzenia kamery co 40 ms. We wstępnej fazie badań wykorzystano komputer DELL - Optiplex DGX 5100, wyposażony w mikroprocesor Pentium 100 MHz.



Rys 1.1. System analizujący sytuacje niebezpieczne na stanowisku pracy z robotem. 1 - kamera TV, 2 - źródła światła oświetlające pole widzenia kamery, 3 - monitor, 4 - komputer PC z kartą wizyjną, zawierający oprogramowanie układu sieci neuronowych, 5 - pętla umożliwiająca zatrzymanie robota, 6 - robot, 7 - Pole widzenia kamery TV, 8 - obszar ruchu ramienia robota.

2. Określenie obszaru nadzorowanego przez sieć neuronową

Określenie obszaru analizowanego przez system bezpieczeństwa jest zależne od rodzaju nadzorowanego obszaru (w naszym przypadku od rodzaju robota) i realizowanego procesu technologicznego, a z drugiej strony jest determinowane przez właściwości systemu wizyjnego.

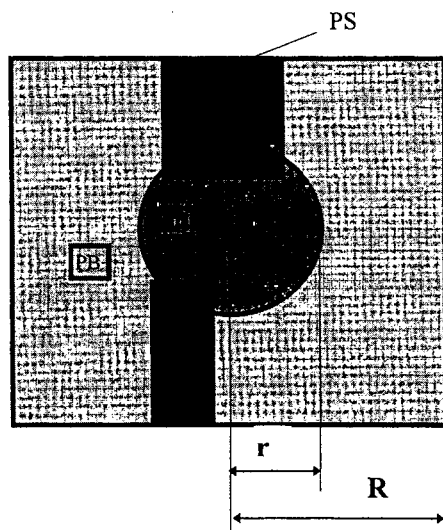
W przypadku wielu typów robotów ruch ramienia robota stacjonarnego może odbywać się w obszarze 360 stopni, co odpowiada kołu o promieniu zależnym od zasięgu ramienia - charakterystycznego parametru danego typu robota. Pole widzenia kamery TV sprzężonej z kartą wizyjną odpowiada kwadratowi, o boku zależnym od wysokości umieszczenia kamery nad podłogą. Jest ono odwzorowywane w kwadrat 512 x 512 pikseli. W celu umożliwienia rozmaitego, (zależnego od typu realizowanego przez robota procesu technologicznego) ukształtowania obszarów stałych, w których odbywa się dostarczanie detali do robota i ich transport po wykonaniu czynności przez robota, celowe jest dopuszczenie możliwości swobodnego wyboru kształtu i wielkości obszarów stałych (niżej oznaczanych jako PS). Pole odwzorowywane w karcie graficznej jest polem bezpieczeństwa (PB) otaczającym obszar ruchu ramienia robota. Ma ono kształt kwadratu o boku R ustalonym przez użytkownika. Pojawienie się w polu PB przedmiotów, które mogą stanowić sytuacje niebezpieczne jest wykrywane przez układ sieci neuronowych. Wewnątrz pola PB znajduje się kołowe pole pracy robota o promieniu r równym zasięgowi ramienia danego typu robota, ponadto, w sposób dowolny użytkownik systemu może ustalić jedno lub więcej pól stałych (PS) o kształcie prostokąta i dowolnych wymiarach. Zarówno obecność przedmiotów stałych, jak i

ruch w wybranych częściach otoczenia robota nie może być traktowany przez układ sieci neuronowych jako sytuacja niebezpieczna i prowadzić do wyłączenia robota. Z tego względu pola PS są wyłączone spod analizy sieci neuronowych. Wprowadzenie odpowiednio ukształtowanego pola pracy i obiektów stałych umożliwia wykonywanie czynności związanych z serwisem i programowaniem robota.

3. Określenie wzorców sytuacji niebezpiecznych

Obrazy z pola bezpieczeństwa są analizowane przez sieci neuronowe, które ustalają czy w polu PB nie pojawiły się obiekty, które powodują powstanie sytuacji groźnych wypadkiem. Ustalenie jakie obrazy z pola PB świadczą o powstaniu sytuacji niebezpiecznej ma zasadnicze znaczenie. Obrazy te są pobierane przez układ sieci z karty wizyjnej. W związku z tym należy przedyskutować relacje między wielkością przedmiotu w polu widzenia kamery a jego obrazem w karcie wizyjnej. Dla danej wysokości umieszczenia kamery TV nad podłogą h i maksymalnego kąta widzenia kamery φ , wymiar obrazu każdego obiektu zaobserwowanego przez kamerę TV, określony kątem widzenia α , zależy od rzeczywistego rozmiaru obiektu D , i położenia obiektu nad podłogą h_1 . Ze względu na to, że obraz pola widzenia kamery magazynowany w karcie wizyjnej ma formę kwadratu o boku a i postać 512×512 pikseli przyjmuje się, że rozmiar tego obrazu będzie równy polu bezpieczeństwa PB, dostosowanemu do pola pracy konkretnego robota. Z rys. wynika, że

$$a = h \tan \varphi, \quad (3.1)$$



Rys. 2.1. Pole pracy (PP) i pole bezpieczeństwa (PB) robota, zaznaczono dwa pola stałe (PS) do transportu obrabianych detali do i od robota.

Pole PB jest nadzorowane przez układ dwóch sieci neuronowych, z których każda składa się z $N \times N = 512 \times 512$ neuronów. Tak więc na każdy neuron przypada 1 piksel z obrazu magazynowanego w karcie wizyjnej.

Geometryczne zależności determinują rozmiar pola nadzorowanego przez jeden neuron oraz określają rozmiary wzorca, jaki może być uznany za niebezpieczny. Pole nadzorowane przez jeden neuron wynosi:

$$S_0^2 = R^2 / N^2 \quad (3.2)$$

Przyjmijmy teraz, że obiekt, który może spowodować sytuację niebezpieczną w pracy robota musi być dostatecznie duży, tzn. jego największy wymiar musi być większy od pewnej ustalonej wartości D_0 . Dzięki temu założeniu ingerencje obiektów zbyt małych (np. przelot owada), lub lokalnych szumów w układzie wizyjnym nie będą prowadzić do niepotrzebnego wyłączania robota. Sieć neuronowa musi więc traktować jako obrazy niebezpieczne różne rodzaje układów pikseli, których rozmiar przestrzenny jest porównywany z rozmiarem D_0 . Wymaganie to jest zadaniem niestandardowym i stanowi to jedną z poważniejszych trudności w ustaleniu struktury połączeń synaptycznych w projektowanej sieci neuronowej. Oddzielnym problemem jest występowanie cieni obiektów pojawiających się w polu bezpieczeństwa PB, co jest spowodowane nierównomiernym oświetleniem. Także zmiana położenia słońca, czy włączenie dodatkowego źródła światła może wywołać dodatkowe cienie, które zmieniają względne wielkości tak obiektów stałych jak i obiektów pojawiających się w polu PB. Może to doprowadzić do niepożądanego wyłączenia robota. Metodą uniknięcia takich sytuacji jest oświetlenie pola PB i PP kilkoma silnymi źródłami światła umieszczonymi symetrycznie wokół kamery TV. Powinno to wyeliminować niekontrolowane pojawianie się cieni obiektów, jednak problem ten wymaga dalszych badań.

4. Układ komórkowych sieci neuronowych

W niniejszym projekcie zastosowaliśmy neuronowe sieci komórkowe. Znalazły one szerokie i efektywne zastosowania w wielu dziedzinach techniki. Do najważniejszych zastosowań takich sieci należą zadania rozpoznawania obrazów mających specjalne cechy, rozpoznawania i określania prędkości obiektów, sterowania robotami [1 - 3]. Zaletą działania takich sieci jest ich duża prędkość działania, stosunkowo łatwa realizacja w postaci oprogramowania komputerowego, a także dość prosta konstrukcja układu scalonego stanowiącego taką sieć (bądź układ sieci). Realizacja taka, ze względu na bardzo wysoki koszt projektu i przygotowania produkcji układu scalonego, jest jednak możliwa przy produkcji seryjnej takich sieci, a nie na etapie prac pilotażowych. Typowa struktura sieci komórkowej jest przedstawiona na rys.4.1. Charakterystyczne jest regularne rozłożenie neuronów w przestrzeni, które najczęściej odpowiada macierzy prostokątnej. Położenie każdego neuronu dane jest wtedy dwoma indeksami i, j . Taka geometria sieci w sposób naturalny umożliwia analizę obrazów. Istotną cechą sieci komórkowej jest schemat połączeń synaptycznych między neuronami, który jest taki sam dla każdego neuronu, z wyjątkiem neuronów brzegowych i nazywany jest *szablonem sieci*. Sieci komórkowe często łączy się w struktury hierarchiczne, każda sieć w takiej strukturze wykonuje inne ściśle określone zadanie [1,2]. Zadanie realizowane przez sieć jest określone przez wytworzenie odpowiedniego układu połączeń synaptycznych między neuronami, czyli w postaci ustalenia szablonu. Każdy neuron może być sterowany przez sygnały pochodzące od sygnałów wejściowych i wyjściowych innych połączonych z nim neuronów i przez zewnętrzne sygnały wejściowe każdego neuronu (które

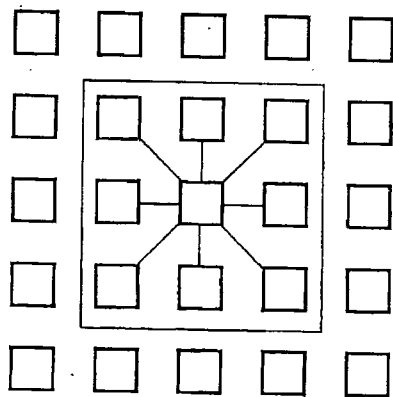
mogą pochodzić od innej sieci komórkowej połączonej z daną siecią). Dynamika sieci neuronowej (z czasem dyskretnym) jest opisywana równaniem [1 - 3]:

$$x_{ij}(t+1) = \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r a_{ij}^{l+k, j+l} y_{l+k, j+l}(t) + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r b_{ij}^{l+k, j+l} u_{l+k, j+l}(t) + I \quad (4.1)$$

oraz

$$y_{ij}(t+1) = f[x_{ij}(t)] \quad (4.2)$$

gdzie y jest sygnałem wyjściowym, u - sygnałem wejściowym odpowiedniego neuronu, f jest funkcją aktywacji pojedynczego neuronu, macierz $[A]$ określa sterowanie neuronu sygnałami wyjściowymi pochodzącymi od jego otoczenia, macierz $[B]$ określa intensywność sterowania neuronu sygnałami wejściowymi pochodzącymi od jego otoczenia, macierz $[I]$ określa wartość zewnętrznego sygnału polaryzacji. W niniejszej pracy wykorzystany został układ dwóch komórkowych sieci neuronowych, który pozwolił na dobrą realizację postawionego zadania.



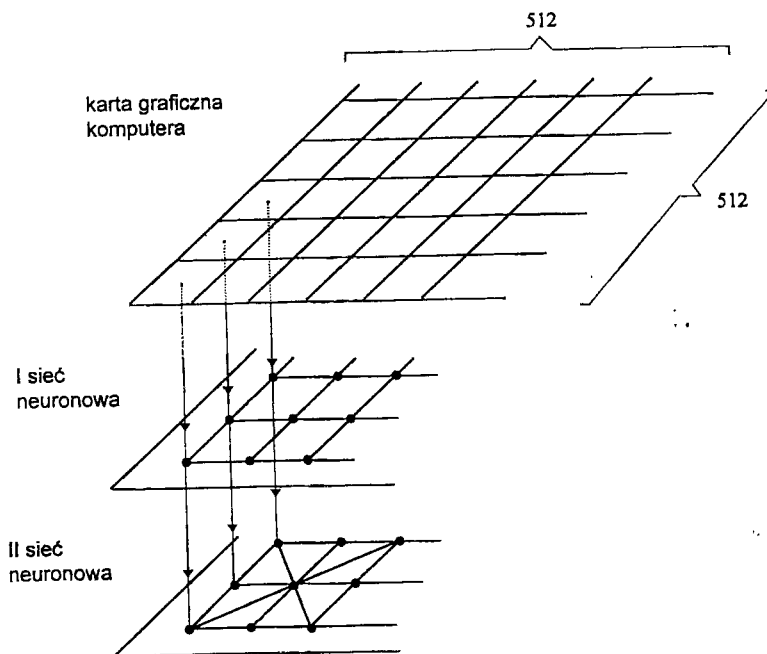
Rys. 4.1. Schemat komórkowej sieci neuronowej z sąsiedztwem pierwszego rzędu

Układ sztucznych sieci neuronowych składa się z dwóch sieci komórkowych o rozmiarach $N \times N = 512 \times 512$ neuronów. Jeden piksel obrazu stanowi sygnał wejściowy dla jednego neuronu (por. rys 4.2)

Zadaniem pierwszej sieci neuronowej jest obróbka obrazów obiektów stale obecnych w polu widzenia kamery, które są traktowane jako obiekty nie stwarzające niebezpieczeństwa. Obiekty te mogą mieć dowolne kształty i może ich być dowolna ilość. Ich rozmieszczenie (zarówno w polu PP jak i PB) i rozmiary są określane stosownie do czynności wykonywanych przez robota i realizowanego procesu technologicznego (zakres ruchu ramienia robota, obszar podawania przedmiotów i ich dalszego transportu po czynnościach wykonanych przez robota). Obraz pola PP i PB uwzględniający obiekty stale jest zapamiętywany w postaci odrębnego zbioru numerycznego. Umożliwia to łatwe dostosowanie sieci neuronowych do nadzorowania bezpieczeństwa w rozmaitych rodzajach procesów technologicznych realizowanych przez robota. Sygnałem wyjściowym pierwszej sieci komórkowej jest sygnał zawierający obraz widzenia kamery pozbawiony obrazów obiektów stałych. Podawany on jest jako sygnał wejściowy odpowiednim neuronom drugiej

sieci neuronowej. Zadaniem drugiej sieci neuronowej jest wykrywanie obiektów niebezpiecznych, które pojawiają się w polu bezpieczeństwa BP. W przypadku wtargnięcia dowolnego obiektu w pole BP sieć ta ustala położenie jednego z krańcowych pikseli w obrazie tego obiektu i pobudza odpowiadający mu neuron. Następnie stosowana jest procedura rozrostu ziarna [4], która ustala ilość sąsiednich czarnych pikseli w obrazie obiektu i pobudza odpowiednie neurony.

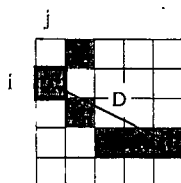
Na tej podstawie, w następnym kroku ustalany jest maksymalny wymiar obiektu D , który jest następnie porównywany z minimalnym rozmiarem D_0 . W przypadku gdy $D < D_0$ obiekt traktowany jest jako zbyt mały aby wytworzyć sytuację niebezpieczną. W przypadku $D > D_0$ mamy do czynienia z sytuacją niebezpieczną i sieć neuronowa wysyła sygnał wyłączający robota.



Rys 4.2. Układ dwóch sieci neuronowych. Sygnał wejściowy do I sieci neuronowej jest przesyłany z karty wizyjnej. Sygnał wyjściowy neuronów tej sieci jest sygnałem wejściowym dla odpowiednich neuronów II sieci.

W pierwszym kroku przeszukiwana jest cała sieć $N \times N$ neuronów (z wyłączeniem pól obiektów stałych) aż do znalezienia pierwszego pobudzonego neuronu odpowiadającego czarnemu pikselowi znajdującemu się na jednej z krawędzi obrazu obiektu, który pojawił się w polu PB. Następnie zliczane są wszystkie inne czarne piksele stykające się z pierwszym pobudzonym pikselem. Dalej, na podstawie położenia krańcowych czarnych pikseli należących do tego obrazu, obliczany jest wymiar zlokalizowanego „czarnego ziarna” D i

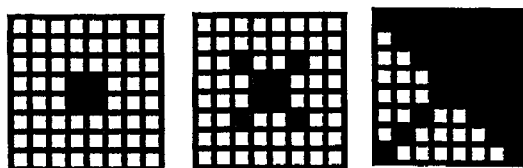
porównany jego rozmiar z parametrem D_0 (rys.4.3). W przypadku $D > D_0$ rozpoznany wzorec uznawany jest za niebezpieczny i sieć może wysłać sygnał zatrzymujący robota. W przeciwnym wypadku sieć kontynuuje poszukiwanie następnego ziarna w obrazie pola bezpieczeństwa robota, po znalezieniu porównuje jego rozmiar z D_0 itd. Po przeszukaniu całego obrazu pola PB zapisanego w karcie wizyjnej, analizowany jest kolejny obraz zmagazynowany w karcie wizyjnej (np. w badanej karcie wizyjnej zapis nowego obrazu z kamery TV powstaje co 40 ms). Czynności te są powtarzane aż do czasu gdy w kolejnym obrazie zostanie wykryty obraz niebezpieczny.



Rys 4.3 Ziarno otaczające piksel o współrzędnych i, j . Jego rozmiar wynosi D .

5. Wyniki eksperymentów

Układ sztucznych sieci neuronowych zaprojektowanych w ramach bieżącego zadania zrealizowany jest w postaci programu numerycznego napisanego w języku C, w 32-bitowym systemie NT i testowany na komputerze klasy PC z procesorem *Pentium* 100 MHz. Sprawdzone poprawność działania programu dla różnych wymiarów pól PB, PP i rozmaitych konfiguracji pól PS. Następnie przeprowadzono badania działania sieci dla różnych wymiarów minimalnych D_0 i różnych zakresów prędkości obiektów potencjalnie niebezpiecznych. Stwierdzono prawidłowe działanie układu sieci dla różnych wartości parametrów. Następnie zbadano prędkości działania sieci w zależności od wielkości obiektu naruszającego pole bezpieczeństwa i kierunku pojawienia się w polu PB. Badano obiekty o kształtach pokazanych na rys 5.1, pojawiających się z ośmiu kierunków od 0 do 2π co $\pi/4$.



wzorec 1

wzorec 2

wzorec 3

Rys 5.1 Badane kształty obiektów naruszających pole bezpieczeństwa robota PB.

Stwierdzono, że czas analizy obrazu przez sieć w małym stopniu zależy od kierunku poruszania się obiektu, zależy jednak od wymiaru obiektu i stopnia komplikacji obrazu obiektu. Im pole obiektu jest większe i bardziej skomplikowany jest jego obraz (wzorzec nr 3) tym dłuższy jest czas reakcji. Maksymalny czas reakcji wynosił poniżej 0.1 s, a czas minimalny 0.03 s.

Wnioski

Przeprowadzone testy działania układu sieci neuronowych, przy użyciu zestawu wzorców binarnych, wykazały że klasyfikacja obrazów pola pracy na bezpieczne i potencjalnie niebezpieczne, dla różnych wartości parametrów ustalanych przez użytkownika, jest przeprowadzana przez układ prawidłowo. Badania wykazały, że możliwe jest uzyskanie dużej prędkości działania układu sieci komórkowych (na komputerze 100 MHz - poniżej 100 ms). Stwierdzono też, że czas reakcji nie zależy od kierunku poruszania się obiektu, zależy jednak od wymiaru obiektu i stopnia komplikacji obrazu obiektu. Im większy jest obraz obiektu i im jest bardziej skomplikowany tym dłuższy jest czas analizy obrazu przez sieć. Przeprowadzono prace oprogramowujące kartę frame grabber sprzężoną z kamerą TV. Dokonano wstępnej oceny pracy systemu wizyjnego i dobrano odpowiednią platformę pracy oprogramowania zapewniającą możliwie szybkie działanie układu wizyjnego.

Literatura

- [1] T.Kacprzyk i K.Ślot, „Komórkowe sieci neuronowe”, PWN, Warszawa, 1995
- [2] L.O.Chua i L.Yang, „Cellular Neural Networks”, IEEE Trans. Circuits and Systems, 35, October 1988
- [3] Materiały z Polsko-Niemieckiego Seminarium „Artificial Neural Networks in Safety Engineering”, CIOP, Warszawa, 1996
- [4] P.Kies, „Implementation of Seed Growth Algorithm for Fuzzy Segmentation of Images”, 4th Int. Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications”, Seville, Spain, 1996, pp.197-200