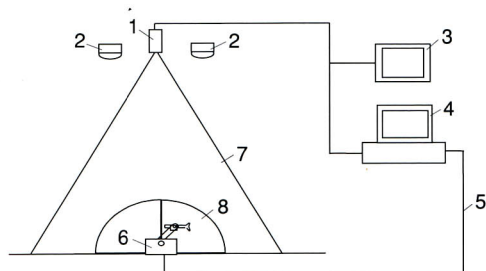


Układ sieci neuronowych do analizy sytuacji niebezpiecznych na zautomatyzowanym stanowisku pracy

Robert A. Kosiński
Barbara Siemiątkowska

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 krótki, aby system bezpieczeństwa mógł pracować w czasie rzeczywistym.

Schemat całego systemu bezpieczeństwa pokazano na rys. 1. 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 programowo w komputerze klasy PC z procesorem Pentium. Komputer jest połączony z układem sterowania robota. W przypadku powstania sytuacji niebezpiecznej w polu pracy robota, obserwowanym przez kamerę TV, wysyłany jest sygnał zatrzymujący robota. 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. 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 $\varphi = 35^\circ$, 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. System analizujący sytuacje niebezpieczne w polu pracy robota. 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

Prof. nzw. dr hab. Robert A. Kosiński jest pracownikiem Centralnego Instytutu Ochrony Pracy w Warszawie. Dr inż. Barbara Siemiątkowska jest pracownikiem Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Określenie obszaru nadzorowanego przez sieć neuronową

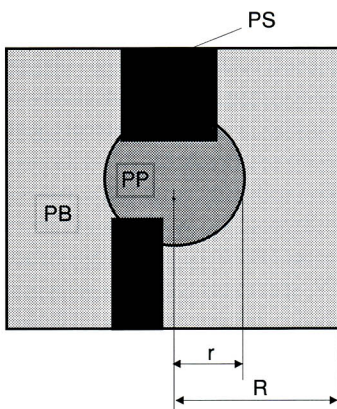
Określenie obszaru analizowanego przez system bezpieczeństwa jest zależne od rodzaju nadzorowanego obszaru (w naszym przypadku od rodzaju robota) i realizowanego procesu technologicznego, a z drugiej strony jest determinowane przez właściwości systemu wizyjnego.

W przypadku wielu typów robotów ruch ramienia robota stacjonarnego może odbywać się w obszarze 360° , co odpowiada kołu o promieniu zależnym od zasięgu 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 ustalany przez użytkownika. Pojawienie się w polu PB przedmiotów, które mogą stanowić sytuacje niebezpieczne jest wykrywane przez układ sieci neuronowych. Wewnątrz pola PB znajduje się 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 sytuacje niebezpieczne 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.

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 groźących 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_1 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 x 512 pikseli przyjmuje się, że wymiar tego obrazu będzie równy polu bezpieczeństwa PB, dostosowanemu do pola pracy konkretnego robota.



Rys. 2. 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:

$$S_o^2 = R^2 / N^2 \quad (1)$$

Przyjmijmy, 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_o . Dzięki temu założeniu ingerencje obiektów zbyt małych (np. przelot owada) lub lokalnych szumów w układzie wizyjnym nie będą prowadzić do niepotrzebnego wyłączenia robota. Sieć neuronowa musi więc traktować jako obrazy niebezpieczne różne rodzaje układów pikseli, których wymiar przestrzenny jest porównywany z wymiarem D_o . Wymaganiem to jest zadaniem niestandardowym i stanowi 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.

Układ komórkowych sieci neuronowych

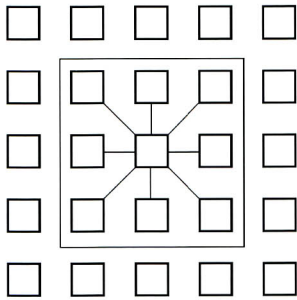
W niniejszym projekcie zastosowano neuronowe sieci komórkowe. Znalazły one szerokie i efektywne zastosowania w wielu dziedzinach techniki. Do najważniejszych zastosowań takich sieci należą zadania rozpoznawania obrazów mających specjalne cechy, rozpoznawania i określania prędkości obiektów, sterowanie robotami [1-3]. Zaletą takich sieci jest ich duża szybkość 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. 3. 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 szablonu. Każdy neuron może być sterowany sygnałami pochodzącymi 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, 2, 3]:

$$x_{ij}(t+1) = \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r a_{ij}^{i+k, j+l} y_{i+k, j+l}(t) + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r b_{ij}^{i+k, j+l} u_{i+k, j+l}(t) + I \quad (2)$$

oraz: $y_{ij}(t+1) = f[x_{ij}(t)] \quad (3)$

gdzie y jest sygnałem wyjściowym, u – sygnałem wejściowym odpowiedniego neuronu, f – funkcją aktywacji pojedynczego neuronu, macierz A określa sterowanie neu-

ronu 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.



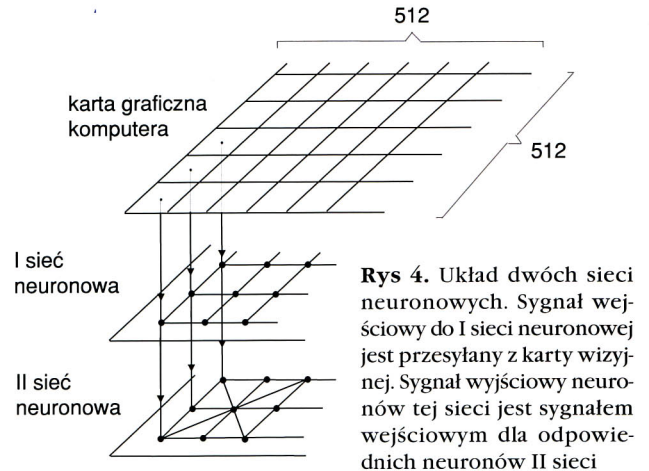
Rys. 3. Schemat komórkowej sieci neuronowej z sąsiedztwem pierwszego rzędu

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).

Zadaniem pierwszej sieci neuronowej jest obróbka obrazów obiektów stale obecnych w polu widzenia kamery, które są traktowane jako obiekty nie stwarzające zagrożenia. Obiekty te mogą mieć dowolne kształty i może ich być dowolna liczba. Ich rozmieszczenie (zarówno w polu PP jak i PB) i wymiary są określane stosownie do czynności wykonywanych przez robota i realizowanego procesu technologicznego (zakres ruchu ramienia robot, 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, której zadaniem jest wykrywanie obiektów niebezpiecznych, pojawiających 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 liczbę sąsiednich czarnych pikseli w obrazie obiektu i pobudza odpowiednie neurony.

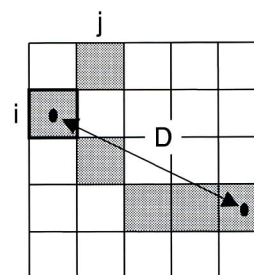
Na tej podstawie, w następnym kroku ustalany jest maksymalny wymiar obiektu D , który jest następnie porównywany z minimalnym wymiarem D_0 . W przypadku gdy $D < D_0$, obiekt traktowany jest jako zbyt mały, aby wytworzyć sytuację niebezpieczną. W przypadku $D > D_0$ mamy do czynienia z sytuacją niebezpieczną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

W pierwszym kroku przeszukiwana jest cała sieć $N \times N$ neuronów (z wyłączeniem pól obiektów stałych)



Rys. 4. 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

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 wymiar z parametrem D_0 (rys. 5). W przypadku $D > D_0$ rozpoznany wzorzec 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 tej karcie (np. w badanej karcie wizyjnej zapis nowego obrazu z kamery TV powstaje co 40 ms). Czynności te są powtarzane aż do chwili gdy w kolejnym obrazie zostanie wykryty obraz niebezpieczny.



Rys. 5. Ziarno otaczające piksel o współrzędnych i, j . Jego wymiar wynosi D .

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. Sprawdzono 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

Abstracts

Cellular Neural Network for Safety Control at Robot Work Stand, Robert A. Kosinski, Barbara Siemiątkowska – p. 17

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.