ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: TRANSPORT z. 41 Nr kol. 1491

Rafał WĄSIK

ZASTOSOWANIE TECHNIK SIECI NEURONOWYCH W SYSTEMIE STEROWANIA SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNĄ

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę zastosowania w systemach sterowania ruchem drogowym algorytmów obliczeniowych opartych na sieciach neuronowych. Omówiono założenia do systemu sterowania „NEURO OPTYMAL" wykorzystującego dotychczasowe opracowania [1] Zakładu Informatyki Transportu (system OPTYMAL), wykonane z udziałem autora publikacji.

THE NEURAL NETWORKS FOR A ROAD TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

Summary. The paper presents main ideas of neural networks application for a traffic control algorithms that have been implemented for the "NEURO OPTYMAL" package. The new model uses the OPTYMAL package that has already been developed in the Department of Transportation Systems Informatics [1].

1. WSTĘP

Jednym z zadań systemów sterowania ruchem drogowym jest zapewnienie warunków płynnego ruchu pojazdów. Brak odpowiedniej infrastruktury dróg oraz brak efektywnych systemów sterowania sprawiają, że przejazd przez strefy śródmiejskie staje się bardzo uciążliwy, a w godzinach szczytu niemożliwy. Korki uliczne są skutkiem przekraczania dopuszczalnych natężeń ruchu. Systemy dróg nie są w stanie przyjąć przejeżdżających przez nie zbyt dużej liczby pojazdów. Problemu tego, bez innych (np. administracyjnych czy inwestycyjnych) działań, nie rozwiąże do końca system sterowania ruchem. Może on jednak znacznie złagodzić skutki przeciążeń sieci transportowych usprawniając ruch pojazdów. Ma to szczególne znaczenie w dynamicznie zmieniających się warunkach ruchu.

Jednym z narzędzi wspomagania doboru programów sygnalizacji świetlnej jest system o nazwie „NEURO OPTYMAL" rozwijany w Zakładzie Informatyki Transportu, Instytutu Transportu Politechniki Śląskiej.

2. ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH W PROJEKTOWANIU PROGRAMÓW SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ

W związku z faktem, że liczba pojazdów pojawiających się na wlotach skrzyżowań zmienia się praktycznie ciągle, stosowanie obecnie systemów sygnalizacji o stałoczasowym programie pracy jest rozwiązaniem wysoce nieefektywnym z punktu widzenia uzyskania jak najlepszych warunków ruchu - zarówno w obrębie danego skrzyżowania, jak i całej sieci ulic.

Jednym z rozwiązań polegającym na cyklicznym dobieraniu programów sygnalizacji w zależności od aktualnych parametrów ruchu jest system „Optymal" [1]. Choć jest on dosyć wymagający, jeśli chodzi o zasoby hardware'owe komputera, pozwala dobierać najlepsze programy sygnalizacji analizując wszystkie możliwe rozwiązania.

Zwykle jednak zadanie sterowania ruchem ulicznym nie wymaga „perfekcyjnej" dokładności (pomiary natężeń ruchu dokonywane są w pewnych przedziałach czasowych, a na podstawie ich uśrednionych wartości generowane są programy sygnalizacji na następny interwał czasu). Ponieważ wynikowy program sygnalizacji praktycznie nigdy nie jest zastosowany do identycznej sytuacji ruchowej, dla jakiej został wyznaczony, lecz dla sytuacji **podobnej** (w mniejszym lub większym stopniu), celowe wydaje się zastosowanie systemu doboru programu sygnalizacji, którego działanie opiera się na sieciach neuronowych.

Można skonstruować sieć, której wejściami będą wielkości natężeń ruchu na poszczególnych wlotach (pasach ruchu) skrzyżowania, a wyjściami – generowane wzorce sterowania dla określonej sytuacji ruchowej. Odpowiedź ta odwzorowywać będzie długości czasu trwania poszczególnych sygnałów zielonych.

Zastosowanie tego typu systemu pozwala na zdecydowane skrócenie czasu obliczeń wykonywanych przez układ sterujący (np. sterownik sygnalizacji świetlnej lub komputer w centrum dyspozytorskim), co daje możliwość częstszego aktualizowania programów sygnalizacji. Zwiększa się wtedy elastyczność systemu – sterowanie przez niego generowane jest bardziej skorelowane z sytuacją ruchową. Zaletą proponowanego rozwiązania jest stosunkowo małe zapotrzebowanie sprzętowe, co daje możliwość zastosowania go w praktycznie każdym współczesnym sterowniku sygnalizacji świetlnej.

Sieć neuronowa generuje odpowiedzi na podstawie określonych danych wejściowych interpolując je z poznanymi i zapamiętanymi wcześniej, podczas procesu uczenia, wzorcami. Istnieje wiele metod uczenia, zależnych m.in. od rodzaju sieci, znajomości (bądź jej braku) pożądanych odpowiedzi itd. [2, 4, 5].

3. OPIS MODELU STEROWANIA

3.1. Wektory danych wejściowych

Danymi wejściowymi, na podstawie których określany jest harmonogram sterowania dla zadanego stanu obiektu, są wartości pomiarowe natężenia ruchu. Są one określane dla pojazdów umownych na godzinę, niezależnie dla poszczególnych pasów ruchu. Pomiar odbywa się to automatycznie z wykorzystaniem układu pętli indukcyjnych lub innych urządzeń pomiarowych. Natężenia po normalizacji ich wartości podawane są na wejścia sieci neuronowej.

Projektowany system zakłada obecność maksymalnie 14 pasów ruchu na jednym skrzyżowaniu, choć możliwe jest powiększenie tej liczby, gdyby zaistniała taka potrzeba. Przykładowy wektor wejściowy modułu „NEURO OPTYMAL" przedstawiono poniżej:

$$X_{we} = \begin{bmatrix} 600 \\ 356 \\ 0 \\ 0 \\ 245 \\ 0 \\ 0 \\ 459 \\ 234 \\ 79 \\ 0 \\ 78 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- wartość natężenia ruchu pojazdów na pasie 1

- wartość natężenia ruchu pojazdów na pasie 14

3.2. Sposoby dostosowywania sterowania do warunków ruchu

Sterowanie akomodacyjne, które ma być realizowane przez moduł „NEURO OPTYMAL", zostaje przeniesione na rzeczywisty obiekt sterowania – skrzyżowanie ze sterownikiem sygnalizacji świetlnej. Stosowane współcześnie sterowniki należą do generacji urządzeń mikroprocesorowych i pozwalają na zdalne, telematyczne modyfikacje programu sterowania z centrum dyspozytorsko-obliczeniowego.

Z uwagi na wymagania stawiane przez sterowniki różnych producentów można wyróżnić dwa zasadnicze tryby pracy modułu „NEURO OPTYMAL", które omówiono poniżej.

3.2.1. Sterowanie on line

Przy zadanej dokładności sterowania (1 sekunda), sterownik rejestruje wektor wejściowy Y_0 lub Y_s w tych interwałach czasu. Wektory zmiennych wejściowych sterownika odpowiadają wektorom wyjściowym generowanym przez moduł „NEURO OPTYMAL". Określają one, czy trwającą w obecnej chwili kombinację świateł na skrzyżowaniu należy kontynuować w następnym kroku (sekundzie) pracy sterownika, czy też należy przejść do kolejnych etapów sterowania.

3.2.2. Sterowanie sekwencyjne

W trybie pracy sekwencyjnej generowane są pełne harmonogramy sygnalizacji, w miejsce dynamicznie określanego czasu trwania bieżących faz. Taki sposób sterowania jest przyjęty dla większości obecnie produkowanych urządzeń sterujących, co na pewno można uznać za dużą zaletę tej metody organizacji sterowania. Podobnie jak to, że przy braku określania kolejnych (innych od aktualnie wykonywanego) programów sygnalizacji sterownik wykonuje ostatnio „zapamiętany" program. Przy sterowaniu *on line* kwestia zaniku sygnału sterowania mogącego wystąpić np. przy uszkodzeniu toru transmisji danych musi być rozwiązana przez zapisanie w pamięci sterownika programu lub programów awaryjnych.

Wadą sterowania sekwencyjnego jest o wiele większa „bezwładność" takiego sterowania; przed przejściem do następnej sekwencji sterowania istnieje konieczność dokończenia bieżącego harmonogramu. Zmiany i dostosowanie programu do aktualnej sytuacji następują w najmniej korzystnym przypadku w odstępach czasowych równych długości czasu trwania całego cyklu programu sygnalizacji. W przypadku sterowania *on line* następuje to praktycznie natychmiast. Jednak specyfika ulicznego ruchu pojazdów samochodowych pozwala na

przyjęcie tego typu sterowania bez zauważalnego pogorszenia warunków ruchu, choć o ile jest to możliwe, należy stosować rozwiązanie ze sterowaniem *on line*.

3.3. Wektory danych wyjściowych

W zależności od rodzaju zastosowanego sterowania (p. 3.2) generowane są różne wektory informacji wyjściowych omówione w pp. 3.3.1. i 3.3.2.

3.3.1. Wersja ze sterowanien on line

W tym przypadku zestaw wartości wyjść sieci neuronowej opisuje to, czy w następnej sekundzie dana faza ma utrzymywać swój stan obecny, czy też należy przejść do następnej sekwencji świateł sygnalizatorów. Składowymi takiego wektora, generowanego co sekundę, są wartości typu logicznego, a każda z nich określa rodzaj sterowania obecnego na sygnalizatorach danej fazy (np. „0" – światło czerwone, „1" – światło zielone).

Przykładowy wektor wyjściowy systemu „NEURO OPTYMAL" przy sterowaniu *on line* przedstawiono poniżej:

$$Y_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{- element odpowiadający sterowaniu fazą 1} \\ \\ \\ \\ \text{- element odpowiadający sterowaniu fazą 5} \end{array}$$

Przy określeniu zmiany sygnału z zezwalającego na ruch na zabraniający wjazdu na skrzyżowanie (lub odwrotnie) sterownik przechodzi przez odpowiednie sekwencje sterowania (światło żółte lub żółto-czerwone) zgodnie z zaprogramowanymi wcześniej długościami czasu tych sterowań.

3.3.2. Wersja systemu ze sterowaniem sekwencyjnym

W tym przypadku wektorem wyjściowym jest zestaw długości czasu trwania światła zielonego w poszczególnych fazach, co przedstawiono na przykładzie.

$$Y_s = \begin{bmatrix} 21 \\ 35 \\ 25 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- element określający długość czasu trwania G1

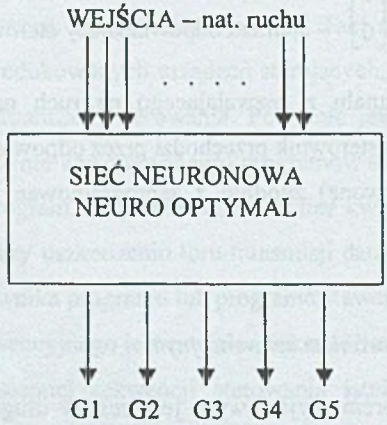
- element określający długość czasu trwania G5

W przypadku sygnalizacji o ilości faz mniejszej niż 5 wartości „0" oznacza brak danej fazy.

4. SYSTEM „NEURO OPTYMAL"

W Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej podjęto prace nad projektem neuronowego systemu sterowania ruchem ulicznym o nazwie „NEURO OPTYMAL". Uwzględniając założenia opisane we wcześniejszej części niniejszego artykułu system może być przedstawiony ogólnym schematem z rys.1.

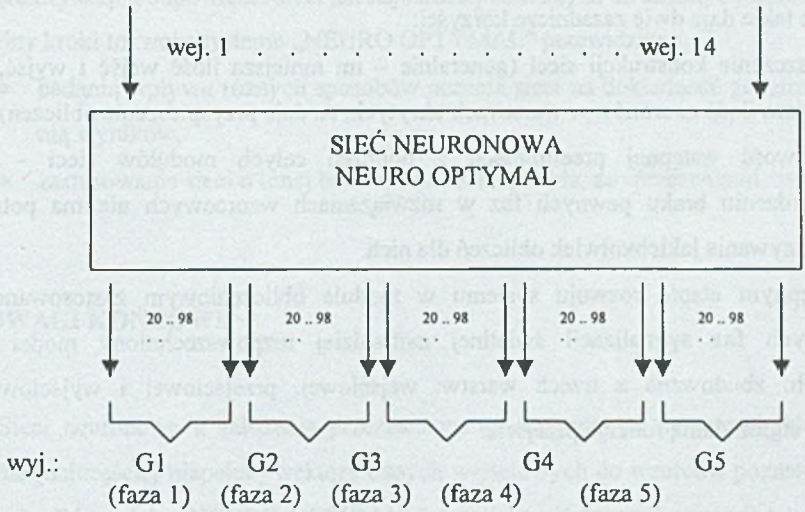
Na wejścia sieci podawane są średnie natężenia ruchu, które mogą być zarejestrowane przez np. pętle indukcyjne lub inne czujniki ruchu zainstalowane na skrzyżowaniu. Na ich podstawie system generuje na wyjściu odpowiedź w postaci określenia długości czasu trwania sygnału zielonego w poszczególnych fazach (G1 – G5).



Rys. 1. Schemat sieci neuronowej
Fig. 1. Chart of neural network

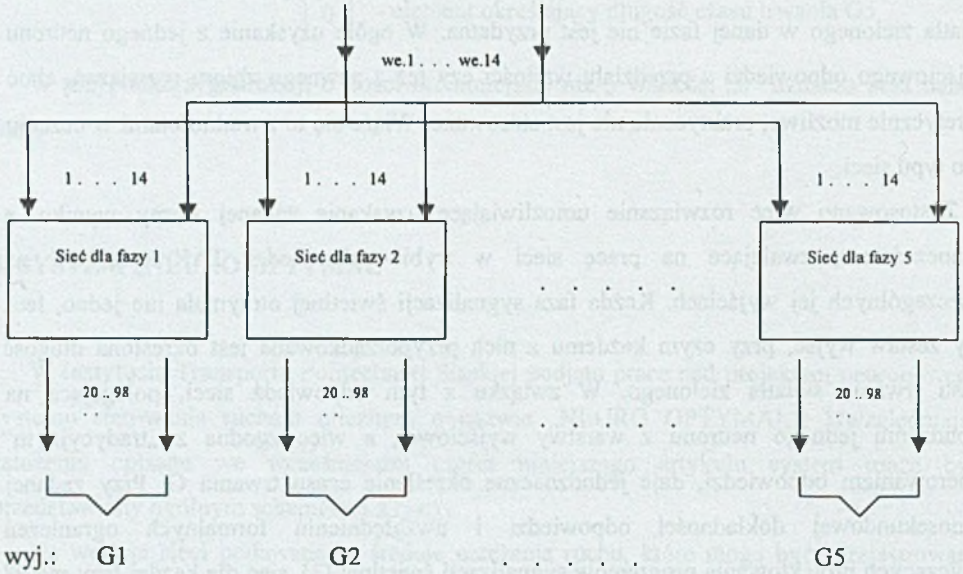
Klasyczne zastosowanie sieci neuronowej to określanie przynależności przedstawionego jej wektora danych wejściowych do określonej klasy wzorców. Sieć odpowiada na zadany zestaw danych wejściowych „TAK" lub „NIE". Ponieważ w przypadku określenia długości czasu trwania potrzebujemy pewnego, ściśle określonego, przedziału wartości, decyzja w postaci odpowiedzi „0" lub „1" na jednym wyjściu reprezentującym długość czasu trwania światła zielonego w danej fazie nie jest przydatna. W ogóle uzyskanie z jednego neuronu wyjściowego odpowiedzi z przedziału wartości czy też z pewnego zbioru rozwiązań, choć teoretycznie możliwe, praktycznie nie jest stosowane. Wiąże się to z trudnościami w uczeniu tego typu sieci.

Zastosowano więc rozwiązanie umożliwiające uzyskanie żądanej formy wyniku, a jednocześnie pozwalające na pracę sieci w trybie odpowiedzi TAK lub NIE na poszczególnych jej wyjściach. Każda faza sygnalizacji świetlnej otrzymała nie jedno, lecz cały zestaw wyjść, przy czym każdemu z nich przyporządkowana jest określona długość czasu trwania światła zielonego. W związku z tym odpowiedź sieci, polegająca na pobudzeniu jednego neuronu z warstwy wyjściowej, a więc zgodna z „tradycyjnym" generowaniem odpowiedzi, daje jednoznaczne określenie czasu trwania G. Przy żądanej jednosekundowej dokładności odpowiedzi i uwzględnieniu formalnych ograniczeń dotyczących projektowania programów sygnalizacji świetlnej [3], sieć dla każdej fazy ma 98 wyjść. Jeżeli przyjąć założenia dotyczące geometrii skrzyżowania [1], uzyskamy sieć, której schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat sieci neuronowej przy uwzględnieniu ograniczeń
Fig. 2. Chart of neural network with restriction

Ponieważ w ten sposób projektowana sieć rozrosła się do stosunkowo dużych rozmiarów, zastosowano pewne uproszczenia w jej konstrukcji. Polegają one na „oddzieleniu" od siebie poszczególnych faz poprzez zamodelowanie pięciu osobnych sieci neuronowych o identycznej konstrukcji i równolegle połączonych wejściach.



Rys. 3. Schemat sieci neuronowych w systemie „NEURO OPTYMAL"
Fig. 3. Chart of „NEURO OPTYMAL's" neural networks

Rozwiązanie takie daje dwie zasadnicze korzyści:

- uproszczenie konstrukcji sieci (generalnie – im mniejsza ilość wejść i wyjść, tym mniejsza ilość neuronów w warstwach ukrytych, co daje przyspieszenie obliczeń),
- możliwość wstępnej preeliminacji z obliczeń całych modułów sieci – przy stwierdzeniu braku pewnych faz w rozwiązaniach wzorcowych nie ma potrzeby wykonywania jakichkolwiek obliczeń dla nich.

Na wstępnym etapie rozwoju systemu w module obliczeniowym zastosowano dla poszczególnych faz sygnalizacji świetlnej najbardziej rozpowszechniony model sieci neuronowych: zbudowana z trzech warstw: wejściowej, przejściowej i wyjściowej, o neuronach z sigmoidalną funkcją przejścia:

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-\beta \cdot \varphi)} \tag{4.1}$$

gdzie: y – odpowiedź neuronu,

β – zadany parametr,

φ – sumaryczny ważony sygnał wejściowy neuronu.

W celu uzyskania pożądanych odpowiedzi sieci, do jej uczenia wykorzystano wyniki obliczeń uzyskane w wyniku działania systemu „Optymal" [1], który został specjalnie w tym celu zmodyfikowany: generowane są całe ciągi uczące. Zawierają one określoną przez użytkownika liczbę elementów składających się z:

- pełnego opisu natężeń ruchu na poszczególnych pasach oraz
- wyjściowego programu sygnalizacji

Zbiory tych danych, będące ciągami uczącymi dla sieci neuronowej, zapisywane są w odpowiednich plikach przejściowych.

Należy tutaj zaznaczyć, że ciągi uczące mogą być wygenerowane nie tylko przez system „Optymal", ale również „ręcznie" według założeń i obliczeń dokonanych przez projektanta systemu sterowania.

W związku ze znajomością żądanych odpowiedzi sieci zastosowano metodę uczenia „z nauczycielem", ze wsteczną propagacją błędów (ang. back propagation) [3, 4, 5]. Obecnie trwają badania nad optymalnym dobraniem parametrów sieci, takich jak:

- wartość współczynnika szybkości uczenia (ang. learning rate) oraz momentum,
- ilość neuronów w warstwie ukrytej,
- wartość współczynnika β w funkcji przejścia neuronu,

w celu uzyskania odpowiedzi sieci jak najbardziej zbliżonych do zadanych wzorców. Jako kolejny kroki rozwoju systemu „NEURO OPTYMAL" przewidziano:

- badania wpływu różnych sposobów uczenia sieci na dokładność generowanych przez nią wyników,
- zastosowanie sieci o innej budowie (sieci Hopfielda, ze sprzężeniami zwrotnymi).

5. UWAGI KOŃCOWE

Sieci neuronowe z założenia przeznaczone są do pracy w systemach klasyfikujących pewne (najczęściej niepełne) wektory danych wejściowych do wzorców poznanych na etapie uczenia. W module „NEURO OPTYMAL" danymi wejściowymi są wartości natężeń ruchu pojazdów, które z pewną dokładnością powtarzają się w cyklach dziennych lub tygodniowych

dla poszczególnych wlotów lub pasów ruchu. Można przyjąć, że istnieje pewna skończona liczba możliwych kombinacji tych wartości. W związku z tym może zaistnieć tutaj efekt uczenia się sieci neuronowej „na pamięć", czyli dokładnego zapamiętywania poszczególnych elementów ciągu uczącego. Jednak przy założeniu skończonej liczby możliwych kombinacji danych wejściowych takie rozwiązanie jest dopuszczalne, pomimo iż taka cecha dyskwalifikuje skuteczność tradycyjnie pojmowanych systemów wnioskowania.

Przedstawiony moduł obiczeniowy został zaimplementowany w środowisku programistycznym Delphi firmy Borland. Chociaż obecnie jest on przeznaczony do obsługi pojedynczego skrzyżowania, koncepcję takiego sterowania można przenieść na ciąg lub sieć skrzyżowań. Należy odpowiednio zmodyfikować układ wejść i wyjść sieci (a co się z tym wiąże – także wewnętrzną strukturę sieci) oraz odpowiednio zmienić interpretację wyników. W sterowaniu sieciowym często skupiamy się na określaniu pewnych relacji uprzywilejowanych w celu polepszenia ogólnych warunków ruchu w rozpatrywanym obszarze.

Prace nad systemem „NEURO OPTYMAL" mają charakter otwarty – osoby zainteresowane tą tematyką mogą kontaktować się z autorem tego artykułu za pośrednictwem poczty elektronicznej: rw@polsl.katowice.pl

Literatura

1. Doroz R., Wąsik R., Widuch S.: Wskaźniki jakości dla sterowania sygnalizacją świetlną w systemie „Optymal", Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport, Gliwice 2000.
2. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.
3. Instrukcja o drogowej sygnalizacji świetlnej, Monitor Polski, Warszawa 1994.
4. Tadeusiewicz R.: Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998
5. Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe, podstawy i zastosowania, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Piecha

Abstract

The paper presents a road trafic structure that is a subject of the control procedures design methodologies, concerning neural network implementation. The neural network works as a control core of the system. The paper shows main aspects of the network inputs and outputs definition and how the project has been defined. The network inputs have been defined twofold: the combinational vector that is implemented for a single network structure and a sequential one, providing the network with the in-comming data sequencies. Similarly, the network outputs contain a current states of the control procedure or the whole data sequencies, for the control schedules.

The conception just presented is still under development, anyhow first conclusions has already been done. The author expects to obtain satysfaying results that allow to define the control units for the single cross roads nodes and for a dispatch system, that coordinates the local nodes control schedules.