

Lokalnie pobudzana i globalnie hamowana sieć oscylatorowa – LEGION

Paweł Stawarz
Wydział Informatyki i Zarządzania, Politechnika Wrocławska
E-mail: pawel_stawarz@o2.pl

Streszczenie

Niniejsza praca szczegółowo prezentuje działanie lokalnie pobudzonej i globalnie hamowanej sieci oscylatorowej opartej na modelu oscylatora relaksacyjnego. W pierwszej części pracy znajduje się krótkie wprowadzenie w świat sieci oscylatorowych, w którym omówiona jest ogólna idea ich działania oraz możliwości ich wykorzystywania. Następnie wprowadzono podstawy matematyczne modelujące opisywane zjawisko w sieci LEGION i jednocześnie przedstawiono proste przykłady pobudzające wyobraźnię oraz intuicję. Na zakończenie zaprezentowano wiele ciekawych wyników zastosowania sieci LEGION w praktyce.

Wprowadzenie

Sieć oscylatorowa składa się z sieci połączonych ze sobą oscylatorów, których model odpowiada standardowym fizycznym oscylatorom relaksacyjnym. Fizyczny oscylator relaksacyjny jest oscylatorem budowanym najczęściej z kondensatora, opornika oraz urządzenia progowego. Jego działanie sprowadza się do sytuacji, w której kondensator jest łagodnie ładowany do pewnego progowego momentu, po którym następuje jego gwałtowne rozładowanie. Zjawisko to uzyskiwane jest dzięki odpowiedniemu połączeniu wymienionych wcześniej elementów, w którym najważniejszą rolę odgrywa wybrane urządzenie progowe. Zastosowanie tak działającego modelu oscylatora w praktyce, sprowadza się do wykorzystania go w celu symulowania działania biologicznego neuronu, w którym wyróżnić można fazę aktywacji oraz fazę uśpienia. W zamodelowanej sieci oscylatorów, przejście do fazy aktywacji jednego z oscylatorów powoduje natychmiastowe aktywowanie wszystkich połączonych z nim oscylatorów stymulowanych przez ten sam zewnętrzny bodziec i jednocześnie nie dopuszcza do aktywacji oscylatorów

popudzanych przez inny bodziec. Zachowanie to doprowadza się do sytuacji, w której można zaobserwować zdesynchronizowane bloki oscylatorów wzajemnie zsynchronizowanych. Powyższa bardzo ogólnie sformułowana idea działania sieci oscylatorowych zostanie uszczegółowiona w dalszej części pracy.

Aktualnie, sieci oscylatorowe wykorzystywane są głównie w zadaniach segmentacji scen w czasie rzeczywistym – najbardziej popularne jest wyodrębnianie obiektów znajdujących się na zdjęciu bądź wydobywanie głosów (elementów dźwiękowych) ze strumienia dźwiękowego. Ze względu na bardzo złożony problem komputerowej segmentacji scen (wizualnych bądź słuchowych) zastosowanie w tym celu omawianych sieci oscylatorowych wygląda naprawdę obiecująco pod względem szybkości jej działania. Kluczowym czynnikiem segmentacji scen jest grupowanie podobnych właściwości sensorycznych pochodzących ze źródła z jednoczesnym ich odseparowaniem od reszty znacznie się różniących. Każdy oscylator sieci skojarzony jest z pewną własnością obiektu – w najprostszym przypadku (wyodrębniania obiektów, tj. zbiorów „połączonych” pikseli, z obrazu) z wartością koloru piksela. Dzięki temu wspomniane zjawisko grupowania i separacji sprowadza się odpowiednio do synchronizacji i desynchronizacji oscylatorów sieci. Oznacza to, że każdy wydzielony obiekt reprezentowany jest przez grupę zsynchronizowanych oscylatorów, zdesynchronizowaną z innymi grupami reprezentującymi inne objekty.

Niestety początkowe prace nad sieciami oscylatorowymi nie były jednak zbyt zadowalające. Wielką trudnością okazało się zapewnienie im odpowiedniej desynchronizacji pomiędzy różnymi obiektami. Pierwsze rozwiązania radziły sobie doskonale z grupowaniem dwóch różnych obiektów, niemniej jednak skuteczność działania nie była już tak pewna przy większej ich liczbie. Zauważono dodatkowo, że modele sieci oparte na pełnych połączeniach oscylatorów (każdy z każdym) prowadziły do nie satysfakcjonujących segmentacji. W związku z powyższymi niedociągnięciami, DeLiang Wang oraz David Terman zaproponowali w 1995 roku nową klasę sieci oscylatorowych – LEGION (*Locally Excitatory Globally Inhibitory Oscillator Networks*). Wykazali oni jednocześnie ich zdolność do szybkiego uzyskiwania synchronizacji wewnątrz każdej grupy oscylatorowej wraz z desynchronizacją dowolnej liczby wydzielonych grup.

1. Teoretyczny opis działania sieci LEGION

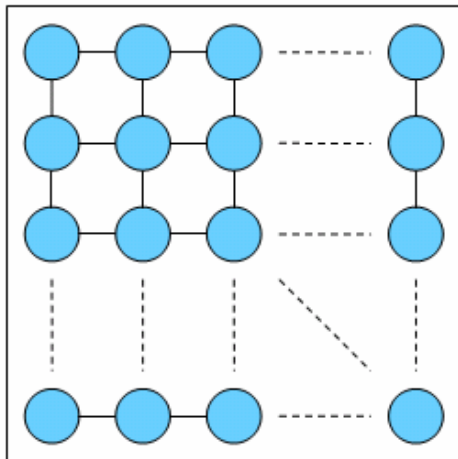
Niniejszy rozdział zawiera szczegółowe wprowadzenie w teorię działania sieci oscylatorowej LEGION. Rozpoczynając od najwyższego poziomu abstrakcji przeanalizowana zostanie architektura sieci LEGION, aby następnie schodząc na nieco niższy poziom wprowadzić i dokładnie przeanalizować model matematyczny opisujący działanie pojedynczego oscylatora oraz tzw. ośrodka hamującego.

1.1. Architektura sieci LEGION

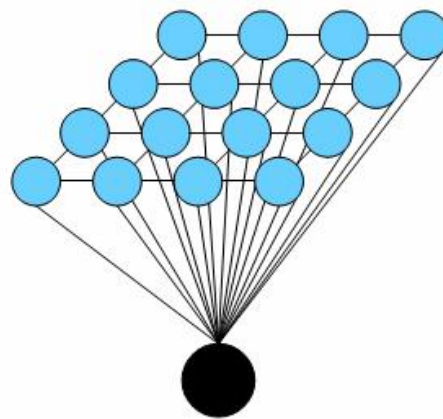
Opisując architekturę sieci LEGION należy zwrócić uwagę na trzy najważniejsze jej składowe:

- model pojedynczego oscylatora,
- lokalne połączenia pobudzające pomiędzy oscylatorami,
- globalny ośrodek hamujący wszystkie oscylatory w sieci.

Model zachowania pojedynczego oscylatora sieci opisywany jest przez układ dwóch równań różniczkowych pierwszego rzędu, który zostanie dokładnie omówiony w następnym podrozdziale. Lokalne połączenia pobudzające pomiędzy oscylatorami wspomagają ich synchronizację w obrębie odpowiedniej grupy oscylatorowej. Globalny ośrodek hamujący z kolei wspomaga desynchronizację dowolnej liczby wydzielonych grup oscylatorowych. Poniższe rysunki (Rysunek 1. oraz Rysunek 2.) przedstawiają przykładową architekturę dwuwymiarowej sieci LEGION.



Rysunek 1. Architektura dwuwymiarowej sieci LEGION



Rysunek 2. Architektura dwuwymiarowej sieci LEGION wraz z globalnym ośrodkiem hamującym

W powyższej bardzo prostej realizacji sieci LEGION (Rysunek 1.) zauważyć można, że wszystkie oscylatory układają się w dwuwymiarową „siatkę”. Większość oscylatorów połączona jest lokalnie z czterema najbliższymi sąsiadami. Jedynie oscylatory znajdujące się na granicy „siatki” połączone są z dwoma lub trzema. Ze względu na symetrię połączeń prawie wszystkich oscylatorów z wyjątkiem tych granicznych, w matematycznym modelu pojedynczego oscylatora zaczęto dodatkowo stosować mechanizm nazywany dynamiczną normalizacją, którego celem jest zapewnienie każdemu oscylatorowi sieci jednakowej wartości całkowitego efektywnego połączenia wag od sąsiadów.

Architektura sieci LEGION może zostać uogólniona do wielowymiarowych przestrzeni (np. oscylatory układające się w trójwymiarowy prostopadłościan) jak również do dowolnie określonego sąsiedztwa oscylatorów (a w tym do dowolnej liczby połączeń lokalnych). Można również pozostać przy pełnych połączeniach lokalnych modelując jedynie odpowiednie zależności wyznaczające wartości wag tych połączeń, np. wagi połączeń z najbliższymi sąsiadami są bardziej znaczące (większe) od wag połączeń z dalszymi sąsiadami. Należy wówczas jedynie określić miarę odległości pomiędzy dowolnymi dwoma oscylatorami sieci. Wagi połączeń lokalnych mogą być także dowolnie określane przez wartości stałe bądź zależności funkcyjne. Warto przy tym jednak zwrócić uwagę na fakt, iż w porównaniu z klasycznymi sieciami neuronowymi wagi te nie podlegają żadnemu uczeniu. W przypadku sieci oscylatorowych w ogóle ciężko mówić o jakimkolwiek uczeniu. Jak to zostało już zasygnalizowane we wprowadzeniu, można powiedzieć, iż sieci te służą do modelowania ludzkiej spostrzegawczości. Wielkim sukcesem tych sieci jest przede wszystkim niezwykle szybkie działanie podczas segmentacji scen, nieporównywalne z żadnym dotychczasowym algorytmem szczegółowo analizującym strumień wejściowy.

Niezmiennym elementem sieci LEGION jest występowanie globalnego ośrodka hamującego (Rysunek 2.), którego zadaniem jest zapewnienie desynchronizacji pomiędzy wszystkimi wyodrębnionymi grupami oscylatorowymi. Ośrodek ten połączony jest ze wszystkimi oscylatorami sieci. Każde takie połączenie charakteryzuje się identyczną, ustaloną w konfiguracji sieci, wartością wagi (z przedziału od 0 do 1). Działanie opisywanego ośrodka hamującego sprowadza się do odbierania impulsów pochodzących od wszystkich oscylatorów sieci i odpowiedniej odpowiedzi hamującej przeskalowanej przez ustaloną wartość wagi wszystkich połączeń zwrotnych. Zwrotna odpowiedź hamująca pojawia się tylko i wyłącznie w momencie, gdy aktywność co najmniej jednego oscylatora sieci przekroczy pewną

ustaloną wartość progową. Zjawisko to pozwala w krótkim czasie doprowadzić do desynchronizacji wyodrębnionych grup oscylatorowych. Kiedy jedna z grup w sposób zsynchronizowany przechodzi w fazę aktywacji wówczas uaktywnia się globalny ośrodek hamujący, który hamując aktywności wszystkich oscylatorów sieci doprowadza do sytuacji, w której żadna inna grupa oscylatorowa nie zdoła przekroczyć wartości progowej pozwalającej uzyskać fazę aktywacji. Dopiero w momencie gdy aktywna grupa oscylatorowa powróci ponownie do fazy uśpienia, globalny ośrodek hamujący również przestanie odpowiadać impulsem hamującym i wówczas kolejna grupa oscylatorowa znajdująca się najbliżej wejścia w fazę aktywacji będzie mogła do niej bez przeszkód przejść.

Najogólniej rzecz ujmując działanie sieci LEGION sprowadza się do lokalnej współpracy pomiędzy oscylatorami pobudzonymi przez ten sam bodziec zewnętrzny oraz globalnego współzawodnictwa o osiągnięcie fazy aktywacji pomiędzy grupami oscylatorowymi i globalnym ośrodkiem hamującym.

1.2. Matematyczny model działania oscylatora

W najprostszym przypadku, działanie pojedynczego oscylatora i sieci LEGION definiuje się przy pomocy układu dwóch równań różniczkowych pierwszego rzędu określających zmianę pobudzenia oraz tłumienia oscylatora w czasie:

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = 3x_i - x_i^3 + 2 - y_i + r + I_i + S_i \\ \frac{dy_i}{dt} = e \left[g \left(1 + \tanh \left(\frac{x_i}{b} \right) \right) - y_i \right] \end{cases} \quad (1)$$

W powyższym układzie równań różniczkowych przyjęto następujące oznaczenia:

- x_i - wartość pobudzenia oscylatora,
- y_i - wartość tłumienia oscylatora,
- r - amplituda szumu Gaussowskiego wykorzystywana do testów na odporność sieci wobec szumów pojawiających się w strumieniu wejściowym,
- I_i - zewnętrzna stymulacja oscylatora wywoływana przez określony bodziec,

- S_i - wewnętrzna stymulacja oscylatora wywoływana przez aktywności bezpośrednio połączonych z nim oscylatorów oraz impuls hamujący globalnego ośrodka hamującego,
- e - stała wartość skalująca (dowolnie mała) wpływająca na zachowanie modelowanego oscylatora – standardowo przyjmuje się wartość 0.02, która najlepiej odwzorowuje zachowanie wspomnianego wcześniej oscylatora relaksacyjnego,
- g - stała wartość wpływająca na względną długość czasu trwania fazy aktywacji oscylatora,
- b - stała wartość wpływająca na stromość sigmoidy.

Jak widać zmiana pobudzenia oraz tłumienia oscylatora w czasie całkowicie nie zależy od czasu funkcjonowania oscylatora, tylko i wyłącznie od jego stanu definiowanego przez wartość pobudzenia oraz wartość tłumienia. Powyższy układ równań pozwala tym samym w sposób jednoznaczny opisać zachowanie każdego oscylatora w dowolnym okresie czasu poczynając od dowolnego stanu początkowego.

Wewnętrzna stymulacja oscylatora określona jest jako:

$$S_i = \sum_{k \in N(i)} W_{ik} S_{\infty}(x_k, q_x) - W_z S_{\infty}(z, q_{xz}) \quad (2)$$

gdzie

$$S_{\infty}(x, q) = \frac{1}{1 + e^{-K(x-q)}} \quad (3)$$

W powyższych równaniach przyjęto następujące oznaczenia:

- $N(i)$ - zbiór oscylatorów, z którymi oscylator i jest bezpośrednio połączony,
- W_{ik} - waga połączenia (synaptycznego) pomiędzy oscylatorem i oraz oscylatorem k ,
- q - stała wartość progowa wyznaczająca dolny próg wartości aktywacji sąsiedniego oscylatora, od którego pobudzenie x tego oscylatora bezpośrednio wpływa na analizowany oscylator i ,
- W_z - waga połączenia z globalnym ośrodkiem hamującym,
- z - wartość impulsu hamującego globalnego ośrodka hamującego,
- K - stała wartość dodatnia określająca stromość sigmoidy.

Zmiana wartości impulsu hamującego globalnego ośrodka hamującego w zależności od czasu definiowana jest jako:

$$\frac{dz}{dt} = f(s_{\infty} - z) \quad (4)$$

gdzie f jest dowolną stałą wartością skalującą (najczęściej 3.0) oraz

$$S_{\infty} = \begin{cases} 0 & \forall_{i=1,\dots,n} x_i < q_{zx} \\ 1 & \exists_{i=1,\dots,n} x_i \geq q_{zx} \end{cases} \quad (5)$$

Powyższy model matematyczny opisany przez zależności (1)-(5) w pełni opisuje działanie pojedynczego oscylatora. Warto zatem podsumować sobie sens kryjący się pod tymi równaniami.

Jeżeli w równaniu (z układu równań (1)) opisującym zmianę pobudzenia oscylatora względem czasu wartość stymulacji zewnętrznej I_i wywoływanej przez zewnętrzny bodziec przyjmuje wartość dodatnią, to wówczas analizowany oscylator cyklicznie uzyskuje jednoznacznie określone stany – przechodzi przez fazę aktywacji oraz fazę uśpienia. W przeciwnym przypadku, gdy wartość stymulacji zewnętrznej I_i jest ujemna, oscylator przez cały czas działania sieci pozostaje nieaktywny. Zjawisko stymulacji wewnętrznej opisane przez równania (2) i (3) zapewnia z kolei doprowadzanie do synchronizacji pomiędzy oscylatorami pobudzonymi przez ten sam bodziec zewnętrzny wraz z desynchronizacją grup oscylatorowych pobudzanych przez różne bodźce. Aktywność wybranego oscylatora sieci wpływa na sąsiednie oscylatory tylko i wyłącznie po przekroczeniu ustalonej wartości progowej q_x – zapewnia to równanie (3), w którym stałą wartość K ustala się najczęściej na 50, co skutkuje uzyskaniem bardzo stromej sigmoidy. Duża stromość sigmoidy powoduje natomiast sytuację, w której wartość funkcji S_{∞} w najbliższym sąsiedztwie ustalonej wartości progowej q przyjmuje wszystkie możliwe wartości jej przeciwdziedziny. Pozostałe równania (4) oraz (5) modelują zachowanie ostatniego istotnego elementu sieci – globalnego ośrodka hamującego. Aktywność globalnego ośrodka hamującego opisywana jest przez wartość z przedziału $[0;1]$. Jak widać zmiana aktywności tego ośrodka w czasie zależy w znacznej mierze od wartości S_{∞} . Jeżeli żaden oscylator sieci nie wykazuje aktywności większej bądź równej ustalonej wartości progowej q_{zx} ,

co oznacza, że $S_{\infty} = 0$, to $\frac{dz}{dt} < 0$, a więc aktywność globalnego ośrodka hamującego spada ($z \rightarrow 0$), a tym samym znajduje się poniżej wartości progowej q_{zx} i nie wpływa impulsem hamującym na żaden oscylator sieci. Natomiast w sytuacji gdy co najmniej jeden oscylator sieci wykaże się pobudzeniem przekraczającym wyznaczoną wartość progową q_{zx} , to $\frac{dz}{dt} > 0$,

ponieważ $s_\infty = 1$, a więc aktywność globalnego ośrodka hamującego rośnie ($z \rightarrow 1$) i po przekroczeniu wartości progowej q_{xz} zaczyna wpływać impulsem hamującym na wszystkie oscylatory sieci.

Reasumując, kiedy pewien oscylator sieci znajduje się w fazie aktywacji, to stymuluje on wewnętrznie wszystkie sąsiadujące z nim oscylatory i jeżeli są one jednocześnie stymulowane zewnętrznie przez identyczny bodziec zewnętrzny, to osiągają również fazę aktywacji i propagują swoje pobudzenie kolejnym oscylatorom. Z drugiej jednak strony faza aktywacji co najmniej jednego oscylatora wywołuje aktywację globalnego ośrodka hamującego, który działa hamująco na wszystkie oscylatory sieci. Powstały impuls hamujący znacząco utrudnia wejście w fazę aktywacji tych oscylatorów, które znajdują się jeszcze w fazie uśpienia i jednocześnie nie tłumi tak mocno oscylatorów będących już w fazie aktywacji, tzn. impuls ten nie powoduje gwałtownego wybicia oscylatorów z tej fazy. Ostatecznie okazuje się, że praktyczne stosowanie zamodelowanego w ten sposób zjawiska działania sieci LEGION pozwala uzyskiwać w krótkim czasie stabilizację cykliczną. Sieć oscylatorowa dochodzi do pełnej desynchronizacji pomiędzy różnymi grupami oscylatorowymi z jednoczesną synchronizacją oscylatorów w ramach każdej grupy oscylatorowej.

1.3. Analiza matematycznego modelu działania oscylatora

W celu lepszego zobrazowania zależności wynikających z wyprowadzonych w poprzednim podrozdziale równań (1)-(5), pomocnym staje się m.in. analiza portretu fazowego oraz kształtu izoklin dla układu dwóch równań różniczkowych (1) jak również analiza wykresu funkcji dla równania (3). Portret fazowy układu dwóch równań różniczkowych (1) jest zależnością między x_i i y_i przedstawioną w układzie współrzędnych $(x_i, y_i) \in R^2$ wraz ze strzałkami obrazującymi kierunek zmian obu zmiennych z upływem czasu. Pojedynczą krzywą, która zakreśla rozwiązanie w tym układzie współrzędnych nazywa się orbitą. Izokliny układu równań różniczkowych są krzywymi potencjalnych ekstremów – izoklina zmiennej x_i jest krzywą potencjalnych ekstremów rozwiązań traktowanych jako funkcje $x_i(y_i)$ i analogicznie izoklina zmiennej y_i jest krzywą potencjalnych ekstremów rozwiązań traktowanych jako funkcje $y_i(x_i)$. Izokliny określone są przez równania $\frac{dx_i}{dt} = 0$ oraz $\frac{dy_i}{dt} = 0$ i dzielą one płaszczyznę R^2 na obszary, w których $\frac{dx_i}{dt}$ oraz $\frac{dy_i}{dt}$

mają ustalony znak, a więc zmienne x_i i y_i są odpowiednio rosnące lub malejące. Dzięki temu można wyznaczyć kierunki zmian zmiennych wraz z upływem czasu i odpowiednio nanieść je strzałkami na portrecie fazowym. Przecięcia izoklin dwóch różnych zmiennych wyznaczają rozwiązania stacjonarne (punkty krytyczne przestrzeni fazowej).

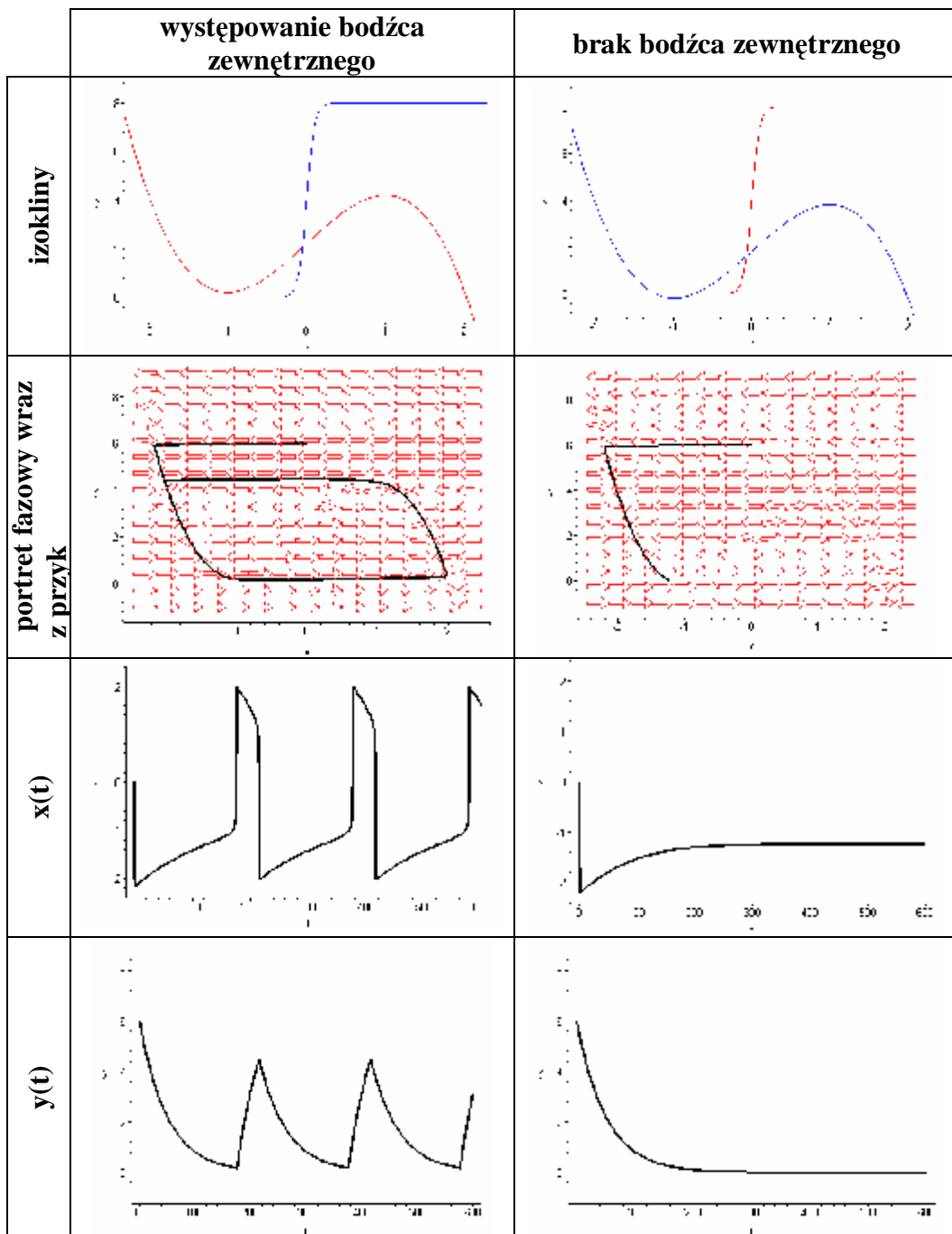
Przedstawione wyżej elementarne pojęcia z zakresu równań różniczkowych posłużą do dalszej analizy wpływu wartości parametrów na zachowania modelowane przez układ równań (1). Aby początkowo przeanalizować działanie pojedynczego oscylatora, założono, że $S_i = 0$ oraz $r = 0.02$.

W pierwszej kolejności zbadany zostanie wpływ wartości stymulacji zewnętrznej I_i - w tym celu ustalono wartości pozostałych parametrów: $e = 0.02$, $g = 4.0$ oraz $b = 0.1$. Założono dodatkowo, że wartość stymulacji zewnętrznej $I_i = 0.2$ pojawia się w wyniku wystąpienia bodźca zewnętrznego, natomiast $I_i = -0.2$ pojawia się w przypadku jego braku.

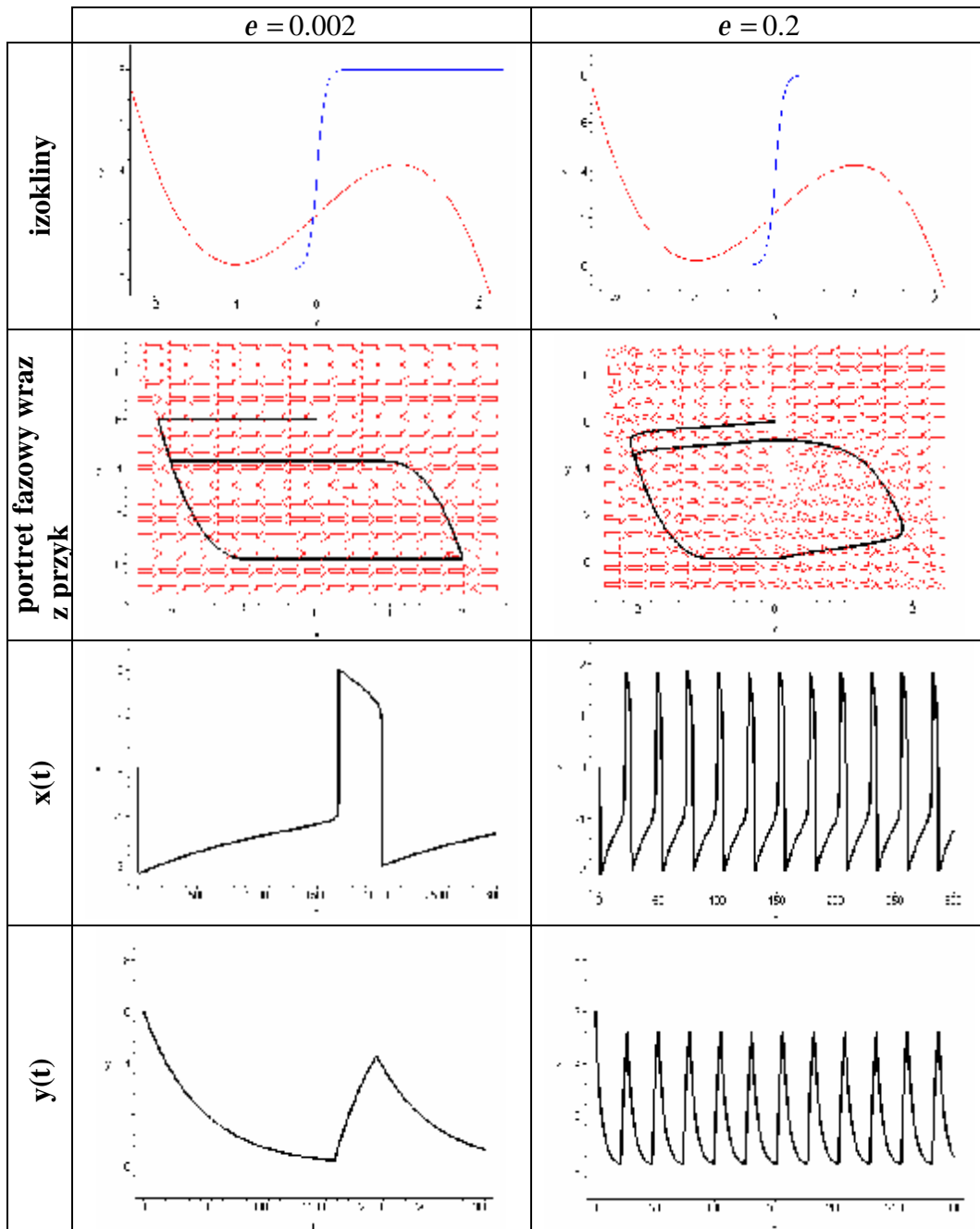
W poniższej tabeli zestawiono ze sobą każdy typ wykresu dla każdej stymulacji zewnętrznej. Jak doskonale widać występowanie bodźca zewnętrznego w znaczny sposób wpływa na działanie oscylatora. Jego pobudzenie $x(t)$ zmienia się cyklicznie uzyskując wielokrotnie fazę aktywacji (gwałtowny wzrost wykresu funkcji) oraz fazę uśpienia (gwałtowny spadek wykresu i następujący po nim łagodny wzrost). Wraz ze zmianą pobudzenia oscylatora zmienia się również cyklicznie jego tłumienie $y(t)$.

Na portrecie fazowym umieszczono przykładową orbitę wychodzącą z losowo wybranego stanu początkowego oscylatora: $x(0)=0$ i $y(0)=6$ - co widać również na wykresach $x(t)$ oraz $y(t)$. Okazuje się, że w bardzo krótkim czasie (z dowolnego stanu początkowego) oscylator wpada w ścieżkę cykliczną. Jeżeli w tym momencie wartość stymulacji zewnętrznej jest dodatnia, a więc izokliny nie przecinają się na tej ścieżce, oscylator wpada w nieskończone oscylacje. W przeciwnym przypadku, jeśli wartość stymulacji zewnętrznej jest ujemna, a więc izokliny przecinają się na ścieżce cyklicznej, działanie oscylatora kończy się w stanie nieaktywnym, który jest punktem przecięcia tych izoklin.

występowanie bodźca zewnętrznego	brak bodźca zewnętrznego
---	---------------------------------



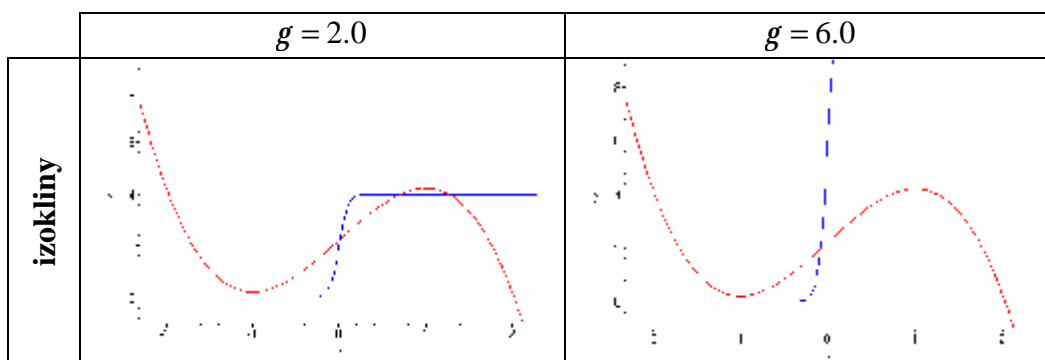
Zakładając teraz, że oscylator jest stymulowany zewnątrz przez $I_i = 0.2$, przeanalizowany zostanie wpływ parametru e na zachowanie modelowanego oscylatora. Korzystając z ustalonych wcześniej wartości pozostałych parametrów zbadano wartości $e = 0.002$ oraz $e = 0.2$.

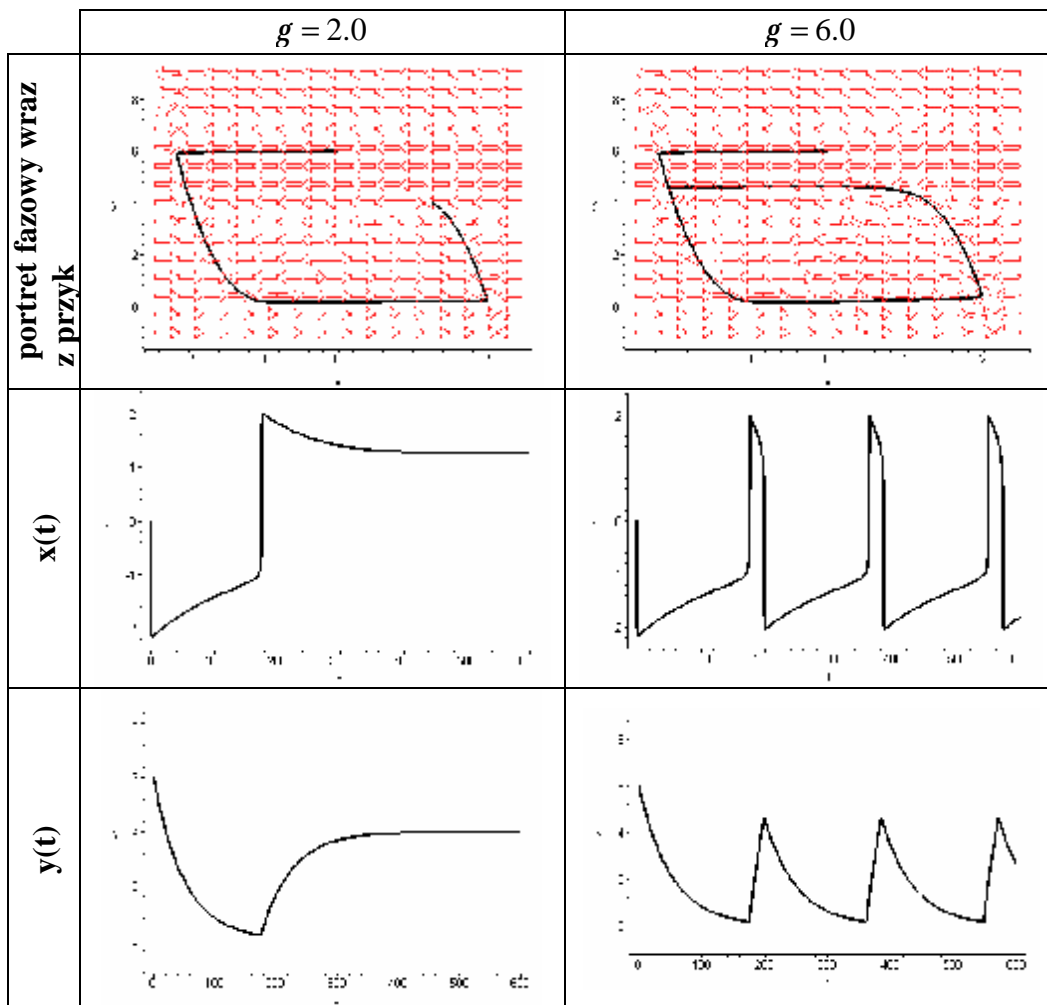


Jak widać zmiana wartości e w żaden sposób nie wpływa na zmianę wyznaczonych wcześniej izoklin. Zmienia się natomiast portret fazowy wraz z kształtem przykładowej orbity. Okazuje się, że wzrost tego parametru skutkuje zwiększeniem dynamiki oscylatora, co jednocześnie oznacza, że w bardzo szybkim tempie przechodzi on pomiędzy fazą aktywacji oraz fazą uśpienia. Mała wartość e znacznie wydłuża względny czas przebywania oscylatora w obu fazach.

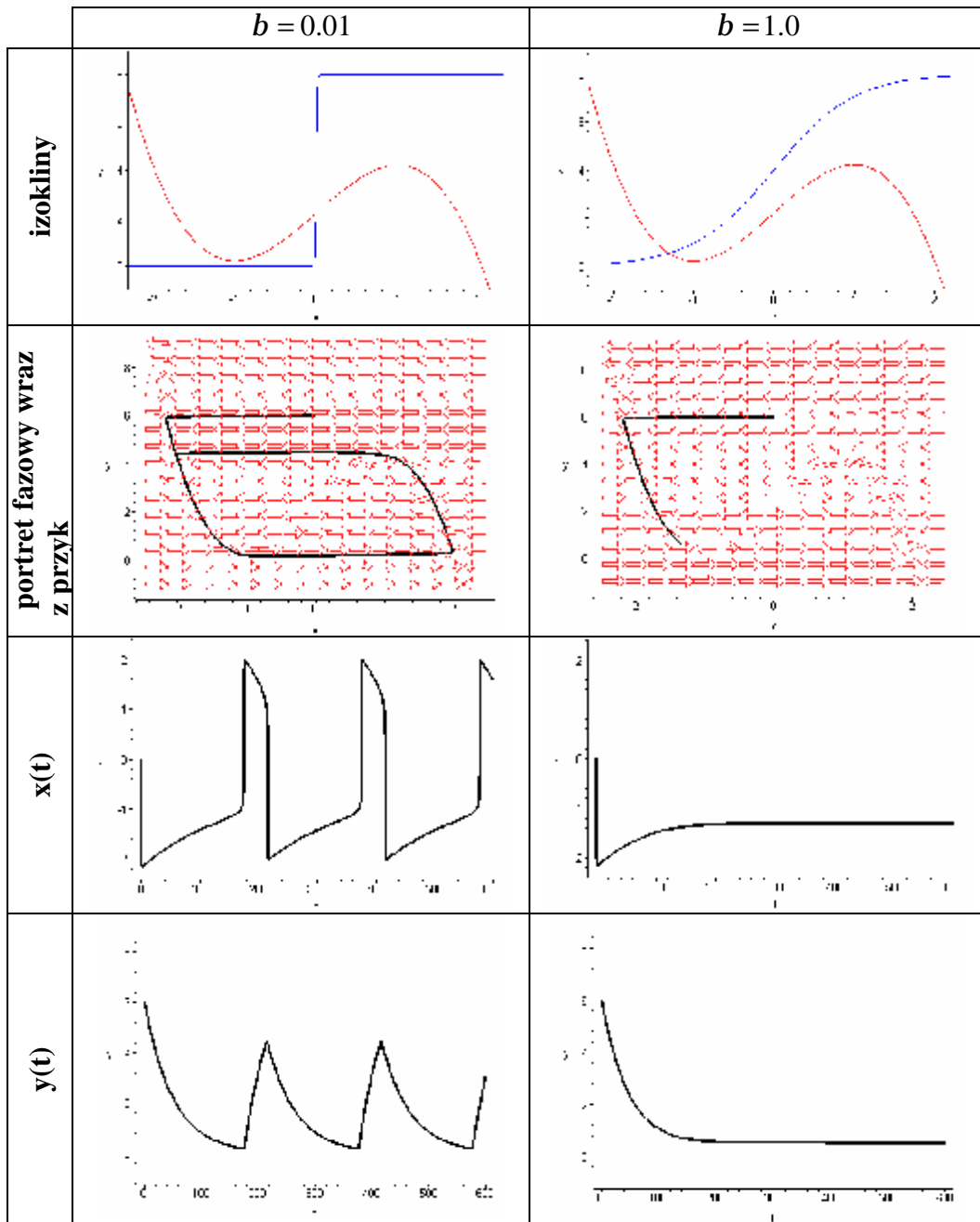
Kolejnym parametrem podlegającym analizie jest wartość g . Ponownie zakładając, że oscylator jest stymulowany zewnątrz przez $I_i = 0.2$, a także korzystając z ustalonych we wstępie wartości pozostałych parametrów zbadane zostaną wartości $g = 2.0$ oraz $g = 6.0$.

W poniższej tabeli zestawiono wykresy każdego typu dla każdej wartości g . Łatwo zauważyć, że wartość parametru g znacząco wpływa na kształt izokliny y (wykres koloru niebieskiego), według której wyznaczany jest nieco różniący się portret fazowy. Okazuje się, że większa wartość parametru g wyznacza względnie krótszy czas przebywania oscylatora w fazie aktywacji. Należy przy tym zwrócić uwagę, że wartość tego parametru musi zostać ustalona na tyle rozsądnie, aby nie doszło do sytuacji mającej miejsce w przypadku $g = 2.0$, w którym obie izokliny przecinają się na ścieżce cyklicznej w trakcie fazy aktywacji oscylatora. Jest to oczywiście sytuacja nie pożądana ze względu na to, iż dobrze zamodelowany oscylator powinien osiągać stabilizację stanu jedynie podczas fazy uśpienia i braku stymulacji zewnętrznej.



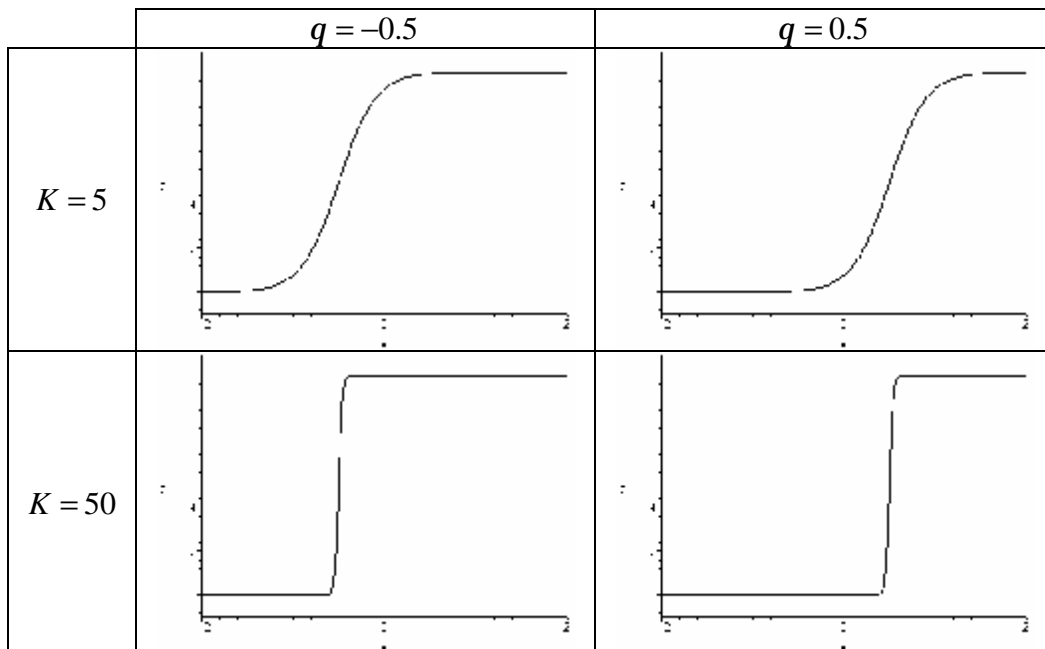


Ostatnim równie znaczącym parametrem układu równań (1) jest b . Ponownie zakładając, że oscylator jest stymulowany zewnątrznie przez $I_i = 0.2$, a także korzystając z ustalonych we wstępie wartości pozostałych parametrów zbadane zostaną wartości $b = 0.01$ oraz $b = 1.0$.



Z powyższych wykresów można wywnioskować, że o ile zmiana wartości parametru b wpływa na stromość sigmoidy, to do pewnego momentu nie wpływa ona znacząco na resztę zależności. Dopiero zbytne spłaszczenie sigmoidy doprowadza do niepożądanego stanu, w którym oscylator stymulowany przez bodziec zewnętrzny nie jest w stanie uzyskać fazy aktywacji. Przez cały czas działania sieci pozostaje nieaktywny – izokliny przecinają się na ścieżce cyklicznej, w związku z czym stan oscylatora po krótkim czasie się stabilizuje.

Na koniec przeanalizowane zostaną jeszcze tylko dwa parametry równania (3) będącego pewnego rodzaju funkcją aktywacji oscylatora.

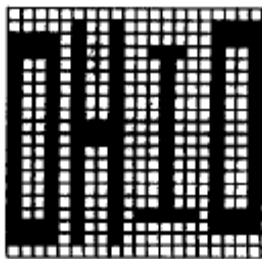


Zgodnie z tym co już zostało omówione w poprzednim podrozdziale można zaobserwować, że większa wartość parametru K zwiększa stromość sigmoidy, natomiast wartość parametru q wyznacza pewną wartość progową w sąsiedztwie której następuje gwałtowny skok wartości funkcji z 0 do 1.

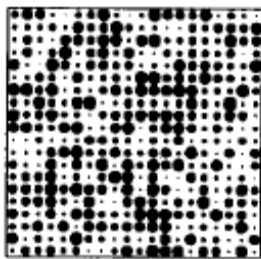
2. Przykłady wykorzystania sieci LEGION

2.1. Segmentacja testowego obrazu binarnego

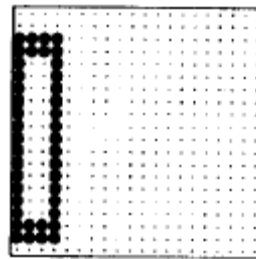
W pracy DeLiang Wanga oraz Davida Termana [1] zilustrowano wykorzystanie sieci LEGION w segmentacji obrazu binarnego. Dla obrazu o rozmiarze 20×20 skonstruowano dwuwymiarową sieć LEGION. W obrazie zestawiono cztery nie połączone ze sobą obiekty reprezentujące kolejno wielkie litery 'O', 'H', 'I', 'O'. Każdy oscylator pobudzany przez zewnętrzny bodziec (zapalony piksel) odbierał sygnał zewnętrzny $I = 0.2$. W przypadku braku tego bodźca (zgaszony piksel) oscylator odbierał sygnał $I = -0.02$. Współczynnik szumu Gaussowskiego ustalono na $r = 0.02$. Układ równań różniczkowych (1) rozwiązywano numerycznie dla następujących wartości parametrów: $e = 0.02$, $g = 6.0$, $b = 0.1$, $K = 50$, $q_x = -0.5$, $q_{xz} = q_{zx} = 0.1$ oraz $f = 3.0$. Wszystkie oscylatory sieci rozpoczęły działanie od losowego stanu początkowego.



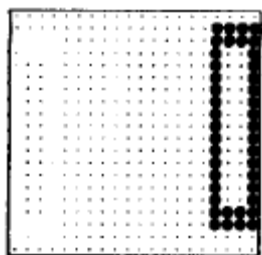
Rysunek 3. Obraz binarny złożony z czterech różnych obiektów podłączony do sieci LEGION



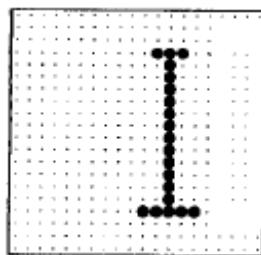
Rysunek 4. Migawka aktywności oscylatorów sieci w stanie początkowym



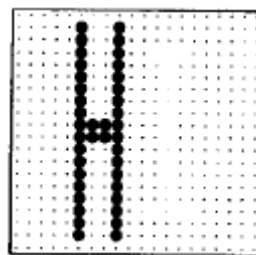
Rysunek 5. Migawka aktywności oscylatorów sieci chwilę po rozpoczęciu działania



Rysunek 6. Migawka aktywności oscylatorów sieci chwilę po migawce z Rysunku 5.

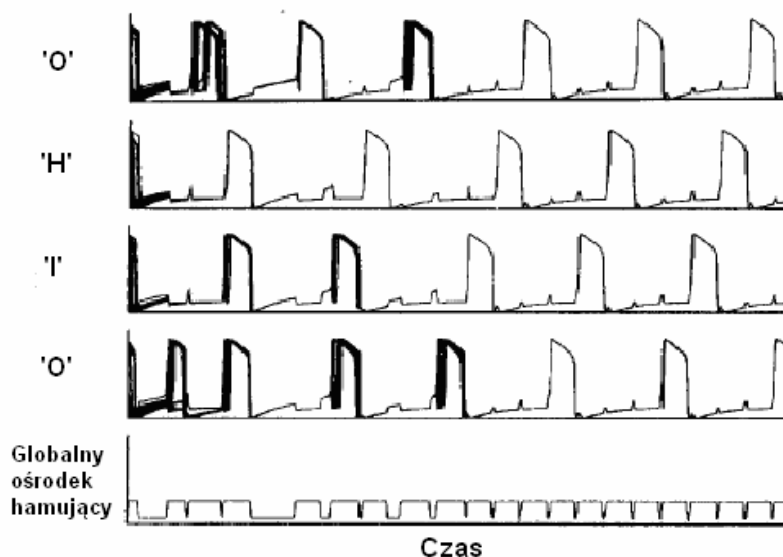


Rysunek 7. Migawka aktywności oscylatorów sieci chwilę po migawce z Rysunku 6.



Rysunek 8. Migawka aktywności oscylatorów sieci chwilę po migawce z Rysunku 7.

Rysunki 4-8. przedstawiają migawki aktywności oscylatorów sieci w kolejnych chwilach czasu jej działania. Średnica każdego czarnego kółka przedstawia wprost proporcjonalnie pobudzenie x odpowiedniego oscylatora. Zależność tę najlepiej widać na Rysunku 4. (w losowym stanie początkowym sieci), w którym znajdują się różnej wielkości koła reprezentujące różnej wielkości pobudzenia oscylatorów. Powyższy przykład doskonale prezentuje efekt grupowania obiektów wywołany przez synchronizację oscylatorów wewnątrz grupy oscylatorowej oraz desynchronizację wszystkich grup oscylatorowych. Najwcześniej została wyodrębniona pierwsza litera 'O' (Rysunek 5.). Jak widać wszystkie oscylatory połączone ze sobą i pobudzone przez ten sam zewnętrzny bodziec zsynchronizowały się w sensie jednoczesnego uzyskania fazy aktywacji podczas gdy reszta oscylatorów znalazła się w fazie uśpienia. W następnej kolejności została wyodrębniona druga litera 'O' (Rysunek 6.). Nie występuje tu przy tym żaden determinizm wyznaczania tej samej kolejności obiektów za każdym uruchomieniem sieci. W tym przypadku zdarzyło się właśnie tak, jednakże w zupełnie innym jako druga mogłaby zostać wyodrębniona litera 'H'. Niemniej jednak w analizowanym doświadczeniu cykl wyodrębniania obiektów przez zamodelowaną sieć LEGION pozostaje niezmienny. Rysunek 9. doskonale przedstawia cykliczną własność aktywności wydzielonych grup oscylatorowych.

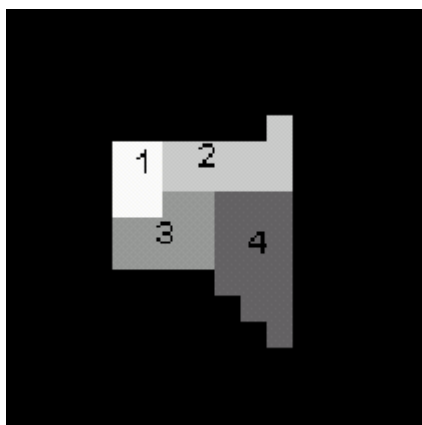


Rysunek 9. Zmiana aktywności grup oscylatorowych pobudzanych przez bodźce zewnętrzne wraz ze zmianą aktywności globalnego ośrodka hamującego w czasie.

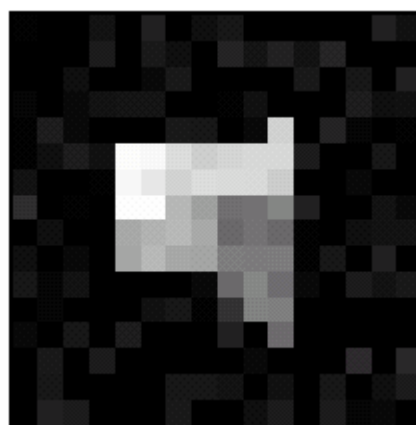
Łatwo zauważyć, że na początku działania sieci aktywności grup oscylatorowych nachodziły na siebie. Przyczyną tego zjawiska był brak desynchronizacji pomiędzy tymi grupami wynikający z losowego stanu początkowego sieci. Na szczęście po krótkim okresie czasu, za sprawą globalnego ośrodka hamującego, dochodzi do oczekiwanej desynchronizacji.

2.2. Segmentacja testowego obrazu w 8-bitowych odcieniach szarości

W pracy Michała Strzeleckiego [2] zilustrowano wykorzystanie sieci LEGION w segmentacji obrazu o rozmiarze 16x16, w którym każdy piksel przyjmował jedną z 8-bitowych wartości reprezentujących odpowiedni odcień szarości. Obraz składał się z czterech obiektów rozróżnianych po swym odcieniu (Rysunek 10.). Aby utrudnić nieco zadanie segmentacji, na obraz nałożono dodatkowo szum Gaussowski (Rysunek 11.).

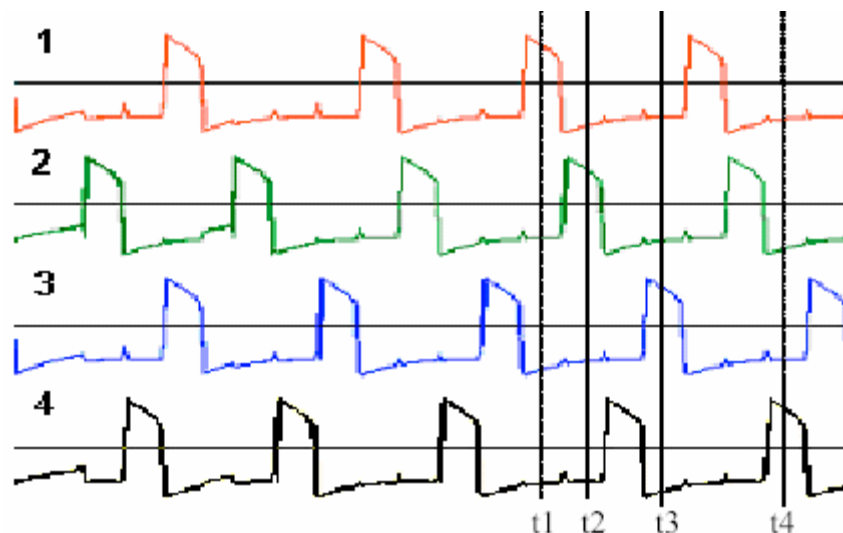


Rysunek 10. Obraz w 8-bitowych odcieniach szarości z wyodrębnionymi obiektami.

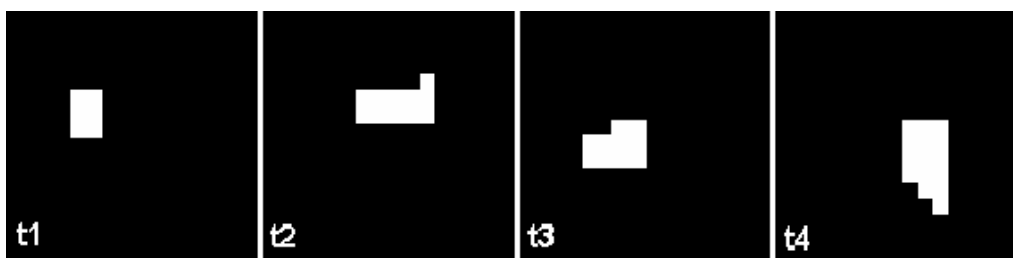


Rysunek 11. Obraz z Rysunku 10. poddany szumowi Gaussowskiemu.

Nie wnikając w szczegóły algorytmiczne, które zostały opisane w [2], poniżej zestawiono wyniki działania zastosowanej sieci LEGION (Rysunek 12. i Rysunek 13.). Jak widać wykresy określające aktywności grup oscylatorowych w różnych chwilach czasu wykazują początkowy brak desynchronizacji sieci - faza aktywacji grupy oscylatorowej reprezentującej obiekt 3. pokrywa się z fazą aktywacji grupy oscylatorowej reprezentującej obiekt 1. Jednakże już po krótkim czasie działania sieci dochodzi do stabilizacji cyklicznej wynikającej z pełnej desynchronizacji pomiędzy różnymi grupami oscylatorowymi. Na wykresach z Rysunku 12. zaznaczono pionowymi liniami chwile t_1 , t_2 , t_3 oraz t_4 , w których wykonano migawki aktywności oscylatorów sieci przedstawione na Rysunku 13.



Rysunek 12. Zmiana aktywności grup oscylatorowych reprezentujących wyróżnione obiekty.



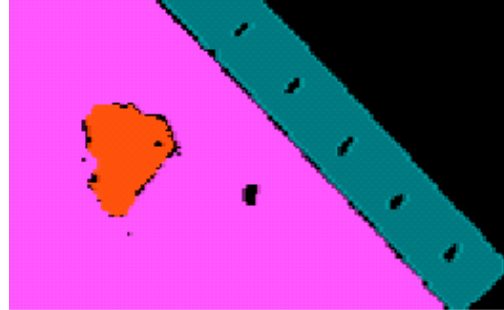
Rysunek 13. Migawki aktywności oscylatorów sieci w wyznaczonych na Rysunku 12. chwilach t1, t2, t3 oraz t4.

2.3. Segmentacja prawdziwego zdjęcia w 8-bitowych odcieniach szarości

W pracy Michała Strzeleckiego [2] zaprezentowano również zastosowanie sieci LEGION w segmentacji obiektów na prawdziwych zdjęciach biomedycznych. Rysunek 14. przedstawia zdjęcie (168x104 z 8-bitowymi odcieniami szarości) ropnia skórno umieszczonego po wewnętrznej stronie dłoni wraz ze standardową miarką służącą do mierzenia wielkości ropnia. Wykorzystanie odpowiednio zaprojektowanej sieci LEGION pozwoliło wyodrębnić kilka wyróżniających się obiektów (Rysunek 15.).

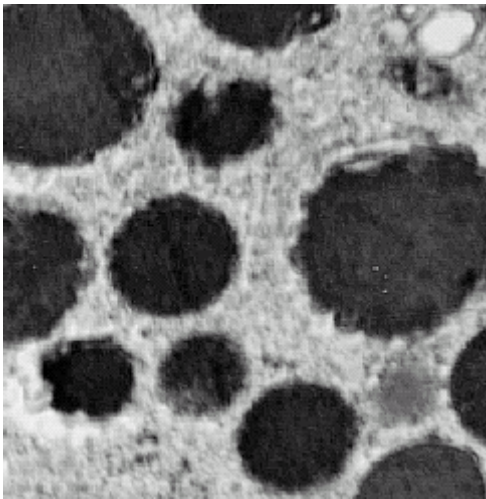


Rysunek 14. Zdjęcie ropnia skórny.

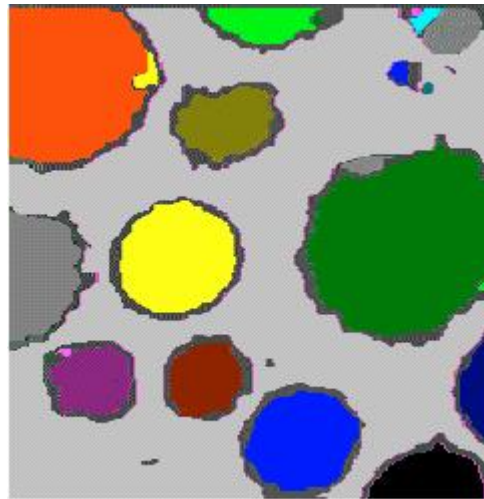


Rysunek 15. Wyniki segmentacji zdjęcia ropnia skórny przy wykorzystaniu sieci LEGION

Kolejnym ciekawym przykładem jest segmentacja zdjęcia komórki skórnej (221x226 z 8-bitowymi odcieniami szarości) – Rysunek 16. oraz Rysunek 17.



Rysunek 16. Zdjęcie komórki skórnej.



Rysunek 17. Wyniki segmentacji zdjęcia komórki skórnej przy wykorzystaniu sieci LEGION

2.4. Segmentacja zdjęć tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego

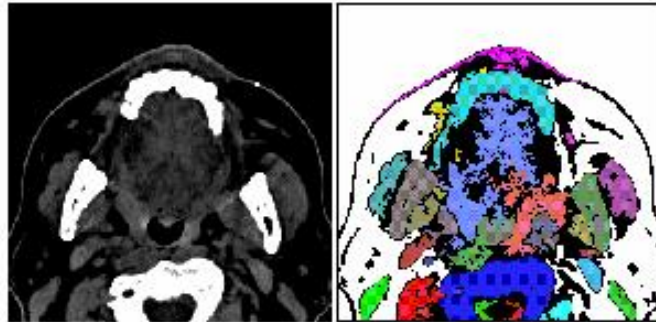
W pracy Naeema Shareefa [3] omówiono i zaprezentowano bardzo konkretne przykłady zastosowania sieci LEGION w zadaniu segmentacji zdjęć tomografii komputerowej oraz rezonansu magnetycznego. W niniejszym podrozdziale wyniki działania tych sieci zestawiono jedynie na rysunkach 18.-22.

Rysunek 18. przedstawia oryginalne czarno-białe zdjęcie 256x256 tomografii komputerowej szczęki (kolor biały wyznacza kości) oraz wyniki wyodrębnienia 42 obszarów przy pomocy dwuwymiarowej sieci LEGION, w której każdy oscylator połączono z 24 najbliższymi sąsiadami.

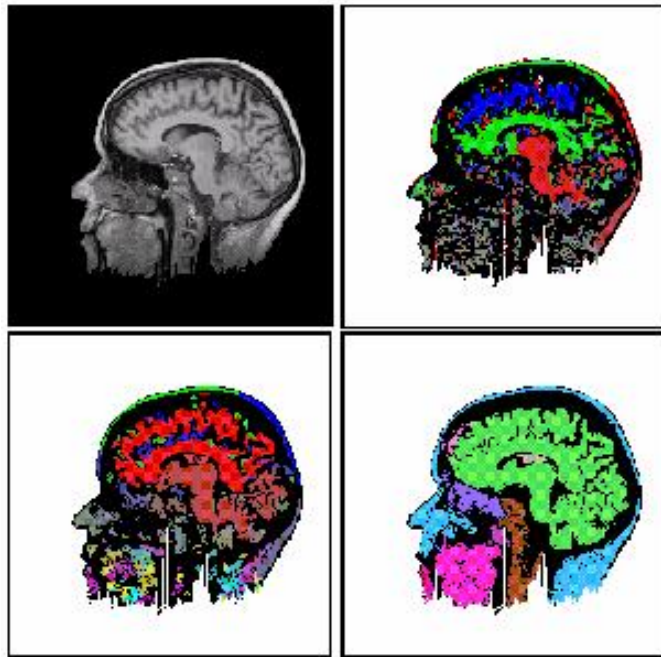
Rysunek 19. przedstawia oryginalne czarno-białe zdjęcie 256x256 rezonansu magnetycznego głowy oraz wyniki segmentacji przy zastosowaniu sieci LEGION z różnymi liczbami połączeń z najbliższymi sąsiadami każdego oscylatora. Prawy-górny rysunek przedstawia wynik wyodrębnienia 470 obszarów przez sieć z 4 najbliższymi sąsiadami, lewy-dolny – wynik wyodrębnienia 146 obszarów przez sieć z 6 najbliższymi sąsiadami, prawy-dolny – wynik wyodrębnienia 10 obszarów przez sieć z 24 najbliższymi sąsiadami. Jak widać najlepszy poziom szczegółowości wyselekcjonowanych obiektów uzyskano w przypadku ostatniej sieci: mózg, obszar nosowy, jama gębowa. Okazuje się, że wraz ze wzrostem liczby połączeń z najbliższymi sąsiadami maleje dokładność wyodrębnianych obiektów, tzn. rozpoznawane są one jako coraz większe obszary.

Rysunek 20. przedstawia oryginalne czarno-białe zdjęcie 256x256 rezonansu magnetycznego górnej części głowy (widoczny jest m.in. mózg i oczy) oraz wyniki segmentacji przy zastosowaniu sieci LEGION z różnymi wartościami progowymi wyznaczającymi podobieństwo intensywności pikseli (bodźców zewnętrznych oscylatorów). W każdym przypadku wykorzystano sieć z 24 najbliższymi sąsiadami.

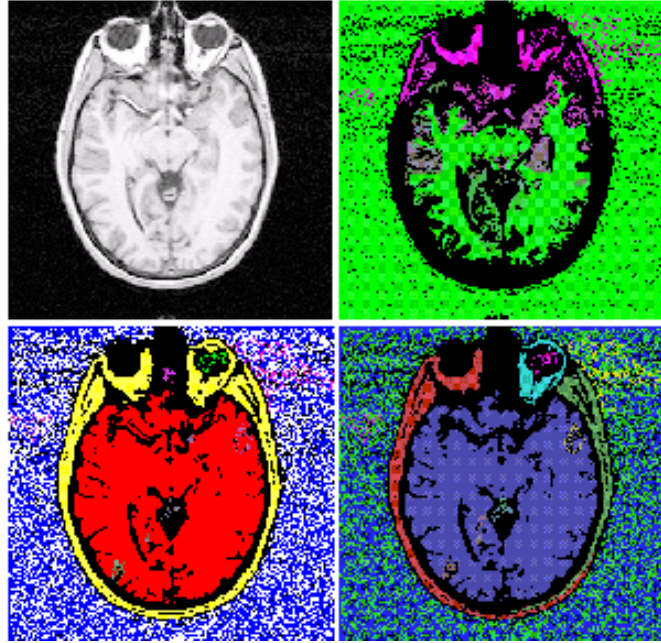
Rysunek 21. przedstawia oryginalne zdjęcie rezonansu magnetycznego przekroju poprzecznego głowy oraz zestawienie wyników segmentacji ręcznej z wynikami segmentacji przy wykorzystaniu sieci LEGION. Rysunek 22. przedstawia dodatkowo trójwymiarową wizualizację uzyskanych wyników.



Rysunek 18. Oryginalne zdjęcie tomografii komputerowej szczęki (z lewej) oraz wyniki segmentacji przy pomocy sieci LEGION (z prawej).



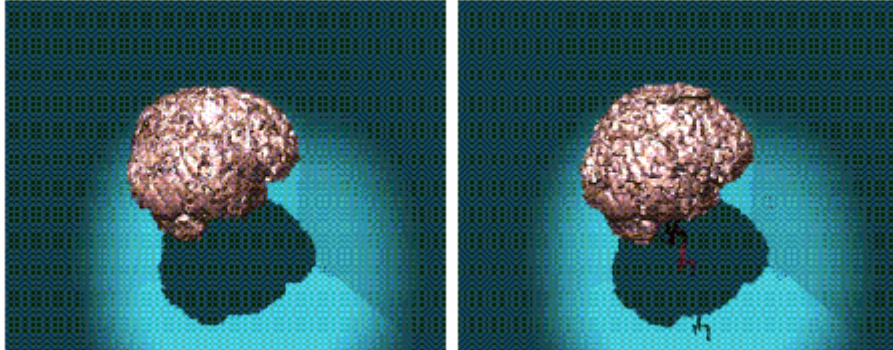
Rysunek 19. Oryginalne zdjęcie rezonansu magnetycznego głowy (lewy-górny obrazek) wraz z wynikami segmentacji przy pomocy sieci LEGION z różną liczebnością sąsiadów oscylatora.



Rysunek 20. Oryginalne zdjęcie rezonansu magnetycznego górnej części głowy (lewy-górny obrazek) wraz z wynikami segmentacji przy pomocy sieci LEGION z różnymi wartościami progującymi.



Rysunek 21. Oryginalne zdjęcie rezonansu magnetycznego przekroju głowy (z lewej) wraz z wynikami segmentacji przy pomocy sieci LEGION (w środku) oraz wynikami segmentacji ręcznej (z prawej).



Rysunek 22. Graficzna wizualizacja wyników segmentacji przy pomocy sieci LEGION (z lewej) oraz wyników segmentacji ręcznej (z prawej).

Literatura

- [1] DeLiang Wang, David Terman. *Locally Excitatory Globally Inhibitory Oscillator Networks*, IEEE Transactions On Neural Networks, vol. 6, no. 1, January 1995, pp. 283-286.
- [2] Michał Strzelecki. *Image Segmentation Based on Network of Synchronised Oscillators*, Proc. of International Conference on Signals and Electronics Systems, 18-21 September 2001, Łódź, Poland, pp. 105-110.
- [3] Naeem Shareef. *Segmentation of MRI and CT Data Using Locally Excitatory Globally Inhibitory Oscillator Networks*, The Seventh Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference, April 26-28, 1996.