

**DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU
ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ im. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

zapraszają na

PUBLICZNĄ DYSKUSJĘ NAD ROZPRAWĄ DOKTORSKĄ

mgra inż. Tomasza Grabowskiego

która odbędzie się 21.04.2010 r. o godz. 13:00 w budynku B-1, sala 04
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Temat rozprawy doktorskiej:

„Zastosowanie metody wykresów rekurencyjnych do analizy danych pomiarowych”

Promotor: prof. dr hab. inż. Maciej Ogorzałek – Akademia Górniczo-Hutnicza

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Stanisław Osowski – Politechnika Warszawska

prof. dr hab. inż. Janusz Gajda – Akademia Górniczo-Hutnicza

Z rozprawą doktorską i opiniami recenzentów można się zapoznać w Czytelnicy Biblioteki Głównej AGH w Krakowie, al. Mickiewicza 30.
Elektroniczna wersja autoreferatu rozprawy doktorskiej znajduje się na www.eaie.agh.edu.pl



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE



**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I ELEKTRONIKI**

KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROENERGETYKI

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Zastosowanie metody wykresów rekurencyjnych do analizy danych pomiarowych

mgr inż. Tomasz Grabowski

PROMOTOR: prof. dr hab. inż. Maciej J. Ogorzałek

1. Zagadnienia wstępne

Badania natężenia ruchu pojazdów na drodze wykonywane są od ponad półwiecza. Początkowo miały głównie charakter poglądowy. W dużej mierze wykonywane na zlecenie zainteresowanych podmiotów, polegały często na prostym zliczaniu samochodów przejeżdżających drogą. Dopiero wraz ze wzbogaceniem się społeczeństw i wynikającym z tego wzrostem liczby samochodów poruszających się po drodze, badania zaczęły przybierać formę profesjonalnych opracowań. Wprowadzono wówczas uszczegółowienie pomiarów, koncentrując się na takich danych jak tonaż, długość, liczba osi oraz dokonując pomiaru parametrów ruchu pojazdu – głównie prędkości. W parze z pomiarami zaczęto także wprowadzać podział pojazdów na poszczególne grupy. Stało się to preludium do stosowanych dzisiaj reguł klasyfikacyjnych.

Przedmiotem moich rozważań była analiza natężenia ruchu, wykorzystująca w tym celu metodę wykresów rekurencyjnych. Rozwiązanie to, jako narzędzie graficzne, przeznaczone do analizy danych pomiarowych, zyskało duże grono zwolenników. Metoda ta znalazła zastosowanie m.in. w takich dziedzinach jak: meteorologia, astronomia, matematyka, medycyna, ekonomia, elektronika, fizyka, mechanika, teoria chaosu. Użytkownicy docenili jego liczne zalety, takie jak brak skomplikowanych obliczeń, zbiór rozwiązań pochodzący z czytelnej dwuwymiarowej przestrzeni graficznej, możliwość porównywania sygnału pomiarowego z sygnałem referencyjnym, a w szczególności interdyscyplinarność, pozwalającą wykorzystywać go w szeregu dziedzin naukowych. Cechą charakterystyczną tej metody, bardzo przydatną w procesie analizy dynamiki układów, jest ponadto optyka holistyczna, całościowo ukazująca za pomocą obrazów rekurencyjnych dynamiczną strukturę danych pomiarowych oraz analizująca parametrycznie konkretne powstałe na wykresach struktury.

Pomimo jednak coraz większej popularności, metoda ta nie znalazła dotąd szerszego zastosowania w układach mierzących natężenie ruchu drogowego, ruchu w sieci internetowej i telefonicznej. W celach analitycznych stosowane były bowiem do tej pory najczęściej statystyczne metody parametryczne. Opisując sygnał od strony ilościowej, koncentrowały się na takich cechach jak okresowość, autokorelacja, wariancja sygnału czy stopień jego koherencji. Posiadając więc dane pomiarowe, pochodzące z kilku niezależnych źródeł, a obrazujące natężenie ruchu pojazdów na drodze, postanowiłem wykorzystać metodę wykresów rekurencyjnych do analizy natężenia ruchu samochodowego, a także – jak się później okazało – do

klasyfikacji pojazdów drogowych. Otrzymane tą metodą wyniki i wnioski zestawilem z innymi sygnałami – również opisującymi natężenie ruchu, ale ruchu odmiennego rodzaju: mianowicie ruchu w sieci internetowej i telefonicznej.

Realizując niniejszą pracę, postawiłem przed sobą kilka celów, z których 3 były zasadnicze:

1. Ukazanie użyteczności metody wykresów rekurencyjnych do analizy natężenia ruchu drogowego, na podstawie danych pochodzących z 2 punktów pomiarowych AGH i kilku komercyjnych rozwiązań firmy *TRAXelektronik*.
2. Badanie struktury natężenia ruchu przez pryzmat różnych środowisk pomiarowych, w oparciu o wyniki otrzymane dla natężenia ruchu drogowego oraz natężenia ruchu w sieciach internetowej i telekomunikacyjnej.
3. Ocena skuteczności proponowanej metody analitycznej do badania struktury natężenia ruchu.

W oparciu o licznie przeprowadzone symulacje i badania, pozwoliłem sobie postawić następujące hipotezy dotyczące wykorzystywanej przeze mnie metody:

1. Zastosowanie metody wykresów rekurencyjnych do analizy danych jest możliwe i przynosi interesujące rezultaty.
2. Graficzno-parametryczna metoda wykresów rekurencyjnych jest narzędziem komplementarnym dla metod statystycznych i pozwala z odmienną perspektywę spojrzeć na charakterystyki i właściwości rozważanych danych pomiarowych.
3. Różne rodzaje natężenia ruchu posiadają cechy wspólne, charakterystyczne dla tego rodzaju procesów.

2. Graficzna metoda analizy danych nieliniowych

Analiza trajektorii przestrzeni fazowej jest jedną z podstawowych metod analizy danych pomiarowych, pochodzących z układów nieliniowych. Metoda rekonstrukcji przestrzeni fazowej może być wykorzystana w celu określenia charakterystycznych właściwości dynamiki systemu [3]. W pracy doktorskiej wykorzystałem w tym celu do metodę wykresów rekurencyjnych (*(ang.) Recurrence Plots (RP)*). Została ona zaproponowana w 1987 roku przez J.-P. Eckmanna [1]. Należy nadmienić, że metoda RP jest typowa dla systemów nieliniowych i chaotycznych [4]. Bazuje ona na elementarnej własności deterministycznych systemów dynamicznych, jaką jest ich powtarzalność, rozumiana jako powrót trajektorii układu w pobliże punktu początkowego po jakimś czasie. Narzędzie to daje możliwość wizualizacji dynamiki wielowymiarowej w nowej dwuwymiarowej quasi-przestrzeni.

Definicja wykresu rekurencyjnego /Recurrence Plot (RP)/ [zob. 1]

Niech $x(i)$ będzie i -tym punktem orbity, opisującej system dynamiczny w m -wymiarowej przestrzeni.

$(i, j = 1, \dots, N)$.

Wykres rekurencyjny jest tablicą punktów o wymiarach $N \times N$, gdzie położenie każdego z punktów jest opisane za pomocą współrzędnych (i, j) , ilekroć $x(j)$ jest wystarczająco blisko $x(i)$ (por. poniżej).

W praktyce wykres rekurencyjny jest otrzymywany w oparciu o szeregi czasowe $\{u_i\}$ ($i=1,2,3,\dots, N$).

Proces tworzenia wykresów rekurencyjnych oparty jest na prostej trzyetapowej regule.

1. **Rekonstrukcja dynamiki układu na podstawie szeregu pomiarowego**

Wybieramy wymiar zanurzenia m (*embedding dimension*), konstruując m -wymiarową orbitę $x(i)$, w oparciu o metodę opóźnień czasowych. Jeśli u_i są skalarami, to $x(i) = (u_i, u_{i+1}, u_{i+2}, \dots, u_{i+m-1})$.

2. **Wybór rozmiaru otoczenia**

Wybieramy promień otoczenia $r(i)$, zaczepiony w punkcie $x(i)$ w R^m , i w oparciu o niego tworzymy otoczenie (kulę, okrąg, kwadrat – w zależności od rodzaju metryki i wymiarowości przestrzeni), tak, aby wewnątrz niej zawarta była „rozsądna” liczba punktów $x(j)$ orbity. Jeśli oczekiwana liczba punktów, mających znajdować się wewnątrz naszego otoczenia, jest niezrealizowana, należy odpowiednio zwiększyć lub zmniejszyć długość promienia.

3. **Tworzenie wykresu rekurencyjnego**

Tworzymy obraz RP w taki sposób, że rysujemy kropkę w każdym punkcie (i, j) , gdy $x(j)$ jest punktem (trajektorii), znajdującym się wewnątrz kuli o promieniu $r(i)$ i środku w $x(i)$.

Obrazy RP mają tendencje być symetryczne względem diagonal $i=j$. Dzieje się tak, ponieważ jeśli $x(i)$ jest blisko $x(j)$, wówczas $x(j)$ znajduje się blisko $x(i)$. Ponieważ nie ma praktycznej możliwości zrealizowania

całkowitej powtarzalności stanu tak, aby $\vec{x}(i) \equiv \vec{x}(j)$, rekurencja definiowana jest jako stan $\vec{x}(i)$ możliwie bliski $\vec{x}(j)$ [3].

Z matematycznego punktu widzenia proces powracania w przestrzeni jednowymiarowej określany jest wg wzoru (1).

$$RP_{i,j}^{m,r(i)} = \Theta(r(i) - \|x(i) - x(j)\|) \quad x(i), x(j) \in R^m; \quad i, j \in Z^1 \quad (1)$$

gdzie: $i, j = 1, 2, \dots, N$

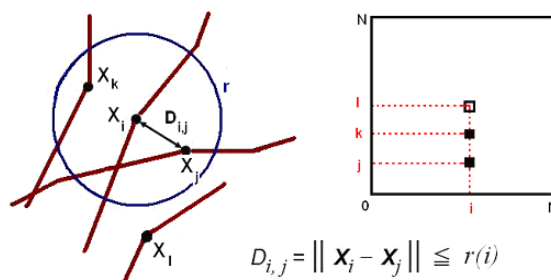
$r(i)$ – odległość graniczna (ε_i)

$\|\cdot\|$ - norma, predefiniowana metryka (np. Euklidesowa, maksymalna, minimalna i in.)

$\Theta(\cdot)$ - funkcja Heaviside'a (2)

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x < 0 \\ 1 & \text{dla } x \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Wartości 0 i 1, realizowane przy pomocy funkcji Heaviside'a, można prosto przedstawić graficznie za pomocą białego i czarnego koloru, jaki przyjmują punkty na wykresie (zob. **Rysunku 1**). Czarne punkty oznaczają tutaj rekurencje, a obie osie są osiami czasu. Poszczególne punkty RP nie zawierają informacji o bieżących stanach dla czasu i i j . Dopiero rozpatrywanie wszystkich punktów pozwala zrekonstruować właściwości analizowanych danych.



Rysunek 1. Technika tworzenia macierzy rekurencji w oparciu o dobór promienia otoczenia $r(i)$.

Jak widać, zarówno odległości D_{ij} , jak i D_{ik} spełniają „warunek promienia” (zawierają się w okręgu o promieniu $r(i)$). W tablicy rekurencji odpowiadają im czarne punkty. Ponieważ odległość D_{ii} nie czyni zadość powyższemu warunkowi, punkt w tablicy rekurencji, odpowiadający tej odległości, jest koloru białego.

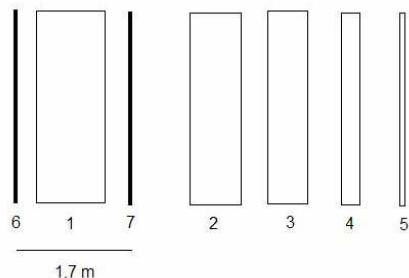
Ponieważ wykresy rekurencyjne obrazują zachowanie i właściwości systemów dynamicznych, układy o jednoznacznej dynamice korespondują z odpowiednimi strukturami na wykresach rekurencyjnych. Można na nich zaobserwować specyficzne topologie (wzorce), charakterystyczne dla poszczególnych rodzajów układów pomiarowych (typowe struktury RP można zobaczyć m.in. w pracach [1, 4]). Dynamikę i właściwości innych, nieznanymi systemów dynamicznych poznaje się m.in. na drodze porównania ich struktury rekurencyjnej do wykresów wzorcowych.

Narzędziami pomocnymi w analizie dynamiki układów nieliniowych są metody parametryzujące wykresy rekurencyjne. Pozwalają one precyzyjnie opisać strukturę wykresu RP przez pryzmat liczby i jakości występujących struktur oraz czasu trwania rekurencji trajektorii układu w przestrzeni fazowej. Jedną z takich metod jest *analiza ilościowa rekurencji* ((ang.) *Recurrence Quantification Analysis (RQA)*), zaproponowana w latach dziewięćdziesiątych XX wieku przez C. L. Webbera jr. i J. P. Zbiluta [5, 6]. Analiza RQA wykorzystuje szereg parametrów, wśród nich m.in.: współczynnik rekurencji (RR), entropia (ENTR), determinizm (DET), laminarność (LAM) i dywergencja (DIV).

3. Zastosowanie metody RP do analizy natężenia ruchu pojazdów

Sygnaly pomiarowe, poddane analizie rekurencyjnej, były w przeważającej mierze sygnałami opisującymi natężenie ruchu drogowego. Pochodziły one z 2 stanowisk pomiarowych AGH, zlokalizowanych na międzynarodowej drodze E-40 w Woli Dębińskiej w województwie Małopolskim oraz

w Gardawicach (Górny Śląsk, droga 81), jak również z 4 punktów kontroli ruchu drogowego firmy TRAXelektronik, zlokalizowanych w Krakowie (al.29-go Listopada / ul.Kuźnicy Kołłątajowskiej i ul.Mikołajczyka) i na terenie Województwa Małopolskiego (Michałowice i Jaksice). Przykładowe stanowisko pomiarowe – w Woli Dębińskiej – składało się z pięciu pętli indukcyjnych o zróżnicowanej szerokości (0,1 – 1,5 m) i dwóch czujników piezoelektrycznych, jak to pokazano na **Rysunku 2**. Szczególnie przydatna w przeprowadzonej analizie była pierwsza grupa czujników, z których otrzymywano sygnał profilu magnetycznego poszczególnych samochodów. Częstotliwość próbkowania rozważanego systemu wynosiła 1 kHz, zaś błędność pomiaru, będąca wypadkową zastosowanych rozwiązań technicznych i klasy czujników, wynosiła ok. 15 % błędu przy swobodnym ruchu.

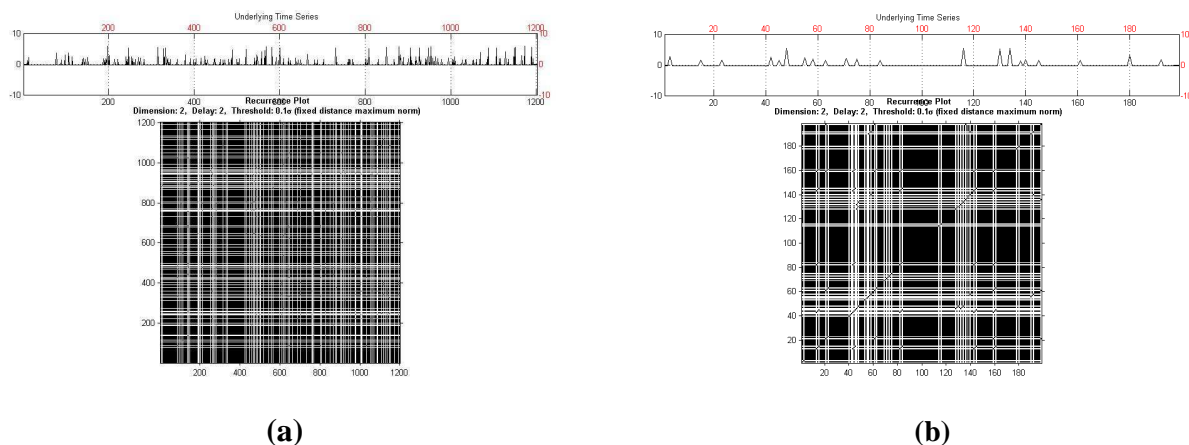


Rysunek 2. Plan poglądowy stanowiska pomiarowego, zlokalizowanego w Woli Dębińskiej.

1 – 5: pętle indukcyjne o szerokości odpowiednio: 1,5 m; 1 m; 0,5 m; 0,3 m; 0,1 m

6 – 7: czujniki piezoelektryczne znajdujące się w odległości 1,7 metra

Cała analiza natężenia ruchu pojazdów została przeprowadzona za pomocą programu *Visual Recurrence Analysis ver. 5.01* Eugene Konovova oraz w aplikacji Matlab z wykorzystaniem narzędzia *Cross Recurrence Plot Toolbox ver. 5.3* Norberta Marwana. W swojej pierwszej fazie analiza opierała się na sygnałach pochodzących z pierwszych dwóch stanowisk pomiarowych. Analizie RP poddano tak natężenie ruchu drogowego na długich (21 dni), jak i na krótkich (60-, 45- i 20-minutowych) sygnałach. Za każdym razem badano wpływ parametrów rekonstrukcji obrazu, tj. otoczenia $r(i)$, opóźnienia τ , i wymiaru m na otrzymywane wyniki. Jak się okazało, 21-dniowy ciągły sygnał pomiarowy okazał się być zbyt długim do analizy z wykorzystaniem powyższych aplikacji oraz nowoczesnego komputera osobistego klasy PC, zaopatrzonego w dwa dwurdzeniowe procesory oraz sporą ilość pamięci operacyjnej RAM. Zmuszony zostałem więc do skrócenia rozpatrywanego sygnału pomiarowego bądź/i do wykonania re-próbkowania sygnału, uwzględniającego tylko wybrane próbki. Przykładowe obrazy RP pokazano na **Rysunku 3**.

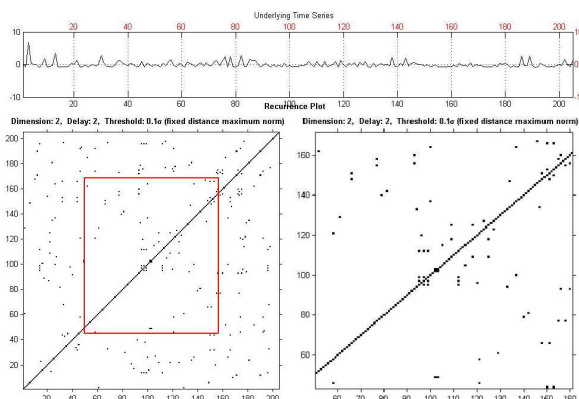


Rysunek 3. Wykresy rekurencyjne szeregu pomiarowego pojazdów ($m=2$, $r(i)=2$, $\varepsilon=0.1\sigma$) dla czasu pomiaru **(a)** 20 minut, **(b)** 200 próbek z zakresu 200-400 próbki 20-to minutowego szeregu pomiarowego.

Wykresy rekurencyjne są skutecznym narzędziem do określania nietypowych sytuacji w ruchu drogowym i aberracji komunikacyjnych, tj. takich sytuacji, które są anomaliami w stosunku do przeciętnego ruchu, charakterystycznego dla danej drogi. Dzięki tym wykresom, tak jak to widzimy powyżej, możemy szybko zlokalizować zatory drogowe (duże nagromadzenie białych linii), ale i te chwile czasowe, kiedy żadne pojazdy nie przejeżdżają (większe obszary czarne). Grubość linii występujących na wykresach RP, koresponduje zaś z wielkością piku (powiązaną z długością pojazdu), a co za tym idzie z rodzajem pojazdu.

Przeprowadzone doświadczenia pozwoliły wskazać, że największy wpływ na czytelność otrzymywanych obrazów rekurencyjnych ma dobór wymiaru rekonstruowanej przestrzeni m oraz wielkość akceptowalnego otoczenia, w którym rozpatruje się „najbliższych sąsiadów” $r(i)$.

Innym, komplementarnym podejściem analizy natężenia ruchu drogowego była analiza interwałów czasowych, występujących między pojazdami. Ich przykładowy wykres rekurencyjny ukazuje **Rysunek 4**.



Rysunek 4. Wykres RP odległości czasowych między kolejnymi pojazdami dla czasu pomiaru 30 minut ($m=2$, $r(i)=2$, $\varepsilon=0.1\sigma$).

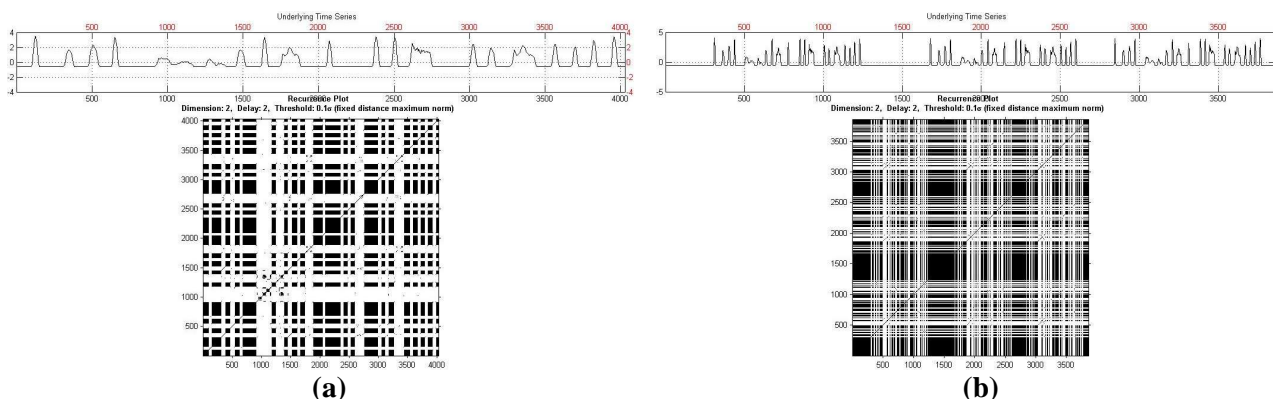
Powyższy rysunek ukazuje nam skrajnie inny obraz RP w stosunku do poprzedniego. Nie mamy tu do czynienia z koherentną morfologicznie strukturą, ale z pojedynczymi punktami rozszanymi po całym obszarze. Wynika to ze specyfiki danych pomiarowych. Wydaje się to potwierdzać przypuszczenie, iż odległości między samochodami, nie regulowane w żaden precyzyjny, zewnętrznie ingerujący w układ komunikacyjny sposób, bardzo często są przypadkowe. Powyższe wykresy, co ukazali niektórzy autorzy, są charakterystyczne dla losowych serii czasowych [2]. Jednak należy zauważyć, że we wszystkich przypadkach, co jakiś czas zauważalne są mikrostruktury. Zdają się one sugerować występowanie, co prawda niezbyt silnych, ale jednak zależności w strukturze przemieszczającego się taboru. Dla pełniejszego ukazania relacji, zachodzących w analizowanych przedziałach czasowych (30-, 45- i 60 minut) pomiędzy przejeżdżającymi pojazdami, wykonano histogramy odległości, tablice rozrzutu odległości między pojazdami oraz zestawienie procentowe odległości pomiędzy pojazdami. Wynikło z nich, że narzędzia statystyczne i bazujące na analizie rekurencyjnej są względem siebie komplementarne i uzupełniają zakres wiedzy dotyczący właściwości i trajektorii układów nieliniowych w przestrzeni fazowej.

Analizie rekurencyjnej poddano także sygnały pochodzące z 4 komercyjnych punktów pomiarowych, zlokalizowanych na terenie Województwa Małopolskiego. W tym przypadku badano liczbę przejeżdżających samochodów oraz ich długość i średnią prędkość w miesiącu październiku 2007 roku. Badano także wpływ parametrów rekonstrukcji obrazu na otrzymywane wyniki. Na analizowanych obrazach RP można było zauważyć specyficzne struktury, odpowiadające bądź to okresowości natężenia ruchu, bądź też aberracjom występującym w przedmiotowych szeregach pomiarowych (nagły spadek / wzrost przejeżdżających pojazdów, zatory drogowe i in.). Analizie poddano także 3 wybrane dni miesiąca października 2007 roku dla punktu pomiarowego Kuźnica Kołtąjowska. Badania te, będące uszczegółowieniem całomiesięcznego pomiaru, pozwoliły wydobyć charakterystykę natężenia ruchu dla jednodniowych okresów pomiarowych. Dzięki analizie rekurencyjnej zauważono specyficzne właściwości analizowanego sygnału (takie jak pojawianie się naprzemiennych stanów w szeregu pomiarowym (dupleksacja stanów), czy okresową quasi-stacjonarność szeregów pomiarowych), nie zwracające na siebie uwagi na przebiegu czasowym.

4. Klasyfikacja pojazdów wykorzystująca metodę wykresów RP

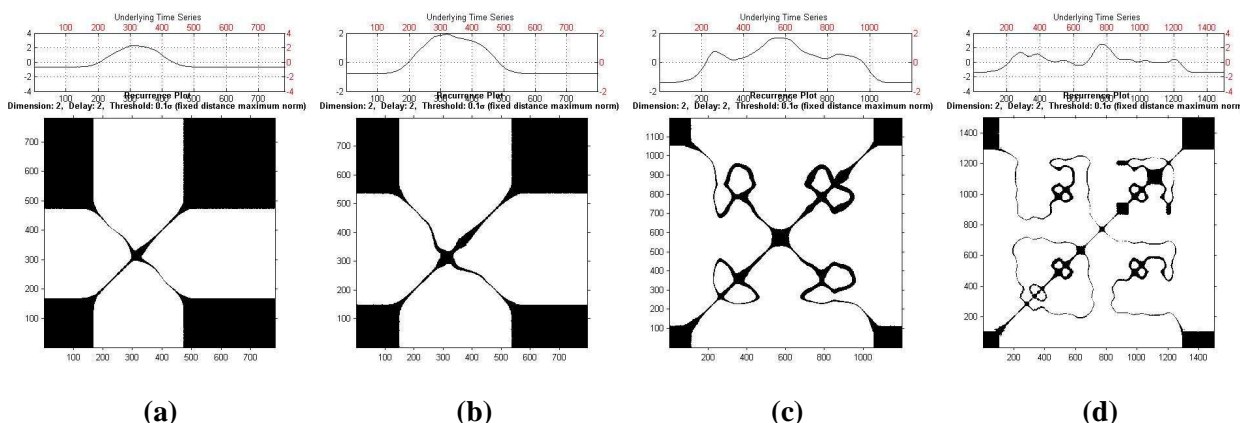
Kolejnym rozważanym krokiem była próba identyfikacji pojedynczych pojazdów z całego szeregu pomiarowego. Ekwivalentem przejeżdżającego nad systemem pomiarowym (zamontowanym w drodze) pojazdu mogła być zastępcza długość elektryczna (jak w dotychczas rozpatrywanych układach), bądź też profil magnetyczny. Powstawał on jako konsekwencja zmiany indukcyjności pętli indukcyjnej, pod wpływem przejeżdżającego nad nią pojazdu. Podczas przeprowadzanych doświadczeń zauważono, że w zależności od tego, jakie pojazdy przeważają, wykresy rekurencyjne przyjmują odmienne struktury. Postanowiono więc zobrazować krótki szereg, składający się z 20 różnych pojazdów (o czym świadczą różne

profile magnetyczne). Na **Rysunku 5** zestawiono tak otrzymany wykres rekurencyjny oraz wykres, który powstał na bazie 3-krotnego skopiowania pierwotnego szeregu.



Rysunek 5. Wykresy rekurencyjne szeregu 20-tu (a) i 60-ciu (b) pojazdów, złożonych z samochodów należących do różnych klas ($m=2$, $r(i)=2$, $\varepsilon=0.1\sigma$).

Jak widać na powyższych wykresach, pojazdy o profilach magnetycznych niższych i szerszych tworzyły odmienne substrukтуры, niż pojazdy, których profile były proste i wysokie. Potrójne skopiowanie szeregu pierwotnego pozwoliło uzyskać nam strukturę, która odpowiada dłuższej obserwacji natężenia ruchu drogowego i jest porównywalna z innymi wykresami rekurencyjnymi, opisującymi ruch drogowy, które zostały przeze mnie już wcześniej zaprezentowane. Jeden z nasuwających się wniosków był taki, że bezpośredni wpływ na strukturę szeregu pomiarowego ma kształt profilu magnetycznego pochodzącego od pojedynczego pojazdu. A ponieważ poszczególne pojazdy generują różne profile magnetyczne, charakterystyczne dla predefiniowanych 4 klas pojazdów: osobowych, dostawczych, autobusów i TIRów, można było przypuszczać, że także struktura ich wykresów rekurencyjnych będzie odmienna. Oczywiście trudno w przypadku przejazdu pojedynczego samochodu rozważać przestrzeń fazową przez pryzmat powrotu trajektorii w sąsiedztwo analizowanego punktu. Świadom niespełniania przez analizowany sygnał założeń metody, postanowiłem jednak wykorzystać przepis rekurencyjny, jako dający ciekawe i zadawalające efekty analityczne. W związku z powyższym, na potrzebę rozpatrywanych sygnałów, zdefiniowano pojęcie **Pulse Recurrence Plot (PRP)**, jako quasi-rekurencyjny wykres pojedynczego impulsu, będący (w tym przypadku) sygnałem opisującym pojedynczy pojazd samochodowy. Wykresy rekurencyjne wzorcowych dla każdej z klas sygnałów ukazuje **Rysunek 6**.



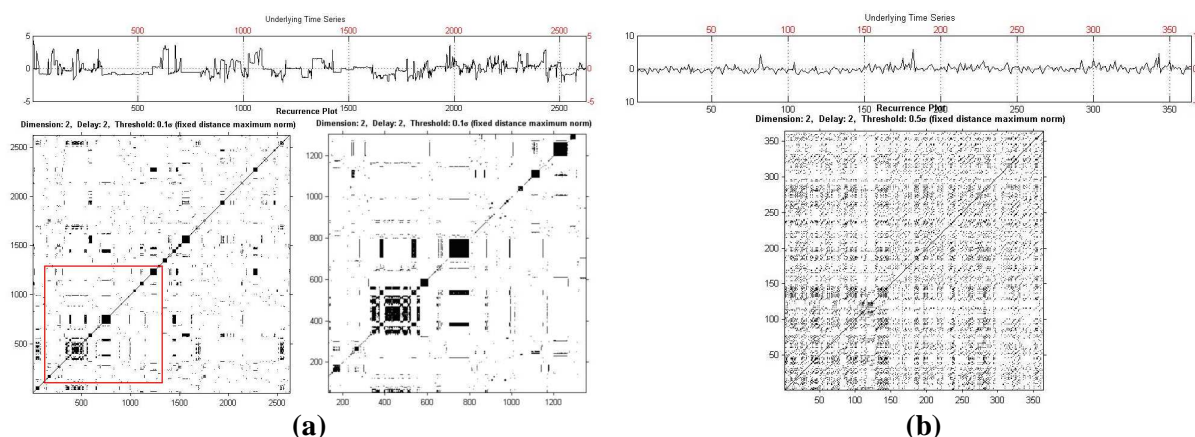
Rysunek 6. Profile magnetyczne i wykresy rekurencyjne PRP ($m=2$, $r(i)=2$, $\varepsilon=0.1\sigma$) dla wzorców klas: (a) samochody osobowe, (b) samochody dostawcze, (c) autobusy, (d) TIRy

Zastosowanie metody RP dla sygnału profilu magnetycznego pojazdu wykazało, że struktura graficzna wykresów może posłużyć jako narzędzie, pozwalające automatycznie przypisać konkretny pojazd do danej, odpowiadającej mu klasy. Problemy, z jakimi się tu można spotkać wynikają z częściowego podobieństwa wykresów RP pojazdów klasy osobowej i dostawczej oraz autobusów i TIRów. Aby z większą precyzją móc przeprowadzić klasyfikację, posiłkowano się ilościową analizą rekurencji (RQA). Pozwoliła ona stwierdzić, że parametrami pomagającymi przypisać dany pojazd do konkretnej klasy w sposób szczególny są RR, ENTR, DET, LAM i odchylenie standardowe.

Dotychczas w procesie klasyfikacji w dużej mierze stosowane były metody statystyczne. Jednak ze względu na swoje właściwości opisywały one przebieg czasowy w sposób ilościowy, parametryzując przebieg i szukając jednoznacznych zależności liczbowych. Metoda rekurencyjna, będąc spojrzeniem jakościowym na procesy dokonujące się w układzie pomiarowym, ukazuje całościowo trajektorię układu przez pryzmat jego właściwości dynamicznych.

5. Analiza natężenia ruchu sygnałów opisujących ruch telefoniczny i internetowy

Końcowym etapem badań była analiza porównawcza 2 innych rodzajów natężenia ruchu: mianowicie w sieci telefonicznej (liczba rozmów w jednostce czasu) i sieci internetowej (wielkość przesłanych pakietów w jednostce czasu), których przykładowe wykresy RP pokazano na **Rysunku 7**.



Rysunek 7. Wykresy rekurencyjne ukazujące natężenie ruchu:

(a) pakietów filmowych przesyłanych drogą internetową ($m=2$, $r(i)=2$, $\varepsilon=0.1\sigma$); (b) połączeń telefonicznych w roku 2006 w dziale informatycznym jednej z firm działających w Krakowie ($m=2$, $r(i)=2$, $\varepsilon=0.5\sigma$).

Wykresy rekurencyjne, otrzymane dla tego rodzaju sygnałów, pozwoliły wyciągnąć wniosek, że trudno mówić o ogólnych właściwościach natężenia ruchu. Chociaż w niektórych przypadkach otrzymywane wykresy RP, pochodzące z dwóch różnych układów, są do siebie podobne, to jednak nie jest to sytuacja generalna. Obrazy RP odzwierciedlają bowiem specyficzną dynamikę, charakterystyczną dla danego układu pomiarowego. W naszym przypadku skrajnie różnie przedstawiało się to dla sygnałów opisujących np. średnią prędkość pojazdów w jednostce czasu, odległość między pojazdami, czy natężenie ruchu w sieci internetowej. Pierwszy układ cechowała dość duża zmienność stanów, przy zauważalnej (dobowej) cykliczności, drugi duża dyspersja wartości pomiarowych, a trzeci charakteryzował się utrzymywaniem przysyłanych wartości przez pewien okres czasu na danym poziomie.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że metodę wykresów rekurencyjnych, jako graficzno-parametryczne narzędzie przeznaczone do analizy danych nieliniowych, można z powodzeniem stosować do analizy natężenia ruchu. Na drodze badań empirycznych potwierdzone zostały tezy postawione na początku rozprawy. Do dokonania autora zaliczyć można wnioski dotyczące możliwości wykorzystania metody wykresów rekurencyjnych w analizie natężenia ruchu. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich.

- Metoda wykresów RP uwypukliła, a w niektórych momentach w ogóle pozwoliła zauważyć właściwości dynamiczne układów, które w klasycznej analizie parametryczno-statystycznej były niedostrzegane (monotoniczność, okresowość, chaotyczność, czy nieliniowość).
- Wykresy rekurencyjne pozwoliły zauważyć specyficzne zachowanie przebiegów czasowych, tj. dipleksacja stanów, czy okresy względnej stacjonarności, obrazując to wizualnie w formie pojawiających się graficznych struktur i morfizmów.
- Ponieważ niektóre sygnały, opisujące natężenie ruchu różnych układów dynamicznych, posiadały bardzo zbliżone przebiegi czasowe, przekładało się to na wygląd struktur rekurencyjnych. Spostrzeżenie to skłoniło do wniosku, że w oparciu o sam wykres rekurencyjny nie jesteśmy w stanie stwierdzić, z jakiego konkretnie układu pochodził dany sygnał pomiarowy. Możemy wypowiedzieć się za to o jego proveniencji dynamicznej.

- Analiza ilościowa rekurencji (RQA), parametryzująca wykres rekurencyjny, okazała się być w wielu przypadkach pomocna w doprecyzowaniu właściwości szeregów czasowych. Dzięki niej możliwe było wykrycie anomalii oraz różnic pomiędzy poszczególnymi doświadczeniami (elementami), które były trudne do zauważenia na obrazach RP.
- Wprowadzone w pracy pojęcie wykresu rekurencyjnego pojedynczego impulsu – Pulse Recurrence Plot (PRP) – pozwoliło przeprowadzić klasyfikację pojazdów w oparciu o ich profil magnetyczny. Metoda ta dała wymierne rezultaty w postaci odmiennych wykresów PRP dla każdej predefiniowanej klasy.
- Okazało się, że podejście statystyczne, ukazujące ilościowe i statystyczne zależności, występujące pomiędzy rozważanymi obiektami, czy całymi szeregami danych pomiarowych, ma własności subsydiarne w stosunku do metody rekurencyjnej i może skutecznie pełnić rolę komplementarną.
- Analiza otrzymanych wykresów rekurencyjnych wykazała, iż brak czytelnych struktur na wykresach RP może być spowodowany kilkoma powodami, w szczególności:
 - dynamicznymi właściwościami układu, lokującymi go w obszarze sygnałów stochastycznych
 - nieprawidłowo dobranymi parametrami rekonstrukcji obrazu ($r(i)$, τ , i m)
- Otrzymane na wykresach rekurencyjnych struktury przestrzenne w większości odbiegały swoim kształtem od znanych z dotychczasowych publikacji morfizmów, opisujących klasyczne układy o poznanej dynamice. Szczególnie zauważalne to było w przypadku sygnałów opisujących natężenie i parametry ruchu pojazdów. Świadczy to o złożonej i odmiennej dynamice analizowanych układów.

Literatura

- [1] Eckmann J.-P., Oliffson Kamphorst S., Ruelle D. – „*Recurrence Plots of dynamical systems*“, Europhysics Letters 4 (9), 1987
- [2] King G. P., Jonem R., Broomhead D. S. – “*Phase portraits from a time series: a singular system approach*”, Nuclear Physics B2, 1987
- [3] Marwan N. – “*Encounters with Neighbours*”, University of Potsdam, 2003
- [4] Ott E. – „*Chaos w układach dynamicznych*”, WNT, Warszawa 1997
- [5] Webber jr. C. L., Zbilut J. P. – “*Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies*”, Journal of Applied Physiology 76, 1994
- [6] Webber jr C. L., Zbilut J. P. – “*Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots*”, Physics Letters A 171 (3-4), 1992