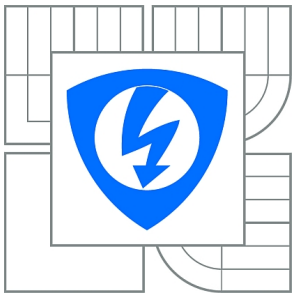
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

METODA DYNAMICKÉHO BORCENÍ ČASU

DYNAMIC TIME WARPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

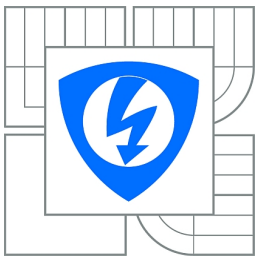
AUTOR PRÁCE — LUKÁŠ ČERNOHOUS

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. PETR HONZÍK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student:	Lukáš Černohous	***ID:***	125394
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Metoda dynamického borcení času

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je seznámit se metodou dynamického borcení času (DTW) a jejími variantami, vybrané metody naprogramovat a testovat na reálných datech.

1. Zpracujte rešerši různých variant algoritmu DTW a příkladů jeho praktického využití.
2. Vybrané metody naprogramujte.
3. Vyberte si jednu konkrétní oblast využití (rozpoznání hlasových povelů nebo zvuků, podpisu, …) a získejte databázi záznamů, se kterými budete dále pracovat.
4. Vytvořte jednoduchý model, který bude klasifikovat na základě podobnosti stanovené pomocí DTW.
5. Vyhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Senin P.: Dynamic Time Warping Alogirthm Review [online 2013-5]. Dostupné na < http://www.researchgate.net/publication/228785661_Dynamic_Time_Warping_Algorithm_Review/file/32bfe5100f11a7929f.pdf >.

Termín zadání:	9.2.2015	***Termín odevzdání:***	25.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem metody dynamického borcení času (DTW), jejím principem, variantami a způsobem výpočtu. Dále vyjmenovává některé typické případy její implementace.

Klíčová slova

Dynamické borcení času, DTW, varianty DTW, využití DTW, dynamické programování, MATLAB

Abstract

This thesis describes the method of dynamic Time Warping (DTW), its principles and method of calculation options. Additionally, it lists some of the typical examples of its implementation.

Keywords

Dynamic Time Warping, DTW, variants of DTW, the use of DTW, dynamic programming, MATLAB

Bibliografická citace mé práce:

ČERNOHOUS, L. *Metoda dynamického borcení času.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Metoda dynamického borcení času“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení S 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně …..... …..

(podpis autora)

Obsah

1 Úvod....6
2 Metoda dynamického borcení času....7
2.1 Princip algoritmu DTW....7
2.2 Algoritmus DTW [1]....8
2.3 Omezení....10
2.3.1 Omezení na lokální souvislost a lokální strmost....10
2.3.2 Omezení na hraniční body....12
2.3.3 Globální vymezení pohybu bortivé funkce [1], [4]....13
2.3.4 Omezení strmosti [3], [6]....15
3 Výpočet vzdálenosti [1], [3]....17
3.1 Váhová funkce....17
3.2 Normalizační faktor....18
4 Typy DTW....19
5 Využití DTW....21
5.1 Zpracování mluvené řeči....21
5.2 Aplikace v oblastech počítačového vidění....21
5.3 Zpracování biosignálů....21
5.4 Gelová elektroforéza....21
5.5 Klasifikace těles na základě jejich příčného profilu....22
5.6 Genová exprese....22
5.7 Data mining....22
6 Postup DTW....23
7 Závěr....24
Seznam použité literatury....26

1 Úvod

V praxi se setkáváme s případy, kdy je nutné porovnávat podobnost sekvencí nějakých údajů. Souhrnně lze říci, že tyto případy spojuje potřeba detekce konkrétního jevu, který alespoň přibližně předem známe. Máme tedy nějaký referenční vzorek, se kterým porovnáváme zkoumané údaje a měříme míru shody mezi nimi.

Na tomto principu pracuje právě metoda dynamického borcení času (DTW), poměrně stará metoda, která je ale pro svou jednoduchost hojně využívána dodnes. V následujících kapitolách bude popsán základní princip této metody a její varianty vzniklé kombinací různých nastavení jejích parametrů. Dále budou vyjmenovány některé příklady jejích využití v různých oblastech lidské činnosti.

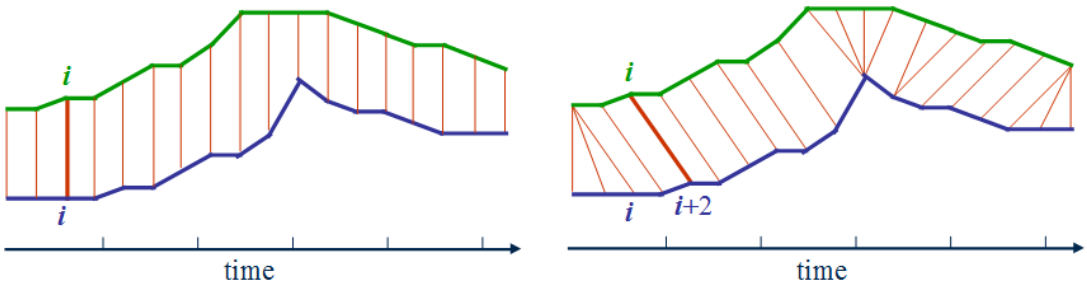
2 Metoda dynamického borcení času

Metoda dynamického borcení času (DTW) je algoritmus využívající principu dynamického programování. Je známá přibližně od padesátých let minulého století, kdy ji objevil a začal popularizovat americký matematik Richard Ernest Bellman [1] [2]. Následně se tato metoda ujala především v oblasti automatické klasifikace slov. Její využití v této oblasti bylo důkladně zkoumáno již od sedmdesátých let [3]. Schopnost této metody efektivně měřit podobnost dvou časových průběhů při současné minimalizaci vlivu vzájemného posunu v čase nebo rychlosti jí zajistila popularitu i v řadě dalších oborů, z nichž některé budou popsány níže.

2.1 Princip algoritmu DTW

Jak již bylo řečeno, tato metoda funguje na principu porovnávání podobnosti dvou časových průběhů. Porovnávané průběhy zpracovávané ve většině úloh v praxi zpravidla nejsou. Mohou být vůči sobě posunuté či roztažené – nejsou zarovnány na časové ose. Vzhledem k tomu, že tyto odchylky nebývají lineární, nelze na ně ani aplikovat lineární porovnávání (např. měřením vzdálenosti odpovídajících si vzorků).

Při lineárním porovnávání například měřením Euklidovské vzdálenosti odpovídajících si bodů (resp. vektorů) můžeme vlivem nestejného zarovnání na časové ose chybně označit dva identické průběhy, které jsou vůči sobě jen posunuty, za nepodobné.
DTW umožňuje nelineárně přizpůsobit tyto průběhy zavedením časově nelineární tzv. *bortivé funkce*. Přizpůsobí buď testovaný časový průběh referenčnímu nebo oba navzájem tak, aby bylo dosaženo co největší shody. Rozdíl mezi lineárním a dynamickým porovnáváním ilustruje Obr. 1. níže.



Obr. 2.1: Rozdíl mezi lineárním a nelineárním (dynamickým) porovnáváním [6]

V rámci měření vzdálenosti u DTW může být též použito Euklidovské vzdálenosti. Rozdíl je ovšem v tom, že nejsou porovnávány (jen) body s odpovídajícím indexem, ale v závislosti na konkrétním nastavení podmínek algoritmu mohou být indexy i rozdílné.

2.2 Algoritmus DTW [1]

Při aplikaci metody DTW porovnáváme jednotlivé prvky (vzorky, příznaky) testovaného průběhu s daným prvkem referenčního průběhu a jeho sousedy. Mechanismus následného výběru nejbližšího prvku ovlivňují konkrétní aplikovaná omezení. Po dokončení výběru se algoritmus přesouvá o krok dál.

Porovnávané časové průběhy zpravidla tvoří posloupnost hodnot, případně posloupnost vektorů. Označme testovaný průběh (zde posloupnost vektorů)

$$\boldsymbol{A}=\{\boldsymbol{a}(1),\boldsymbol{a}(2),\ldots,\boldsymbol{a}(n),\ldots,\boldsymbol{a}(I)\}$$

a referenční průběh

$$\boldsymbol{B}=\{\boldsymbol{b}(1),\boldsymbol{b}(2),\ldots,\boldsymbol{b}(m),\ldots,\boldsymbol{a}(J)\}\ .$$

Pro úplnost ***a(n)*** reprezentuje n-tý vektor hodnot testovaného průběhu a ***b(m)*** je m-tý vektor hodnot referenčního průběhu. Algoritmus pak lze popsat jako hledání funkce DTW $m=\Psi(n)$, která reprezentuje optimální cestu. Ta minimalizuje funkci *D* celkové vzdálenosti mezi průběhy ***A*** a ***B***

$$D(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\sum_{n=1}^{I}\boldsymbol{d}[\boldsymbol{a}(n),\boldsymbol{b}(\boldsymbol{\Psi}(n))]\ .$$

Vztah $\boldsymbol{d}[\boldsymbol{a}(n),\boldsymbol{b}(\boldsymbol{\Psi}(n))]$ je lokální vzdálenost mezi *n*-tým vektorem testovaného průběhu a *m*-tým ($m=\Psi(n)$) vektorem referenčního průběhu. Konkrétní vzorec pro výpočet vzdálenosti záleží na konkrétní aplikaci a formě dat. Lze například aplikovat výpočet Euklidovské vzdálenosti, případně Manhattanské a podobně.

Optimální cestu lze tedy vyjádřit vztahem mezi *m* a *n*. Je ovšem ještě nutné zavést několik podmínek zabraňujících algoritmu ve zkreslení a následném znehodnocení výsledků. Požadavky jsou následující:

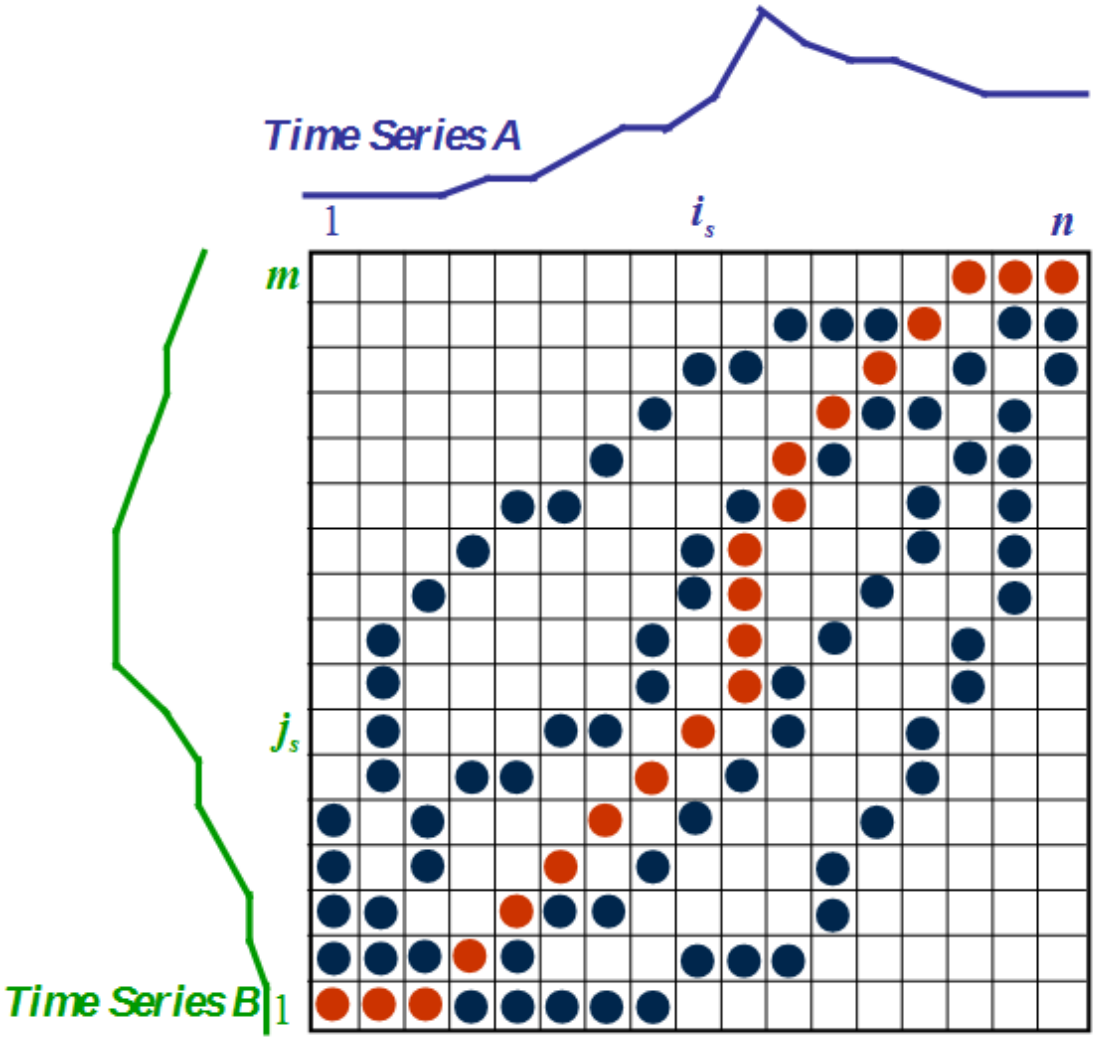
1. je třeba zajistit, aby algoritmus při porovnávání zpětně neopakoval důležité rysy průběhů: cesta se tedy nesmí vracet zpět v čase
2. je nežádoucí, aby algoritmus některé důležité rysy vynechával: cesta nesmí přeskakovat směrem dopředu v čase (tzn. nesmí se přerušit)
3. algoritmus musí brát v potaz oba průběhy v celé délce, ne jen jejich část
4. algoritmus nesmí přeskakovat nepodobné rysy a pozastavovat s u podobných
5. je třeba zabránit mapování velmi krátké části prvního průběhu do velmi dlouhé části průběhu druhého

Aby bylo možné definovat omezení vyplývající z následujících požadavků, je třeba nejdříve zavést obecnou časovou proměnnou k a obě časové proměnné m a n vyjádřit jako funkce k

$$n = i(k), \qquad k = 1,\ldots,K,$$
$$m = j(k), \qquad k = 1,\ldots,K,$$

kde K vyjadřuje délku obecné časové osy.

Následující ilustrace jasně ukazuje, proč je důležité aplikovat na algoritmus určitá omezení: možných cest přes matici je mnoho, takže je možné, že jako optimální se bude jevit cesta, která ve skutečnosti výsledek zkresluje a znehodnocuje tak dosažené výsledky.



Obr. 2.2: Ilustrace možných variací optimální cesty [6]

2.3 Omezení

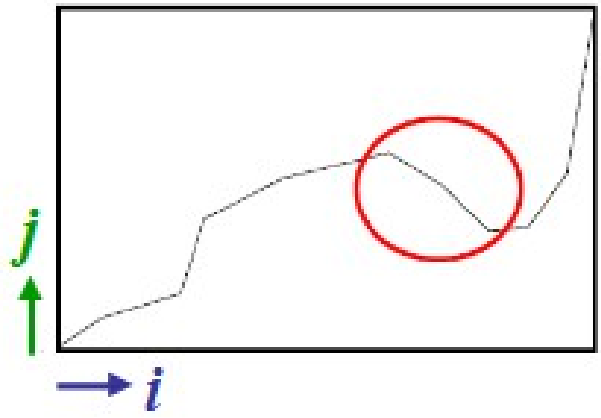
Omezující kritéria je třeba v algoritmu DTW aplikovat především z důvodu zajištění správné funkce porovnávání časových průběhů. Tím, že omezují možnost pohybu optimální cesty, snižují i nároky na výpočetní výkon.

Následující podkapitoly popisují omezení v pořadí daném v předchozí kapitole. Následuje tabulka jednotlivých variací algoritmu DTW v závislosti na aplikovaných omezeních.

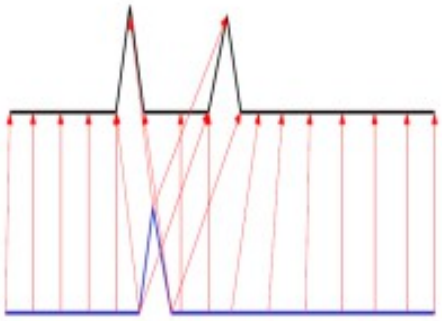
2.3.1 Omezení na lokální souvislost a lokální strmost

První omezení zabraňuje zpětnému vracení v čase a opakování porovnání části průběhu. To se projevuje jako pokles bortící funkce. Omezení tedy musí zaručit, aby funkce byla neklesající. Stanovuje požadavek na *monotónnost*

$$i(k-1) \leq i(k),$$
$$j(k-1) \leq j(k).$$



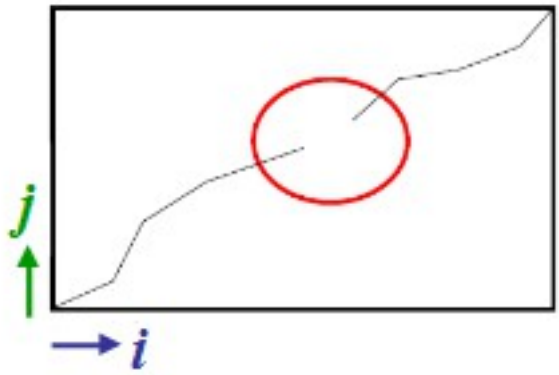
Obr. 2.3: Porušení požadavku na monotónnost [6]



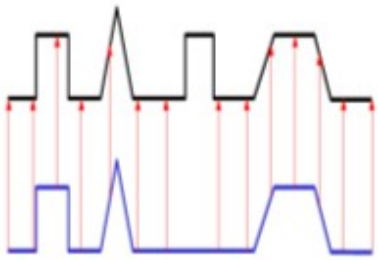
Obr. 2.4: Přeskočení zpět v čase a opětovné vyhodnocení důležitého rysu průběhu [6]

Přeskakování v čase dopředu a následné riziko vynechání důležitých rysů průběhu se projeví přerušením bortící funkce. Zabránit tomuto jevu má požadavek na *spojitost*

$$i(k)-i(k-1)\leq 1,$$
$$j(k)-j(k-1)\leq 1.$$



Obr. 2.5: Porušení požadavku na spojitost [6]



Obr. 2.6: Přeskočení důležitého rysu průběhu [6]

Kombinací požadavků na monotónnost a spojitost vzniká *omezení na lokální souvislost a lokální strmost*

$$0 \leq i(k)-i(k-1) \leq I^{*},$$
$$0 \leq j(k)-j(k-1) \leq J^{*},$$

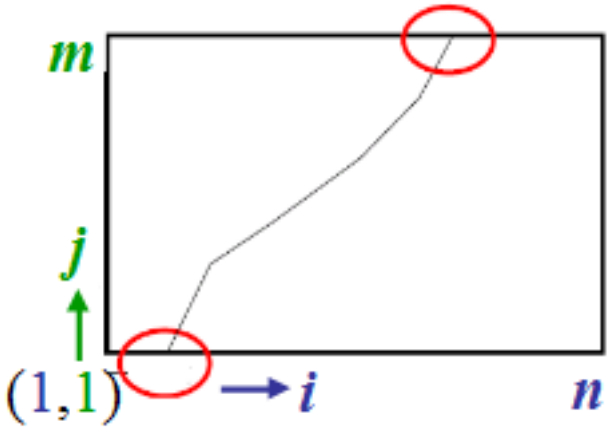
kde obvykle I^{*}, J^{*} = 1,2,3. Pokud I^{*}, J^{*} = 1, každý vektor se musí minimálně jednou opakovat (protože $i(k) = i(k-1)$ znamená, že se opakuje [5]). Je-li I^{*}, $J^{*} > 1$, znamená to, že algoritmus může při porovnání některé vektory vynechat.

2.3.2 Omezení na hraniční body

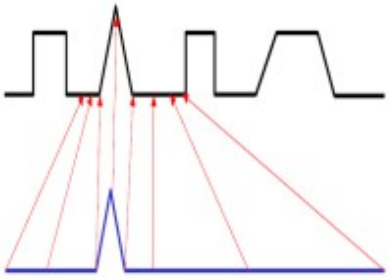
Aby algoritmus bral v potaz celé průběhy a ne jen jejich části, což by mohlo mít za následek umělé zlepšení výsledné vzdálenosti průběhů, je stanoveno *omezení algoritmu na hraniční body*

$$i(1) = 1, \qquad j(1) = 1,$$
$$i(k) = I, \qquad j(k) = J,$$

kde K je délka zvolené obecné časové osy pro porovnání průběhů.



Obr. 2.7: Cesta nezačíná ani nekončí v hraničních bodech [6]



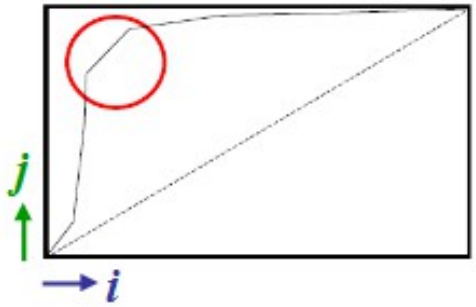
Obr. 2.8: Situace z obrázku 2.7 při porovnávání [6]

Jak je vidět na Obr. 2.7 a 2.8, pokud cesta nezačíná a/nebo nekončí v hraničních bodech [1,1], [I,J], je porovnávána jen část průběhu, zbytek je ignorován. To může opět vést ke zkreslení a následnému znehodnocení výsledku porovnávání.

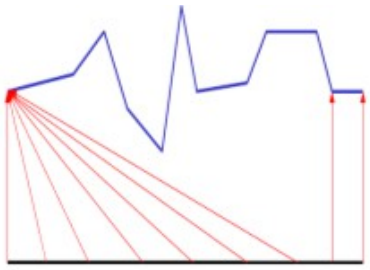
Omezení na hraniční body lze ale aplikovat pouze v případech, kdy porovnáváme průběhy známé délky (např. zpracování izolovaných slov [1]), tedy pokud jsou počáteční i koncové body přesně určeny.

2.3.3 Globální vymezení pohybu bortivé funkce [1], [4]

Pokud algoritmus přeskakuje nepodobné rysy a zbytečně se zdržuje u podobných, projeví se to výrazným vychýlením bortivé funkce od diagonály, která představuje ideální shodu. K zamezení takového chování je třeba globálně vymezit pohyb bortící funkce. K tomu jsou používány především tři hlavní způsoby ohraničení přípustné oblasti pohybu bortivé funkce.



Obr. 2.9: Výrazné vychýlení bortivé funkce od diagonály [6]



Obr. 2.10: Přeskakování nepodobných rysů a zdržování se podobným rysem [6]

Prvním způsobem je vymezení povoleného pásma [3]. Poprvé byl aplikován na porovnávání slov a vychází z předpokladu, že kolísání tempa řeči se v běžných případech nevyznačuje velkými výchylkami a bortící funkce se tudíž bude pohybovat v rámci určitého pásma podél diagonály. To je definováno vztahem

$$|i(k)-j(k)|\leq w\,.$$

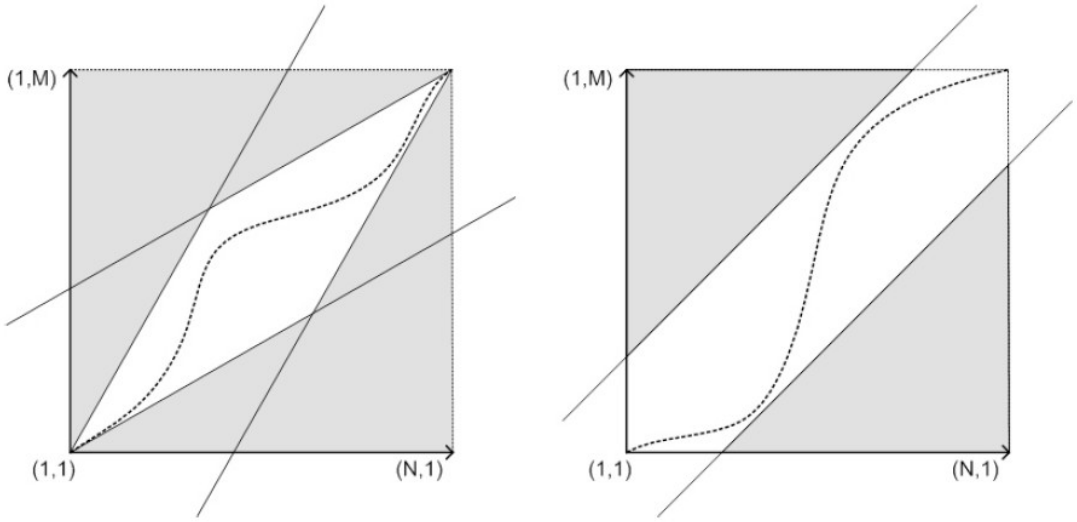
Šířka pásma *w* je vhodné celé číslo, které ale musí být větší než rozdíl $|I-J|$, aby bylo možné do pásma zahrnout i bod *(I,J)*. Tuto podmínku lze odstranit vztahem

$$|\frac{J}{I}i(k)-j(k)|\leq w\,.$$

Druhá varianta vychází ze *splnění omezení na hraniční body* a vymezuje přípustnou oblast následovně:

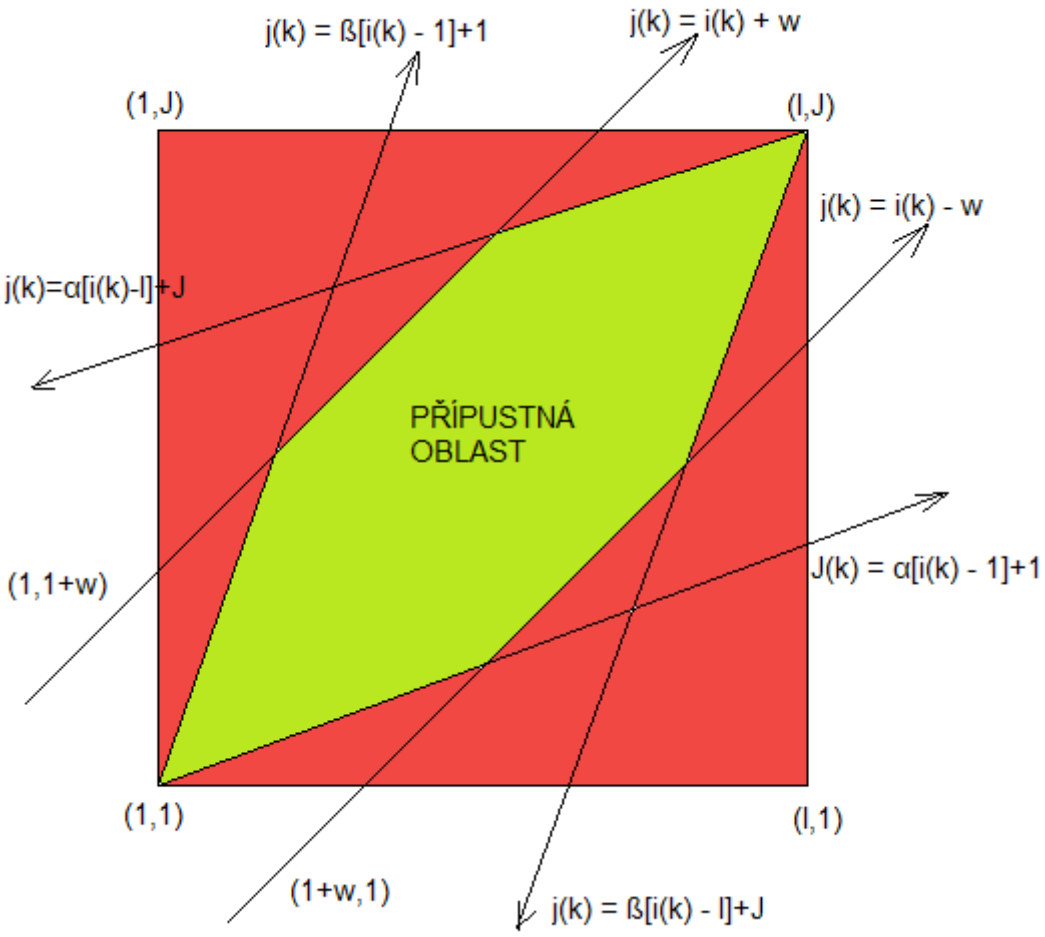
$$\begin{aligned} 1+\alpha[i(k)-1] \;&\leq\; j(k) \;\leq\; 1+\beta[i(k)-1], \\ J+\beta[i(k)-I] \;&\leq\; j(k) \;\leq\; J+\alpha[i(k)-I], \end{aligned}$$

kde α a β představují minimální, resp. maximální směrnice přímky vymezující přípustnou oblast. Vymezení přípustné oblasti těmito dvěma způsoby ilustruje Obr. 2.11 níže, z Obr. 2.12 pak lze vyčíst příslušnost jednotlivých parametrů a vymezujících přímek.



Obr. 2.11: Základní způsoby globálního vymezení přípustné oblasti [4]

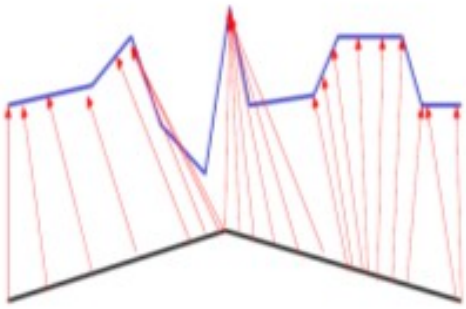
Poslední ze tří způsobů vymezení přípustné oblasti kombinuje předchozí dva. Vymezení tedy určují všechny tři vztahy z předchozích dvou způsobů. Tento způsob vymezení ilustruje Obr. 2.12.



Obr. 2.12: Ilustrace kombinovaného globálního vymezení přípustné oblasti

2.3.4 Omezení strmosti [3], [6]

Pohybuje-li se bortivá funkce příliš dlouho svisle, znamená to, že dochází k nežádoucímu zkreslení mapováním velmi krátkého úseku referenčního průběhu do velmi dlouhého úseku testovaného průběhu. Analogicky to platí i při příliš dlouhém horizontálním pohybu. V takových případech je třeba zavést omezení strmosti. Pokud se bod *c(k)* náležící bortící funkci pohybuje dopředu ve směru jedné z os po *m* kroků bez přerušení, dosáhne stanoveného maxima kroků a není mu v tomto směru povolen pohyb, dokud neurazí alespoň *n* kroků v diagonálním směru. Na základě těchto limitů lze potom stanovit míru omezení $P=n/m$. Čím větší tato hodnota je, tím přísnější je omezení. Pro *P=0* neplatí žádné omezení strmosti, pro $P=\infty$ (při *m=0*) je bortivá funkce omezená pouze na diagonální pohyb. Pokud je tedy omezení příliš přísné, normalizace časové osy nebude efektivní. Na druhou stranu pokud bude omezení příliš uvolněné, zhorší se porovnávací schopnost algoritmu.



Obr. 2.13: Negativní efekt příliš velké strmosti části bortivé funkce [6]

3 Výpočet vzdálenosti [1], [3]

Obecný vztah pro určení celkové minimální vzdálenosti mezi referenčním průběhem ***A*** a testovaným průběhem ***B*** lze vyjádřit následovně:

$$D(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}) = \min_{\{i(k),\,j(k),\,K\}}\left[\frac{\sum_{k=1}^{K} d[i(k),j(k)]\,\hat{W}(k)}{N(\hat{W})}\right],$$

d[i(k), j(k)] je lokální vzdálenost mezi *n=i(k)* prvkem časového průběhu ***A*** a *m=j(k)* prvkem časového průběhu ***B***, $\hat{W}(k)$ je hodnota váhové funkce pro *k*-tý úsek bortivé funkce a $N(\hat{W})$ je normalizační faktor, který je funkcí váhové funkce.

3.1 Váhová funkce

Váhová funkce slouží k upřednostnění/penalizaci konkrétních lokálních cest v matici vzdáleností. Závisí pouze na lokální cestě.

Používají se následující typy váhových funkcí:

typ a) symetrická váhová funkce

$$\hat{W}(k)=[i(k)-i(k-1)]+[j(k)-j(k-1)],$$

typ b) asymetrická váhová funkce

$$b1) \qquad \hat{W}(k)=i(k)-i(k-1),$$
$$b2) \qquad \hat{W}(k)=j(k)-j(k-1),$$

typ c)

$$\hat{W}(k)=min[i(k)-i(k-1),j(k)-j(k-1)],$$

typ d)

$$\hat{W}(k)=max[i(k)-i(k-1),j(k)-j(k-1)],$$

přičemž i(0) = j(0) = 0.

3.2 Normalizační faktor

Normalizační faktor $N(\hat{W})$ je zaveden kvůli kompenzaci délky nebo počtu kroků bortivé funkce. Obecná definice:

$$N(\hat{W}) = \sum_{k=1}^{K} \hat{W}(k)$$

Pro jednotlivé typy váhových funkcí potom:

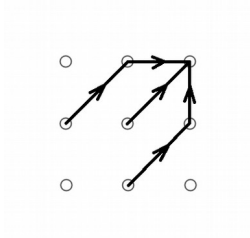
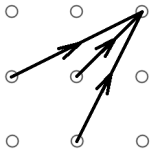
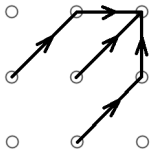
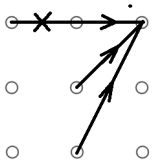
$$N(\hat{W}_a) = \sum_{k=1}^{K} [i(k) - i(k-1) + j(k) - j(k-1)] = I + J$$
$$N(\hat{W}_{b1}) = \sum_{k=1}^{K} [i(k) - i(k-1)] = I$$
$$N(\hat{W}_{b2}) = \sum_{k=1}^{K} [j(k) - j(k-1)] = J$$

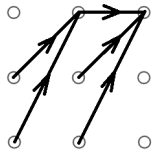
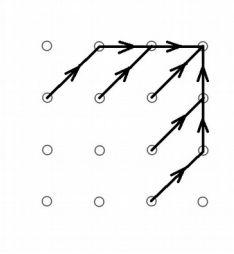
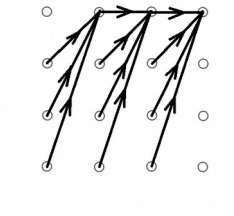
Pro váhové funkce typu c) a d) je normalizační faktor silně závislý na konkrétním průběhu bortivé funkce. Jeho hodnotu lze určit, ale ne rekurzivním algoritmem. Nejlépe se osvědčila volba faktoru nezávisle na průběhu bortivé funkce:

$$N(\hat{W}_c) = N(\hat{W}_d) = I.$$

4 Typy DTW

Na základě kombinací parametrů DTW popsaných výše lze rozlišit sedm základních typů funkce DTW. Souhrnně je popisuje následující tabulka [1].

Typ DTW	Typy lokálních omezení cesty	α	β	Typ $\hat{W}(k)$	Funkce částečné kumulované vzdálenosti $g(n,m)$
I		0	∞	a	$min\begin{bmatrix} g(n,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+2d(n,m) \\ g(n-1,m)+d(n,m) \end{bmatrix}$
				b	$min\begin{bmatrix} g(n,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m)+d(n,m) \end{bmatrix}$
II		1/2	2	a	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m-2)+3d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+2d(n,m) \\ g(n-2,m-1)+3d(n,m) \end{bmatrix}$
				c	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m-2)+d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+d(n,m) \\ g(n-2,m-1)+d(n,m) \end{bmatrix}$
III		1/2	2	a	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m-2)+2d(n,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+2d(n,m) \\ g(n-2,m-1)+2d(n-1,m)+d(n,m) \end{bmatrix}$
IV		1/2	2	b1	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m)+\kappa d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m-2)+d(n,m) \end{bmatrix}$ $\kappa=1$ pro $j(k-1)\neq j(k-2)$ $\kappa=\infty$ pro $j(k-1)=j(k-2)$

V		1/2	2	d	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m-2)+2d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+d(n,m) \\ g(n-2,m-2)+2d(n,m)+d(n,m) \\ g(n-2,m-1)+d(n-1,m)+d(n,m) \end{bmatrix}$
VI		1/3	3	a	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m-3)+2d(n,m)+d(n,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m-2)+2d(n,m-1)+d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+2d(n,m) \\ g(n-2,m-1)+2d(n-1,m)+d(n,m) \\ g(n-3,m-1)+2d(n-2,m)+d(n-1,m)+d(n,m) \end{bmatrix}$
VII		1/3	3	a	$min\begin{bmatrix} g(n-1,m-3)+4d(n,m) \\ g(n-1,m-2)+3d(n,m) \\ g(n-1,m-1)+2d(n-2,m) \\ g(n-2,m-2)+4d(n-1,m)+d(n,m) \\ g(n-2,m-2)+3d(n-1,m)+d(n,m) \\ g(n-2,m-1)+2d(n-1,m)+(n,m) \\ g(n-3,m-3)+4d(n-2,m)+d(n-1,m)+d(n,m) \\ g(n-3,m-3)+3d(n-2,m)+d(n-1,m)+d(n,m) \\ g(n-3,m-1)+2d(n-2,m)+d(n-1,m)+d(n,m) \end{bmatrix}$

5 Využití DTW

Metoda dynamického borcení času (nebo časové osy) se nabízí k využití ve všech případech, kdy je potřeba porovnat dvě sekvence signálu. Využití je pak dvojí: může jít přímo o finální porovnání s výběrem (knihovnou) známých, resp. žádaných sekvencí nebo je využita schopnost metody DTW synchronizovat sekvence v rámci předzpracování signálu pro jiné formy detekce/zpracování.

5.1 Zpracování mluvené řeči

Automatická klasifikace slov v mluveném projevu je vůbec prvním případem praktické implementace Metody dynamického borcení času. Od sedmdesátých let minulého století se touto problematikou zabývali například Hiroaki Sakoe a Seibi Chiba [3], kteří na toto téma vydali několik studií zabývajících se především vlivem aplikace různých kombinací omezujících kritérií algoritmu DTW.

5.2 Aplikace v oblastech počítačového vidění

V této oblasti metoda DTW nalezla uplatnění například v rozpoznávání gest ruky. Jednou z konkrétních aplikací tohoto zaměření je pak klasifikace znakové řeči.

Další aplikací metody DTW je klasifikace psaného slova [11]. Speciálním případem je v této oblasti pak rozeznávání podpisu.

5.3 Zpracování biosignálů

V tomto oboru je zpravidla nutné identifikovat nějaký vzor ve zpracovaném signálu. Ať už jde o vyhodnocování EKG či EEG signálu, vždy je možné aplikovat buď přímo metodu DTW jako samotný klasifikátor nebo ji využít „pouze“ jako nástroj pro synchronizaci sekvencí před jejich samotnou klasifikací například shlukovou analýzou. [13], [14]

5.4 Gelová elektroforéza

Elektroforéza obecně označuje množinu separačních metod využívajících ke klasifikaci chemických látek jejich odlišnou pohyblivost ve stejnosměrném elektrickém Poli. Gelová elektroforéza je pak metoda pro separaci a analýzu makromolekul (DNA, RNA, proteinů...) v závislosti na jejich velikosti, uspořádání a náboji. Využívá gelu o různé velikosti pórů, skrze které se fragmenty makromolekul pohybují.

Metoda dynamického borcení času je zde využita jako nástroj pro synchronizaci porovnávaných sekvencí v závěrečné fázi předzpracování. Pro konečné zpracování je použita shluková analýza. [15]

5.5 Klasifikace těles na základě jejich příčného profilu

Zde je metoda DTW využívána například ke klasifikaci projíždějících vozidel na základě jejich shora snímaného profilu. Snímání může být provedeno různými metodami (laserem, infračerveně, …). Výstupem měření je zpravidla údaj o výšce profilu v časové sekvenci tak, jak vozidlo projíždí snímaným průřezem. Metoda DTW je zde použita jako finální klasifikátor [12].

5.6 Genová exprese

Cílem je vyhodnotit sekvenci hodnot reprezentujících sled nukleotidů Adeninu, Guaninu, Cytosinu a Thyaminu v různých kombinacích. Metoda DTW zde může být použita jako přímý klasifikátor i jako nástroj pro synchronizaci sekvencí. Jednotlivé hodnoty mohou být reprezentována několika způsoby, zvolený postup je však stejný [7].

5.7 Data mining

Dolování sekvenčních dat neboli data mining je označení pro dobývání znalosti z databází potenciálně užitečných dat. Metoda DTW je v této problematice aplikována a diskutována jako možné zrychlení [8], [9].

6 Postup DTW

Za předpokladu, že normalizační faktor je nezávislý na průběhu bortivé funkce, lze vztah pro výpočet celkové minimální vzdálenosti zjednodušit:

$$D(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}) = [N(\hat{W})]^{-1}\left\{\min_{\{(k),j(k),K\}}\sum_{k=1}^{K} d[i(k),j(k)]\hat{W}(k)\right\}$$

Takto definovaná vzdálenost je již vhodná k rekurzivnímu vyčíslení pomocí dynamického programování. Celý postup lze shrnout následovně:

1. *Matici lokálních vzdáleností* o velikosti *n* x *m* naplníme odpovídajícími hodnotami lokálních vzdáleností.
2. Vytvoříme si *matici kumulovaných vzdáleností*, která má oproti předchozí matici navíc nultý řádek a nultý sloupec. Tento řádek a sloupec kromě bodu (0,0) naplníme hodnotami ∞, v bodě (0,0) bude nula.
3. Matici kumulovaných vzdáleností inicializujeme a začneme plnit hodnotami rekurzivně:

   Inicializace: $g[i(1),j(1)]=d[i(1),j(1)]\hat{W}(1)$

   Rekurze: $g[i(k),j(k)]=\min_{\{i(k),j(k)\}}\{g[i(k-1),j(k-1)]+d[i(k),j(k)]\hat{W}(k)\}.$
4. Konečná normalizovaná vzdálenosti

   $$D(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=[N(\hat{W})]-1\,g[i(K),j(K)]=[N(\hat{W})]-1\,g[I,J].$$

   Dosazením jedné z váhových funkcí do vzorce pro rekurzi lze odvodit i potřebné rekurzivní vztahy k vyčíslování funkce DTW (poslední sloupec tabulky v předchozí kapitole).

7 Závěr

Metoda dynamického borcení času (DTW) je již poměrně starou metodou, ale svou jednoduchostí a efektivitou (při správném nastavení) je i dnes hojně využívána. Velké popularitě se těší především v oboru rozpoznávání slov a mluvené komunikace s počítačem coby samotný klasifikátor, široké využití nachází i coby nástroj předzpracování sekvencí signálu v případech, kdy je před jejich klasifikací danou metodou nutné tyto sekvence synchronizovat na základě společných znaků. Mimo konkrétních případů zmíněných v této práci existuje i řada dalších aplikací této metody. Většinou jde ale o jiné využití téhož algoritmu v téměř identické podobě (s ohledem na specifika v podobě jiného formátu reprezentace dat či například volnějším požadavkům na omezující kritéria algoritmu).

Seznam ilustrací

Obr. 2.1: Rozdíl mezi lineárním a nelineárním (dynamickým) porovnáváním [6]..... 4

Obr. 2.2: Ilustrace možných variací optimální cesty [6]..... 6

Obr. 2.3: Porušení požadavku na monotónnost [6]..... 7

Obr. 2.4: Přeskočení zpět v čase a opětovné vyhodnocení důležitého rysu průběhu [6]..7

Obr. 2.5: Porušení požadavku na spojitost [6]..... 8

Obr. 2.6: Přeskočení důležitého rysu průběhu [6]..... 8

Obr. 2.7: Cesta nezačíná ani nekončí v hraničních bodech [6]..... 9

Obr. 2.8: Situace z obrázku 2.7 při porovnávání [6]..... 9

Obr. 2.9: Výrazné vychýlení bortivé funkce od diagonály [6]..... 10

Obr. 2.10: Přeskakování nepodobných rysů a zdržování se podobným rysem [6]..... 10

Obr. 2.11: Základní způsoby globálního vymezení přípustné oblasti [4]..... 11

Obr. 2.12: Ilustrace kombinovaného globálního vymezení přípustné oblasti..... 12

Obr. 2.13: Negativní efekt příliš velké strmosti části bortivé funkce [6]..... 13

Seznam použité literatury

[1] PSUTKA, Josef. *Komunikace s počítačem mluvenou řečí*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1996, 287 s. ISBN 80-200-0203-0.

[2] BELLMAN, Richard E. *Dynamic programming*. New Jersey: Priceton, 1957, 339 s.

[3] SAKOE, H. a S. CHIBA. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1978, vol. 26, issue 1, s. 43-49. DOI: 10.1109/tassp.1978.1163055.

[4] SENIN, P. Dynamic time warping algorithm review. *Dynamic Time Warping Algorithm Review* [online]. 2013 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: http://www2.hawaii.edu/~senin/assets/papers/DTW-review2008draft.pdf

[5] ČERNOCKÝ, Jan. Zpracování řečových signálů — studijní opora. In: [online]. 2006, 2006-12-06 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ZRE/public/opora/zre_opora.pdf

[6] TSIPORKOVA, Elena. *Dynamic Time Warping Algorithm for Gene Expression Time Series* [online]. [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: http://www.psb.ugent.be/cbd/papers/gentxwarper/DTWAlgorithm.ppt

[7] Skutkova, H.; Vitek, M.; Babula, P.; aj.: Classification of genomic signals using dynamic time warping. *BMC Bioinformatics*, ročník 14, č. Suppl 10, 2013: str. S1, ISSN 1471-2105, doi:10.1186/1471-2105-14-S10-S1.

[8] AL-NAYMAT, Ghazi H. *NEW METHODS FOR MINING SEQUENTIAL AND TIME SERIES DATA*. University of Sydney, 2009. Dostupné také z: http://hdl.handle.net/2123/5295. Disertační práce.

[9] *Data Mining a Trillion Time Series Subsequences Under Dynamic Time Warping*. In: RAKTHANMANON, Thanawin, Bilson CAMPANA, Abdullah MUEEN, Gustavo BATISTA, Brandon WESTOVER, Qiang ZHU, Jesin ZAKARIA a Eamonn KEOGH. Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2013, s. 3047-3051. Dostupné také z: http://ijcai.org/papers13/Papers/IJCAI13-454.pdf

[10] INTERNATIONAL, IEEE MTT-S. *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International date, 3-6 Nov. 2009* [online]. [Piscatawy, N.J: IEEE, 2009 [cit. 2015-05-25]. ISBN 978-142-4453-573.

[11] RATH, T.M. a R. MANMATHA. Word image matching using dynamic time warping. *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings* [online]. 2003 [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1109/cvpr.2003.1211511.

[12] FILHO, Antonio Carlos Buriti da Costa, Joao Pereira de Brito FILHO, Renato Evangelista DE ARAUJO a Clayton Augusto BENEVIDES. Infrared-based system for vehicle classification. *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)* [online]. IEEE, 2009, : 537-540 [cit. 2015-05-20]. DOI: 10.1109/IMOC.2009.5427528. ISBN 978-1-4244-5356-6. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5427528

[13] LORENC, P. Klasifikace srdečních cyklů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Vítek, Ph.D.

[14] AARABI, Ardalan, Kamran KAZEMI, Reinhard GREBE, Hamid Abrishami MOGHADDAM a Fabrice WALLOIS. Detection of EEG transients in neonates and older children using a system based on dynamic time-warping template matching and spatial dipole clustering. *NeuroImage* [online]. 2009, **48**(1): 50-62 [cit. 2015-05-21]. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.06.057. ISSN 10538119. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811909006934

[15] SKUTKOVA, Helena, Martin VITEK, Sona KRIZKOVA, Rene KIZEK a Ivo PROVAZNIK. *Preprocessing and Classification of Electrophoresis Gel Images Using Dynamic Time Warping*. In: . ESG, 2013, s. 1609 - 1622. Int. J. Electrochem. Sci., 8. Dostupné také z: http://www.electrochemsci.org/papers/vol8/80201609.pdf