

Comparison of Function Features using Modified DTW for Dynamic Signature Verification

S. Rashidi ^{1*}, A. Fallah², F. Towhidkhah ³

¹ Instructor, Bioelectric Group, School of Biomedical Engineering, Science and Research Branch,
Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Bioelectric Group, School of Biomedical Engineering, Amir Kabir University of Technology,
Tehran, Iran, a_fallah@aut.ac.ir

³ Associate Professor, Bioelectric Group, School of Biomedical Engineering, Amir Kabir University of Technology,
Tehran, Iran, towhidkhah@aut.ac.ir

Abstract

Many methods are introduced for estimating the similarities or differences of time signals. One of these methods, DTW algorithm, is also a utility for other domains including classification, data mining and matching regions between two time signals. DTW algorithm minimizes points distance between two signals by contracting or expanding the time axes to find the corresponding points. In this paper, with modification of the local constraints in DTW, a powerful method is proposed for measuring the global or local similarities between two signals. In addition to increasing the accuracy of signals distance measurements and decreasing the classification error, proposed algorithm is more stable than classic DTW against variations of structure and time signal source. The proposed method for dynamic signature verification was applied to a dataset of signatures from Turkish, Chinese and English people. The results of the experiments based on Fisher, Parzen Window and Support Vectors Machine classifications, showed that equal error rate (EER) is 1.46% and 3.51% with universal threshold for random and skilled forgeries, respectively.

Key words: Consistency, Data Mining, Dynamic Signature Verification, Dynamic Time Warping, Time Signal.

* Corresponding author

Address: Saeid Rashidi, Biomedical Engineering School, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Golzar (B) All., Sardar'e Jangal Bol., Pounak Squ., Tehran, Iran

Tel: +98 21 44474321-4

Fax: +98 21 44474319

E-mail: rashidi.saeid@gmail.com

مقایسه ویژگی‌های سیگنالی با استفاده از الگوریتم اصلاح شده DTW در مسئله تصدیق امضای پویا

سعید رشیدی^{۱*}، علی فلاح^۲، فرزاد توحیدخواه^۳

^۱ مربی، گروه بیوالکترونیک، دانشکده مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

^۲ استادیار، گروه بیوالکترونیک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران a_fallah@aut.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه بیوالکترونیک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران towhidkhah@aut.ac.ir

چکیده

تاکنون روش‌های بسیاری برای برآورد میزان شباهت یا اختلاف سیگنال‌های زمانی معرفی شده‌اند. الگوریتم DTW از جمله راهکارهای قدرتمندیست که علاوه بر توانایی فوق در زمینه‌های طبقه‌بندی، داده‌کاوی و تطابق ناحیه‌ای دو سیگنال نیز مورد توجه است. DTW بر پایه بهینه‌سازی فواصل نقاط دو سیگنال و با انبساط و انقباض محور زمان در هر نقطه قادر به یافتن نقاط متناظر است. در این مقاله با اصلاح قیود محلی حاکم بر DTW روشی برای ارزیابی میزان شباهت کلی یا ناحیه‌ای دو سیگنال پیشنهاد می‌شود. الگوریتم مطرح شده در این مقاله علاوه بر افزایش دقت و قابلیت بالاتر در سنجش فاصله سیگنال‌ها و طبقه‌بندی با خطای کمتر، نسبت به تغییرات ساختاری و منبع تولید سیگنال زمانی نیز مقاوم‌تر از DTW مرسوم بوده و قابلیت تعمیم‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد. با استفاده از یک پایگاه داده‌گان ترکیبی متشکل از افراد ترک (از کشور ترکیه)، چینی و انگلیسی‌زبان و اعمال روش پیشنهادی مبتنی بر طبقه‌بندی کننده‌های فیشر، پنجره پارزن و ماشین بردار پشتیبان در مسئله تصدیق امضاء نشان داده می‌شود که ضمن کاهش ۱۲/۳٪ خطای طبقه‌بندی الگوها، در شرایط سطح آستانه عمومی خطای EER در گروه جاعلان تصادفی و ماهر به ترتیب برابر ۱/۴۶٪ و ۳/۵۱٪ به دست آمده است.

کلیدواژگان: پیچش زمانی پویا، تصدیق امضای پویا، داده‌کاوی، سازگاری، سیگنال زمانی.

*عهددار مکاتبات

نشانی: تهران، میدان پونک، سردار جنگل، گلزار یکم (ب)، دانشکده مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی

تلفن: ۴۴۴۷۴۳۲۱، دورنگار: ۴۴۴۷۴۳۱۹، پیام‌نگار: rashidi.saeid@gmail.com

۱- مقدمه

میانگین‌گیری و مقیاس‌سازی معتدل کرد اما محور زمان مشکل عمده جبران تغییرات غیرخطی است.

تطابق برنامه‌ریزی پویا^۲ (DPM) یک روش بهینه‌سازی برای مقایسه سیگنال‌های زمانی است که در فضای بازشناخت الگو به منظور حذف عامل اعوجاج محور زمان استفاده می‌شود. به بیان دیگر در چنین فضائی، DPM برای تبدیل مقیاس زمانی و یکسان سازی طول دنباله‌های زمانی نظیر یک تابع غیرخطی است. الگوریتم پیچش زمانی پویا^۳ (DTW) از جمله روش‌های مبتنی بر DPM است. الگوریتم DTW در زمینه بازشناخت گفتار ارائه شده است [۷، ۸]. امروزه DTW به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به حوزه‌های بازشناخت حرکت اشاره [۹]، رباتیک [۱۰] و پزشکی [۱۱] اشاره کرد.

اگرچه الگوریتم DTW بسیار مورد توجه است ولی دارای ایرادهائی نیز هست. این روش سعی در توصیف تغییرات متناظر دو سیگنال دارد که گاهی تغییرات دامنه را بر اساس پیچش محور زمان بیان می‌کند. این امر به معنی آن است که یک نقطه از یک سیگنال می‌تواند به چندین نقطه غیر متناظر نگاشت شود. به علاوه مشکل دیگر DTW تطابق غیرشهودی دو سیگنال از نظر ویژگی‌های هندسی (نقاط بیشینه، کمینه و عطف) است. در این حالت نگاشت یک به یک بین نقاط هم‌کیفیت وجود ندارد. همچنین DTW در اغلب موارد درباره سیگنال‌های مشابه که تنها در تأخیر زمانی اولیه متفاوت هستند، در تخمین نقاط انطباق دچار اشتباه و خطا می‌شود که این امر با افزایش تأخیر تشدید می‌شود. در شکل ۱ ضعف الگوریتم DTW در تطابق دو سیگنال زمانی که اختلاف عمده آنها در میزان تأخیر نسبت به یکدیگر است، نشان داده شده است.

در این مقاله با اصلاح الگوریتم DTW با استفاده از قیود محلی جدید، علاوه بر رفع ایراد آن در انطباق سیگنال‌های با تأخیر متفاوت، تطابق مؤثرتری را با طول تطابق کمتر در دسترس قرار می‌دهد. آن‌گاه یک سیستم تصدیق امضاء بر پایه روش فوق و با پایگاه دادگانی متشکل از امضاهای افراد ترک (ترکیه)، چینی و انگلیسی زبان طراحی می‌شود.

از دیدگاه نظری مسئله تصدیق امضاء جنبه‌ای از بازشناسی الگو بوده که هدف آن طبقه‌بندی و تمایز امضاهای حقیقی و جعلیست. در این مقاله تصدیق امضاء بر پایه اطلاعات پویا مورد نظر است. منظور از اطلاعات پویا توصیف امضای فرد به‌وسیله سیگنال‌های زمانی مانند مسیر طرح امضاء، نیرو، فشار و زاویه قلم است که حین امضای فرد دریافت می‌شوند. امضای پویا شامل مشخصه‌های زمانی و ویژگی‌های ساختاری مستتر مانند فشار قلم بوده که جعل آنها برای جاعلان ماهر بسیار دشوار خواهد بود هر چند که الگوی ظاهری امضاء جعل شده مشابه با نمونه حقیقی باشد. تصدیق امضای پویا^۱ یک ابزار قدرتمند برای شناسائی افراد است [۱]. امضای پویا توسط صفحات ترسیم یا قلم‌های نوری ثبت می‌شود. روش‌های تصدیق امضای پویا به دو گروه عمده روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های پارامتری و مبتنی بر سیگنال‌ها و توابع تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش پارامتری یک مجموعه از ویژگی‌های کلی و عمومی از سیگنال‌های حاصل استخراج و مقایسه می‌شوند [۲، ۳]. اگرچه این روش از پیچیدگی محاسباتی کمتر و سرعت بالاتری برخوردار است؛ اما معمولاً خطای بیشتری نیز دارد. در روش دوم یک امضاء به‌صورت مجموعه‌ای از سیگنال‌های زمانی بازنمائی می‌شود و این سیگنال‌ها بر اساس الگوریتم‌های همبستگی یا تعیین فاصله مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۴-۶]. این روش‌ها که از ویژگی‌های با ارزش اطلاعاتی بالاتر بهره می‌جویند، نسبت به روش‌های پارامتری خطای کمتری تولید می‌کنند اما زمان بیشتری صرف محاسبات می‌شود.

روش‌های متعددی برای مقایسه منحنی‌های پارامتری و وابسته به زمان ارائه شده است. برخی از روش‌ها به یک الگوی اولیه نیاز دارند تا بتوانند ساختار رفتاری فرایند زمانی را استخراج کرده و بر مبنای آن میزان انحراف مجموعه آزمون محاسبه شود. دسته دیگری از روش‌ها شباهت را بر اساس بهترین مسیر حاصل از تناظر غیرخطی محور زمان، محاسبه می‌کنند. اگرچه تغییرات دامنه را می‌توان با

¹ Dynamic signature verification² Dynamic Programming Matching³ Dynamic Time Warping

$c_k = (N, M)$
 ۲. پیوستگی: مسیر تناظر جهش ندارد و در سلول‌های قطری، افقی یا عمودی حرکت دارد. برای دو نقطه از مسیر c_k, c_{k-1} داریم:

$$i_k - i_{k-1} \leq 1, j_k - j_{k-1} \leq 1$$

۳. یکتائی: هر نقطه مسیر F در حوزه زمان یکتاست:

$$i_{k-1} \leq i_k, j_{k-1} \leq j_k$$

برای محاسبه مسیر پیش‌بینه می‌توان از الگوریتم برنامه‌ریزی پویا استفاده کرد که آن را به شکل بسیار ساده می‌یابد. با تعریف فاصله تجمعی $D(i, j)$ عناصر ماتریس تناظر عبارت‌اند از:

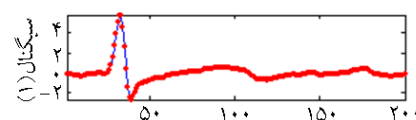
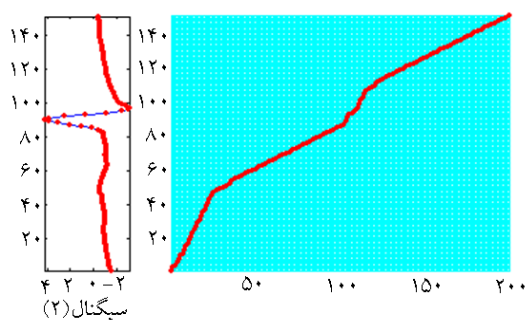
$$D(i, j) = d(i, j) + \min \begin{cases} D(i-1, j-1) \\ D(i-1, j) \\ D(i, j-1) \end{cases} \quad (6)$$

پس از تکمیل ماتریس فوق مسیر بهینه به صورت بازگشتی از عنصر (N, M) به سوی مبدا با معیار کمترین فاصله در هر درایه حاصل می‌شود. شکل ۲ مقادیر c_k و نیز شبکه تناظر را نشان می‌دهد که برای مثال $c_5 = (4, 5)$ به مفهوم $x_4 = y_5$ است.

الگوریتم DTW دارای پیچیدگی، محاسبات با حجم بالا و زمانبر بسیاریست که با حاصل ضرب طول دو سیگنال نسبت مستقیم دارد. راهکارهای مختلفی برای افزایش سرعت و دقت پیشنهاد شده‌اند که به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱. روش فشرده‌سازی: هدف کاهش نمونه‌های ورودیست؛
۲. روش محدودیت دامنه: با فرض سطوح آستانه، سعی در کاهش زمان محاسبات دارد؛
۳. روش قیدگرا: به اعمال محدودیت و شرایط بر معیار بهینه‌سازی می‌پردازد.

در روش فشرده‌سازی، افزایش سرعت بر پایه کاهش ابعاد دادگان ورودیست [۱۲]. با کاهش نمونه‌ها، خطای نسبی افزایش می‌یابد. در این روش سرعت DTW با ضریب بزرگی صعود می‌کند هر چند که هنوز زمان با حاصل ضرب طول سیگنال‌ها متناسب است. در روش محدودیت دامنه با فرض سطوح آستانه برای فاصله نقاط تناظر در الگوریتم پایه DTW فضای جستجو محدود می‌شود و بدین ترتیب سرعت افزایش می‌یابد [۱۳].



شکل ۱- انطباق دو سیگنال با میانگین و واریانس^۴ یکسان

۲- الگوریتم پیش‌بینه زمانی پویا

اگر دو سیگنال زمانی X و Y را به طول‌های N و M داشته باشیم:

$$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_N \quad (1)$$

$$Y = y_1, y_2, y_3, \dots, y_M$$

حال یک مسیر تطابق F بین دو سیگنال‌های مذکور چنین توصیف می‌شود:

$$F = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_K\} \quad (2)$$

$$\max(N, M) \leq K \leq N + M - 1$$

در رابطه فوق k امین عنصر ارتباط بین دو نقطه تناظر دو سیگنال را تعریف می‌کند:

$$c = (i, j) \quad (3)$$

$$c_k = (i_k, j_k)$$

مسیرهای تناظر بسیاری قابل حصول است که مسیر مطلوب با هدف کمینه کردن تابع پیش‌بینه زیر به دست می‌آید:

$$D(X, Y) = \min_F \left[\frac{\sum_{k=1}^K d(c(k)) \cdot w(k)}{\sum_{k=1}^K w(k)} \right] \quad (4)$$

که عبارت $d(c(k))$ یک معیار فاصله مانند فاصله اقلیدسی است و داریم:

$$d(c) = d(i, j) = (x_i - y_j)^2 \quad (5)$$

مسیر تناظر تحت قیود زیر قرار دارد:

۱. شرایط مرزی: نقطه شروع مسیر بر اولین نقطه دو سیگنال و پایان مسیر بر نقاط انتهائی سیگنال‌ها منطبق است:

$$c_1 = (1, 1)$$

⁴ Variance

هرچند به طور مجانبی این قید بر روی زمان اجرا تأثیری ندارد ولی دقت تطابق را افزایش می‌دهد.

قیود کلی که کمینه‌های محلی الگوریتم DTW را به دست می‌دهند هر چند اجرا را سخت‌تر کرده ولی نتایج بهتری را فراهم می‌آورند در صورتی که با ثابت کردن نواحی در قیود، اجرا سهل‌تر شده ولی نتایج ضعیف‌تری حاصل می‌شوند.

۲-۲- قیود محلی

استفاده از قیود محلی احتمال فشردگی یا کشیدگی بیش از معمول برخی نقاط را منتفی می‌کند. این امر توسط محدودیت‌های محلی که بر روی مسیرهای پیچش هر نقطه اعمال شده، به انجام می‌رسد. شکل ۴ برخی از قیود محلی بیانگر شیب DTW را نشان می‌دهد. شیب الگوریتم عبارت است از:

$$p = n/m \quad (۷)$$

n تعداد حرکات قطری و m تعداد حرکات افقی یا عمودی دورترین نقطه محلی است. بنابراین در شکل ۴ برای حالت‌های ترسیم شده p به ترتیب برابر ۰، ۱/۲، ۱ و ۲ است. هرچه p بزرگ‌تر باشد شیب مسیر پیچش محدودتر می‌شود و در حالت $p = \infty$ مسیر روی قطر اصلی قرار دارد. در شیب‌های خیلی بزرگ، مقیاس‌سازی دامنه سیگنال‌ها اثری بر روند پیچش ندارد و اگر شیب خیلی ملایم باشد تمایز بین سیگنال‌ها و طبقه‌بندی صحیح آنها ممکن نیست.

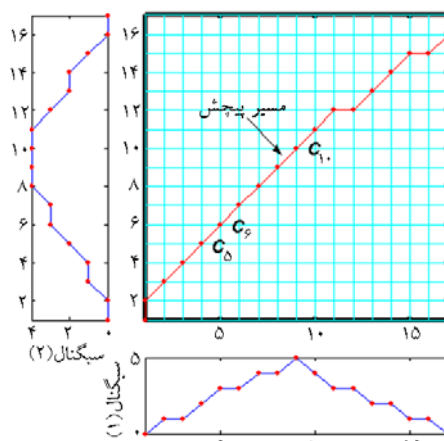
قید مهم محلی دیگر استفاده از عامل $w(k)$ است که وزن مسیرهای پیچش هر نقطه را تعیین می‌کند. دو روش وزندهی متقارن و غیرمتقارن مطرح است. در روش متقارن داریم:

$$\sum_{k=1}^K w(k) = N + M \quad (۸)$$

و در حالت دوم برحسب نوع عدم تقارن چنین می‌شود:

$$\sum_{k=1}^K w(k) = \begin{cases} N \\ M \end{cases} \quad (۹)$$

در روش متقارن حداقل وزن $w(k)$ برابر یک و برای غیرمتقارن برابر صفر است. به طور کلی انتظار می‌رود روش متقارن نتایج بهتری را بروز دهد. قیود دیگری نیز پیشنهاد شده که به طور تفصیلی به وسیله میرز^۷ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند [۱۴].



شکل ۲- نمایش مسیر تطابق

در این مقاله تمرکز بر روی روش‌های قیدگراست. استفاده از قیود وابسته به اطلاعات پیش‌زمینه‌ای درباره نوع و کیفیت سیگنال‌های زمانی تحت بررسی است هر چند که برخی قیود از توانایی و قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتری برخوردارند. در ادامه به قیود کلی و محلی اشاره خواهد شد.

۲-۱- قیود کلی

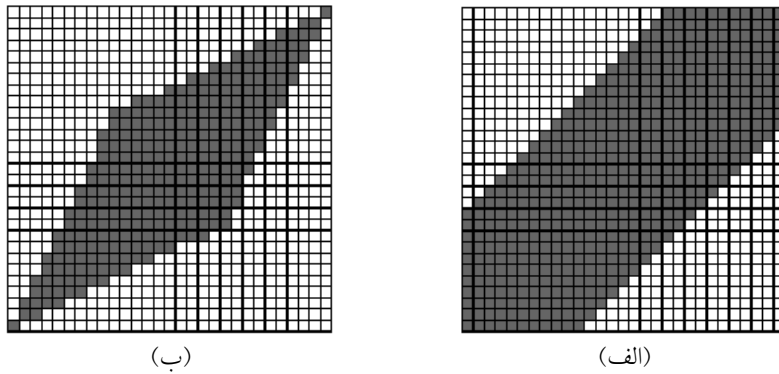
قیود کلی باعث کاهش فضای عملکردی مسیر پیچش شده و آن را به سوی بهبود شاخص در تطابق صحیح‌تر سوق می‌دهند اما این امر به آن معنا نیست که دیگر هیچ تطابق غیرمنطقی نخواهیم داشت. تنها قید کلی اثر پنجره‌گذاریست که اجازه می‌دهد عناصر ماتریس تناظر در محدوده یک پنجره $|i - j(N/M)| < R$ تعریف شوند که R پهنای پنجره است. پنجره باعث می‌شود که گوشه‌های ماتریس از فرایند محاسبه خارج گردند و مسیر پیچش در اطراف قطر اصلی ماتریس به دست آید.

در شکل ۳ دو نوع از پنجره‌های مرسوم ملاحظه می‌شود که هر دو به پهنای $R = 11$ تعریف شده‌اند. قید ساکو-چیبا^۵ که پهنای ثابتی را پس از نقطه شروع برای مسیر پیچش تعریف می‌کند، پیچیدگی محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد در حالی که دقت را فدای آن می‌کند [۸]. ایتاکورا^۶ ناحیه‌ای با شیب خطی به شکل متوازی الاضلاع را پیشنهاد کرد که سیگنال‌ها در آن می‌توانند قبض و بسط یابند [۱۳]. این روش باعث کاهش تعداد موقعیت‌ها به $N.M/3$ می‌شود.

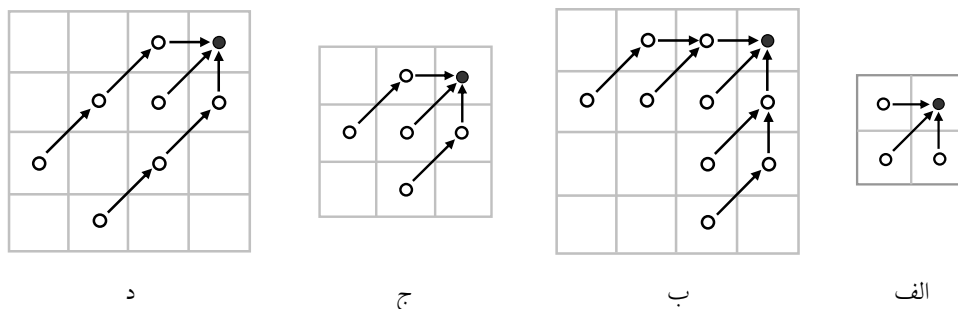
⁵ Sakoe - Chiba

⁶ Itakura

⁷ Myers



شکل ۳- قیود کلی که مسیر پیچش را در نواحی خاکستری محدود می‌کند: الف) محدوده ساکو- چپا؛ ب) متوازی الاضلاع ایتاکورا



شکل ۴- چهار قید محلی با شیب‌های مختلف و به ترتیب ۰، ۱/۲، ۱ و ۲ است.

۲-۳- الگوریتم پیشنهادی

هر چند DTW تلاش دارد که تغییرات غیرخطی محور زمان را برای تطابق سیگنال‌های زمانی توصیف نماید ولی محور اندازه و دامنه سیگنال‌ها نیز بسیار حائز اهمیت هستند و تفاوت میانگین‌ها یا تفاوت مقیاس‌ها می‌تواند به شدت بر مسیر پیچش سیگنال‌ها اثر گذارد [۱۵]. از سوی دیگر در راستای محقق شدن رابطه (۴) کمینه‌های محلی الگوریتم DTW نیز می‌توانند باعث فشردگی یا کشیدگی بیش از معمول برخی نقاط شوند و یک مسیر پیچش با خطایی بزرگ را تولید کنند. برای فرار از کمینه‌های محلی می‌توان شرایط مرزی و پیوستگی را تعمیم داد تا جهش از این نقاط کمینه میسر شود که راهکارهای زیر اجرا شده است:

۱. یکسان‌سازی مقیاس‌ها: روش‌های متفاوتی قابل اعمال است که دو ایده مطرح می‌شود:

$$S_n = \frac{S - \min(S)}{\max(S) - \min(S)} \quad (10) \text{ روش کمینه- بیشینه}^8$$

$$S_n = \frac{S - \text{mean}(S)}{\text{std}(S)} \quad (11) \text{ روش میانگین-انحراف معیار}^9$$

در این مطالعه از روش میانگین- انحراف معیار استفاده شد

که سیگنال‌های با انرژی واحد تولید می‌کند [۱۶].

۲. شرایط مرزی: در DTW مرسوم، نقاط ابتدا و انتها از قبل تعریف شده‌اند در حالی‌که در سیگنال‌هایی که یکی از آنها بر ناحیه‌ای از دیگری منطبق است، این شرایط امکان تطابق ناحیه‌ای را ضعیف می‌کند. برای تغییر این شرایط چنین عمل می‌شود که در سطر اول ماتریس تناظر فاصله تجمعی عبارت است از:

$$D(1, j) = d(1, j) \quad (12)$$

برای ستون اول نیز داریم:

$$D(i, 1) = d(i, 1) + D(i-1, 1) \quad (13)$$

این شرایط همپوشانی از همان نقطه آغازین را ممکن می‌سازد و دیگر شرط تطابق در نقطه (۱، ۱) وجود ندارد. در محاسبه مسیر پیچش که از انتها به ابتدا صورت می‌گیرد، برای نقطه انتهایی نیز می‌توان کمترین مقدار سطر و ستون آخر را در نظر گرفت.

$$c_{end} = \min \left\{ \begin{array}{l} \min(D(end, :)) \\ \min(D(:, end)) \end{array} \right. \quad (14)$$

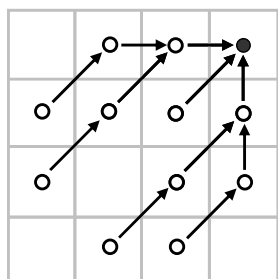
⁸ Min- Max method

⁹ Mean-standard deviation method

$$D(i, j) = \min \begin{cases} D(i-1, j-1) + d(i, j) \\ D(i-3, j-2) + d(i-2, j-1) \\ D(i-3, j-1) + d(i-2, j) \\ D(i-2, j-3) + d(i-1, j-2) \\ D(i-1, j-3) + d(i, j-2) \end{cases} \quad (17)$$

رابطه (۱۷) بیانگر آن است که در سطر و ستون آخر در صورت کشیدگی نقطه و تطابق بر نقطه قبلی، محاسبه مسیر پیچش خاتمه می‌یابد و امکان کشیدگی حذف می‌شود.

شکل ۶ همان شکل ۱ است که با الگوریتم پیشنهادی به دست آمده است. اعمال شرایط مرزی اصلاح شده در نقاط شروع و پایانی مسیر تطابق به وضوح مشخص است. در ضمن با لحاظ کردن شرایط پیوستگی و ساده‌سازی فاصله جمعی، طول مسیر تطابق بسیار کمتر از مثال ۱ است که در بخش بعدی به جزئیات نتایج خواهیم پرداخت.



شکل ۵- قید محلی شیب و همسایگی نقاط در مسیر پیچش

۳. شرط پیوستگی و همسایگی نقاط: شکل ۵ چگونگی تعمیم شرط پیوستگی و محاسبه مسیر پیچش را برای هر یک از نقاط نشان می‌دهد.

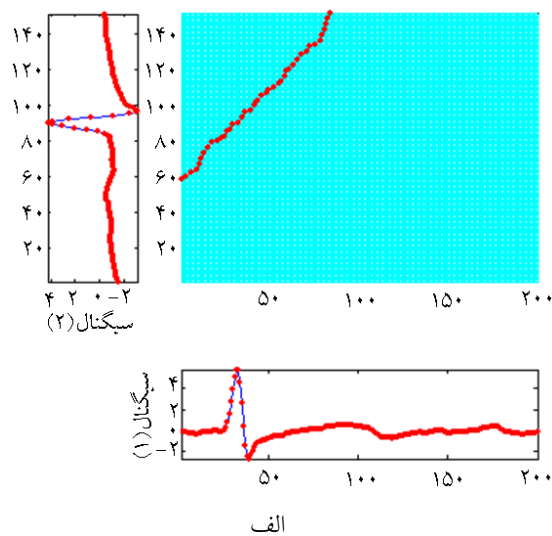
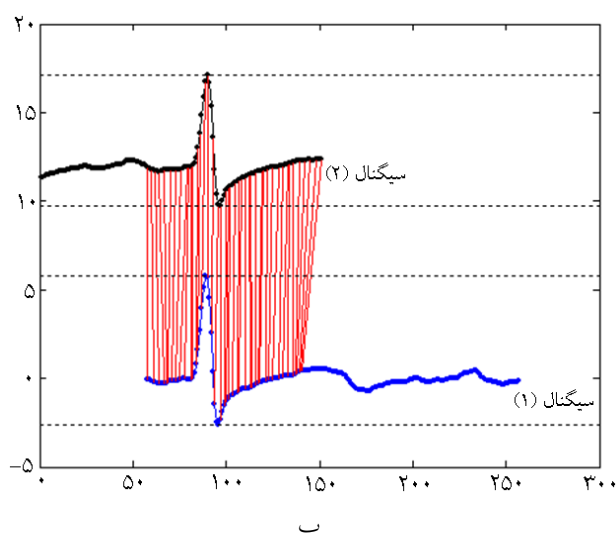
بر پایه روش انتخابی، کشیدگی محلی نقاط به مقدار ۲ محدود شده است یعنی هر نقطه نمی‌تواند به‌طور محلی بیش از دو مرتبه بر نقطه‌ای از سیگنال دیگر تطابق یابد. به بیان دیگر شرط پیوستگی به شکل رابطه (۱۵) اصلاح می‌شود:

$$i_k - i_{k-1} \leq 3, \quad j_k - j_{k-1} \leq 3 \quad (15)$$

ضمن آنکه الگوریتم DTW از ویژگی متقارن و وزن‌دهی یکسان و برابر واحد برخوردار است. با توجه به شکل ۵ محاسبه فاصله جمعی نقاط عبارت است از:

$$D(i, j) = d(i, j) + \min \begin{cases} D(i-1, j-1) \\ D(i-3, j-2) + d(i-2, j-1) + d(i-1, j) \\ D(i-3, j-1) + d(i-2, j) + d(i-1, j) \\ D(i-2, j-3) + d(i-1, j-2) + d(i, j-1) \\ D(i-1, j-3) + d(i, j-2) + d(i, j-1) \end{cases} \quad (16)$$

با لحاظ شرط پیوستگی و اینکه هر نقطه می‌تواند با حداکثر جهش دو نقطه‌ای، پیوستگی را با نقطه تطابق قبلی حفظ نماید رابطه (۱۶) به صورت رابطه (۱۷) ساده می‌شود:



شکل ۶- تطابق دو سیگنال زمانی: الف) ماتریس تناظر؛ ب) انطباق نقاط متناظر دو سیگنال

۳- آزمایش الگوریتم پیشنهادی

سیگنال‌های زمانی حاصل از الگوهای امضاء برای ارزیابی و مقایسه الگوریتم پیشنهادی با DTW مرسوم، در برآورد دقت و صحت میزان شباهت استفاده شده‌اند. به این منظور از ۲ پایگاه دادگان شامل دادگان اولین رقابت بین‌المللی تصدیق امضاء SVC2004 [۱۷] و دادگان SigSA [۱۸، ۱۹] استفاده شد.

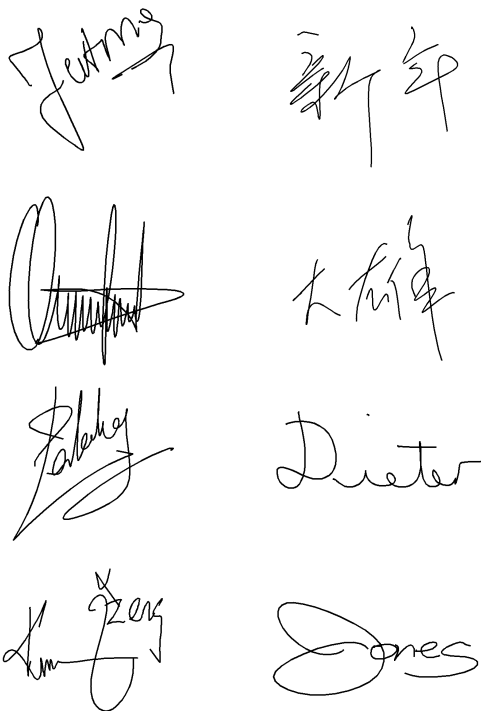
پایگاه اول شامل دو مجموعه امضاء به نام‌های Task1 و Task2 بوده که در برگزیده تعدادی الگوی امضای افراد انگلیسی و چینی زبان است. هر امضاء توسط سیگنال‌های مختصات (X, Y) ، زمان‌های نمونه‌برداری و زمان برداشتن قلم از صفحه ترسیم بازنمایی می‌شود [۱۷]. البته در Task2 سیگنال‌های دیگری مانند فشار و زاویه قلم با افق نیز ثبت شده است. در هر مجموعه ۴۰ فرد حقیقی با تعداد ۲۰ امضای حقیقی و ۲۰ امضای جعلی ماهرانه وجود دارد.

پایگاه دوم از داده‌های ۱۱۰ فرد (۲۹ زن و ۸۱ مرد) در محدوده سنی ۲۱ تا ۵۲ سال شکل گرفته که در دانشگاه سابانسی^{۱۱} ترکیه شاغل یا دانشجو بوده‌اند [۱۸، ۱۹]. هر فرد طی دو جلسه (با فاصله یک هفته) ۲۰ امضاء ثبت کرده و تعداد ۱۰ نمونه امضای جعلی ماهرانه نیز دریافت شده است. در این آزمایش‌ها از سیگنال‌های زمانی حاصل از مختصات (X, Y) استفاده کردیم. برای این منظور دادگان تحت پیش پردازش‌های هموارسازی به‌وسیله فیلتر گوسی^{۱۱}، اصلاح زاویه چرخش الگو و مقیاس‌سازی سیگنال‌ها قرار گرفتند [۲۰]. مقیاس‌سازی به هر دو محور اعمال شده است.

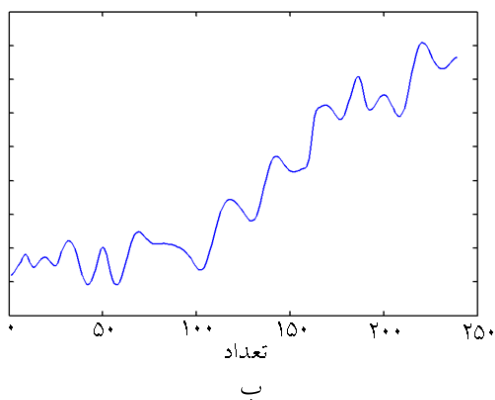
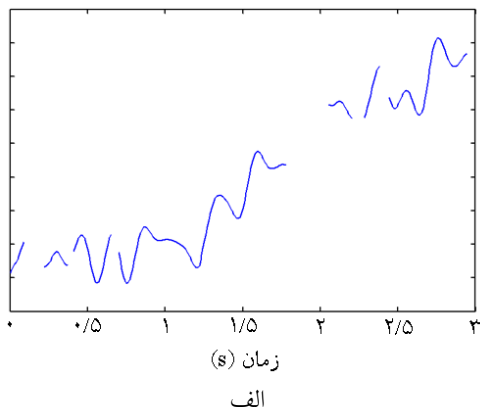
$$X = \frac{X - \text{mean}(X)}{\text{std}(X)} \quad (18)$$

$$Y = \frac{Y - \text{mean}(Y)}{\text{std}(Y)}$$

هم‌چنین از آنجا که اکثر امضاها به‌صورت قطعات گسسته هستند، ما آنها را پیوسته‌سازی کردیم. این عمل در فرایند هموارسازی و توسط یک فیلتر گوسی و غیرعَلّی هفت نقطه‌ای انجام می‌شود. در شکل ۷ برخی از الگوهای امضاء و در شکل ۸ سیگنال زمانی مختصات X قبل و پس از هموارسازی و پیوسته‌سازی مشاهده می‌شود.



شکل ۷- تعدادی از نمونه‌های امضای موجود در پایگاه دادگان؛ سمت راست پایگاه دادگان SVC2004 و سمت چپ پایگاه SigSA.



شکل ۸- تغییرات محور X در یک الگوی امضاء: الف) سیگنال گسسته؛ ب) پس از هموارسازی و پیوسته‌سازی

¹⁰ Sabanci

¹¹ Gaussian filter

برای دو گروه با تعداد نمونه n_1 و n_2 داریم:

$$t = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (20)$$

مقادیر بزرگتر t نشان‌دهنده فاصله اطمینان بزرگتر و بیانگر آن است که دو گروه مورد بررسی دارای اختلاف معنادارتری می‌باشند پس می‌توان از آن برای تشخیص قدرت طبقه‌بندی افراد حقیقی و جعلی بهره جست. ما نماد t را با نماد C بیان خواهیم کرد و با افزایش C توانایی تفکیک‌کنندگی آن معیار افزایش می‌یابد. بر پایه آزمون فوق مقادیر C برای تمام فاصله‌های حاصل از مقایسه امضاهای حقیقی و جعلی مربوط به هر فرد محاسبه و سپس مقادیر میانگین و انحراف معیار C ها تعیین می‌شود که در جدول ۲ نتایج نمایش داده شده است.

ملاحظه می‌شود که الگوریتم DTW_2 نسبت به DTW_1 در هر دو سیگنال دارای میانگین بالاتر و نیز انحراف معیار کمتر است. بنابراین روش پیشنهادشده در این مقاله برای سنجش شباهت الگوها، علاوه بر استحکام بیشتر دارای تغییرپذیری کمتری نسبت به افراد مختلف است. در واقع DTW_2 در تطابق نقاط سیگنال‌ها قادر به تطابق دقیق‌تر بوده و شباهت‌های ظاهری در برقراری تناظر کمتر مؤثر هستند.

۴- تصدیق امضاء

در این بخش به تعمیم آزمایش‌های گذشته بر روی سیگنال‌های زمانی متعدد حاصل از ترسیم الگوهای امضاء می‌پردازیم. به این ترتیب کاربرد روش پیشنهادی در مسئله تصدیق امضاء و قدرت افتراق آن در تشخیص الگوهای جعلی و حقیقی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مقادیر میانگین و انحراف معیار شاخص استحکام

DTW_2		DTW_1		سیگنال زمانی
σ_c	μ_C	σ_c	μ_C	
۱/۸۱	۳/۹۵	۱/۸۷	۳/۶۶	محور X
۲/۵۴	۵/۴۷	۲/۹۲	۵/۲۳	محور Y

تعداد ۳ الگوی حقیقی امضاء از هر فرد به عنوان الگوهای مرجع و باقی آنها برای مقایسه و ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. مقایسه الگوها با دو روش DTW مرسوم با نماد DTW_1 طبق معادله (۶) و روش پیشنهادی DTW_2 انجام می‌شود. پس از تعیین فاصله الگوها، فاصله حاصل را به مقیاس واحد نگاشت می‌کنیم و داریم:

$$D(DTW)_n = 1 - \frac{D(DTW) - \min(D(DTW))}{\max(D(DTW))} \quad (19)$$

با تبدیل فوق، فاصله کمتر به معنای شباهت کمتر است. پس از آن با تغییر سطح آستانه از صفر به یک می‌توان مقدار نرخ پذیرش اشتباه^{۱۲} (FAR) و نرخ رد اشتباه^{۱۳} (FRR) را به دست آورد و آن‌گاه نرخ خطای برابر^{۱۴} (EER) را تعیین کرد. EER نقطه‌ای است که دو خطای FAR و FRR با یکدیگر برابر می‌شوند. آزمایش‌ها با دو سطح آستانه فردی و عمومی صورت می‌پذیرد که در حالت فردی رابطه (۱۹) برای هر فرد جداگانه تعریف می‌شود و برای سطح آستانه عمومی کمترین و بیشترین مقادیر فاصله در کل دادگان به دست آمده است و سپس رابطه (۱۹) اعمال می‌شود.

در جدول ۱ نتایج حاصل از اعمال دو الگوریتم DTW_1 و DTW_2 درج شده است. با توجه به جدول، روش پیشنهادی در هر دو سطح آستانه و دو سیگنال زمانی از کارایی بالاتری برای تشخیص الگوهای جعلی و حقیقی برخوردار است و کاهش قابل توجهی را در خطای EER نشان می‌دهد.

نکته حائز اهمیت دیگر آن است که دریاپیم آیا نتایج فوق به نوع الگوی امضاء یا به عبارتی افراد وابستگی دارد؟ شاید در برخی DTW_1 مؤثرتر عمل کند. بدین منظور بررسی سازگاری^{۱۵} روش لازم است. از آنجا که طبقه‌بندی امضاها به دو گروه حقیقی و جعلی انجام می‌شود برای مقایسه میانگین‌های فاصله دو گروه می‌توان از آزمون آماری تی^{۱۶} استفاده کرد.

جدول ۱- مقدار EER بر حسب درصد

سیگنال زمانی	سطح آستانه فردی		سطح آستانه عمومی	
	DTW_1	DTW_2	DTW_1	DTW_2
محور X	۳۲/۰۶	۲۸/۱۳	۴۲/۷۴	۳۵/۹۱
محور Y	۲۲/۴۷	۲۰/۳۹	۳۱/۱۶	۲۸/۶۲

¹² False Acceptance Rate

¹³ False Rejection Rate

¹⁴ Equal Error Rate

¹⁵ Consistency

¹⁶ T-Student

دادگان ورودی برای آموزش و آزمایش طبقه‌بندی کننده‌ها به سه بخش تقسیم شد. با توجه به یکسان نبودن تعداد امضاها در پایگاه‌های مورد استفاده، از هر پایگاه ۲۰٪ از داده‌ها به عنوان الگوهای مرجع برای هر فرد حقیقی و ۲۵٪ الگوهای حقیقی به علاوه ۲۰٪ الگوهای جعلی ماهرانه برای آموزش و بقیه الگوها به منظور آزمایش استفاده شد. گروه جاعلان تصادفی نیز بدین صورت تعیین شدند که به ازای هر فرد حقیقی تعداد ۲۵ امضاء از دیگر افراد حقیقی موجود در پایگاه دادگان به شکل تصادفی انتخاب شد.

نتایج حاکی از آن است که الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش مرسوم DTW در جاعلان تصادفی ۱۱/۵٪ و ۶/۶٪ و در جاعلان ماهر ۱۶/۵٪ و ۱۴/۴٪ به ترتیب برای سطح آستانه فردی و عمومی خطا را کاهش داده است. این نتیجه نشان می‌دهد که الگوریتم ارائه شده در تطابق الگوهای مشابه به‌ویژه امضاها ناشی از جاعلان ماهر از قابلیت افتراق بالاتری برخوردار است. همچنین استفاده از پنجره پارزن در مقایسه با دیگر طبقه‌بندی کننده‌ها به خطای کمتری منجر می‌شود.

همچنین استفاده از سطح آستانه فردی که برای هر فرد تعریف می‌شود، دقت بیشتری را نتیجه می‌دهد. در واقع به دلیل یکسان نبودن توزیع آماری خطای جاعلان برای هر فرد حقیقی، سطح آستانه بهینه به منظور تشخیص و طبقه‌بندی جاعل برای تمام افراد حقیقی برابر نخواهد بود.

مقایسه روش‌های طبقه‌بندی الگوها نیز برتری روش پنجره پارزن را بیان می‌کند که نسبت به روش SVM باعث کاهش ۲۴/۱٪ و ۱۲/۸٪ خطای EER در گروه جاعل تصادفی و ماهر شده است.

شکل ۱۰ منحنی‌های خطای FAR بر حسب FRR را برای حالت سطح آستانه مشترک در گروه‌های جاعل مختلف نشان می‌دهد.

مقایسه بین روش‌های مختلف تصدیق امضاء به علت پایگاه دادگان غیریکسان دشوار است. بنابراین نتایج با آن دسته از تحقیقات که در آن از دادگان دو پایگاه SVC2004 و SigSA استفاده شده است، مقایسه می‌شود.

ویژگی‌های سیگنالی مورد استفاده عبارت‌اند از:

۱. سه مؤلفه موقعیت x, y, t :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (21)$$

۲. سه مؤلفه سرعت v_x, v_y, v_r :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (22)$$

$$v_r = \dot{r}$$

۳. پنج مؤلفه شتاب a_x, a_y, a_c, a_t, a_r :

$$a_r = \dot{v}_r$$

$$a_t = \dot{v}_t$$

$$a_c = v\dot{\theta}$$

$$\theta = \text{tg}^{-1}(v_y/v_x)$$

(23)

۴. پنج مؤلفه مشتق شتاب یا جرک J_x, J_y, J_c, J_t, J_r :

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

$$j_r = \dot{a}_r$$

$$j_t = \dot{a}_t$$

$$j_c = a\dot{\phi}, \quad \phi = \text{tg}^{-1}(a_y/a_x)$$

(24)

شکل ۹ ویژگی‌های سیگنالی دو الگوی حقیقی و جعلی را نشان می‌دهد. برای طبقه‌بندی الگوها از سه روش فیشر^{۱۷} (FLC)، پنجره پارزن^{۱۸} (PWC) و ماشین بردار پشتیبان^{۱۹} (SVM) با هسته RBF^{۲۰} استفاده شده است. در جداول ۳ و ۴ نتایج حاصل از طبقه‌بندی الگوها برای جاعل تصادفی و ماهر مشاهده می‌شود. منظور از جاعل تصادفی فردیست که بدون توجه به امضای حقیقی، امضای خویش را ثبت می‌کند.

جدول ۳- مقدار EER در گروه جاعلان تصادفی بر حسب درصد

طبقه‌بندی کننده	سطح آستانه فردی		سطح آستانه عمومی	
	DTW_1	DTW_2	DTW_1	DTW_2
FLC	۲/۲۴	۲/۰۳	۳/۸۱	۳/۶۹
PWC	۰/۹۷	۰/۹۲	۱/۵۸	۱/۴۶
SVM	۱/۳۲	۱/۰۶	۲/۱۹	۱/۹۳

جدول ۴- مقدار EER در گروه جاعلان ماهر بر حسب درصد

طبقه‌بندی کننده	سطح آستانه فردی		سطح آستانه عمومی	
	DTW_1	DTW_2	DTW_1	DTW_2
FLC	۴/۷۳	۴/۵۸	۷/۳۶	۶/۸۴
PWC	۳/۱۹	۲/۳۲	۴/۷۸	۳/۵۱
SVM	۳/۶۴	۲/۷۵	۵/۰۶	۴/۳۷

¹⁷ Fisher

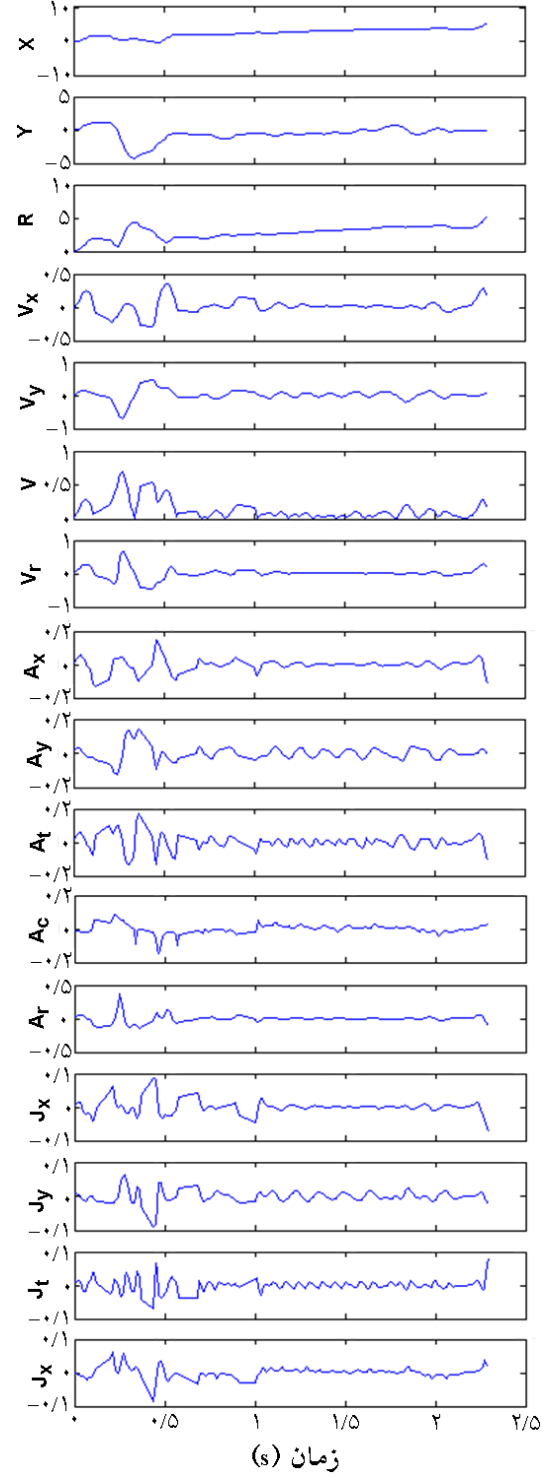
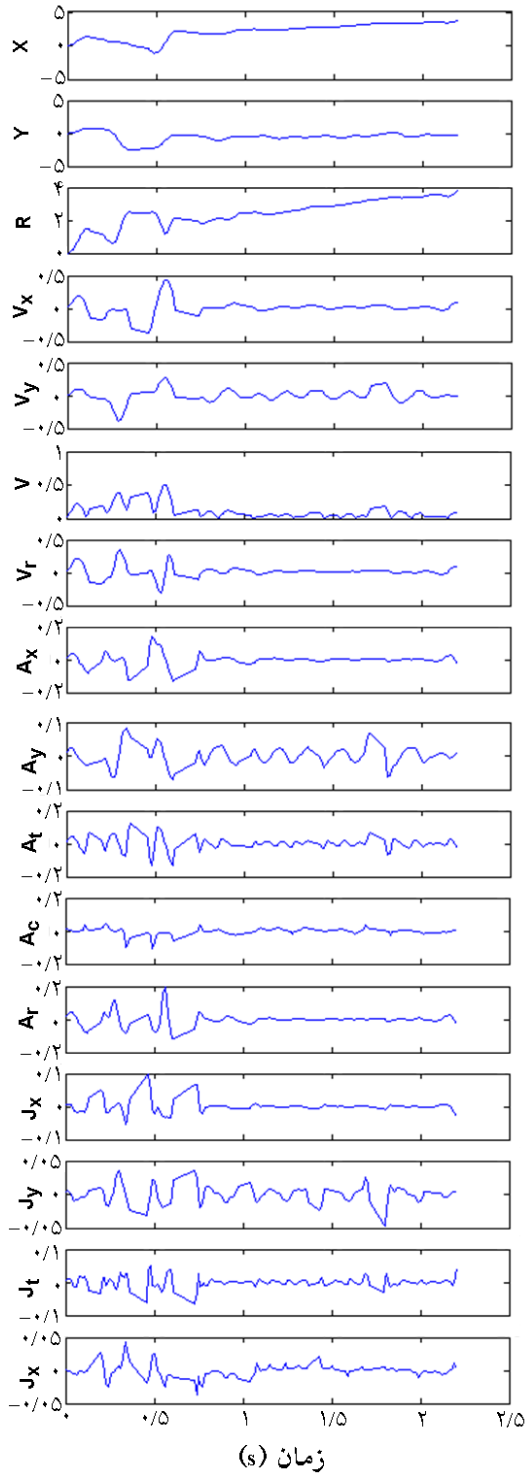
¹⁸ Parzen Window Classifier

¹⁹ Support Vector Machine

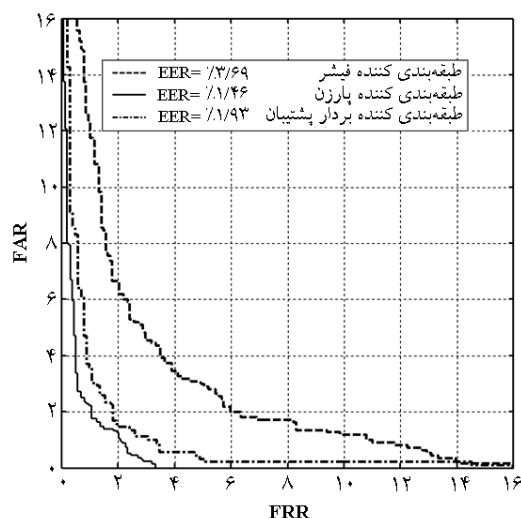
²⁰ Radial Basis Function

Jrank

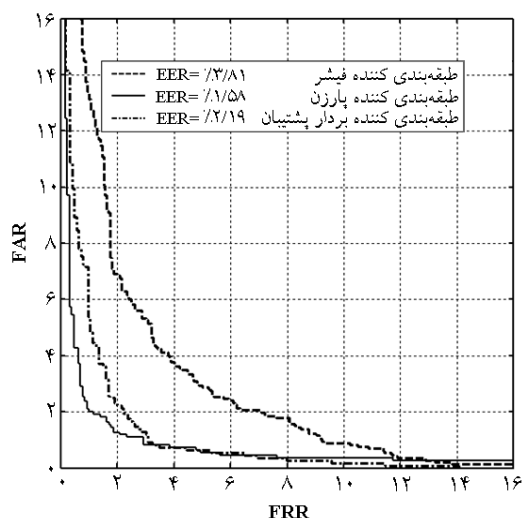
Jrank



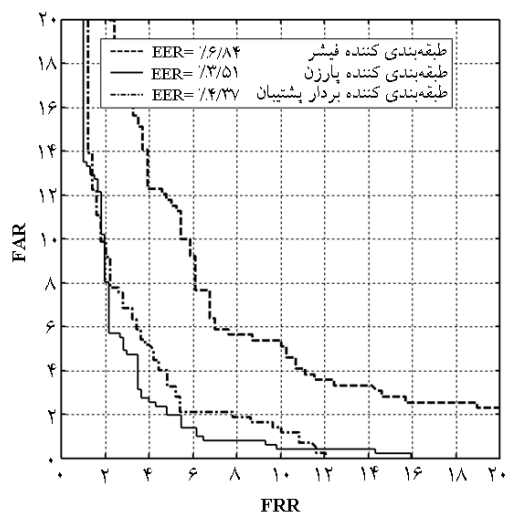
شکل ۹- الگو و ویژگی‌های سیگنالی: سمت راست امضای فرد حقیقی و سمت چپ امضای فرد جعلی ماهر



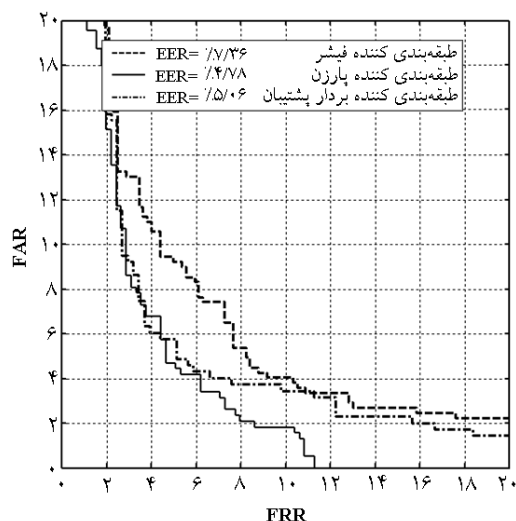
ب



الف



د



ج

شکل ۱۰- منحنی خطای FAR بر حسب FRR در گروه جاعلان تصادفی و ماهر در شرایط سطح آستانه عمومی (مشترک): الف) روش DTW_1 با جاعل تصادفی؛ ب) روش DTW_2 با جاعل تصادفی؛ ج) روش DTW_1 با جاعل ماهر؛ د) روش DTW_2 با جاعل ماهر

۵- نتیجه‌گیری

مدل‌های مختلف الگوریتم DTW قادر به بهبود توأمان سرعت و دقت نیستند و در واقع بین این دو معیار مصالحه صورت می‌پذیرد. در این مقاله سعی شده است با معرفی روشی جدید و اصلاح برخی قیود و شرایط محیطی بر آن، دقت در ارزیابی شباهت سیگنال‌های زمانی افزایش یابد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که روش پیشنهادی در مقایسه با ایده مرسوم DTW علاوه بر قابلیت بیشتر در برآورد شباهت سیگنال‌ها از استحکام بالاتری نیز برخوردار بوده و در تشخیص میزان اختلاف سیگنال‌ها نسبت به تغییرات نوع سیگنال دچار خطای کمتری می‌شود.

جدول ۵ نتایج برخی از این مطالعات را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. با بررسی نتایج مطالعات گوناگون می‌توان دریافت که اعمال یک روش واحد به دادگان تهیه شده در کشورهای مختلف، گاه نتایج بسیار متفاوتی را به‌دست می‌دهد که نشان دهنده تأثیر زبان و نوع الگوهای مرسوم افراد یک کشور برای ترسیم امضاء است. نتایج حاصل در مطالعه حاضر که با بهره‌گیری از دادگان افراد با زبان و ملیت‌های مختلف حاصل شده در مقایسه با روش‌های فوق عملکرد مناسب راهکار اتخاذی را در طبقه‌بندی امضاهای حقیقی و جعلی نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتایج تحقیقات با پایگاه دادگان مشابه در گروه جاعلان ماهر

(%) EER	ویژگی‌ها	راهکار	پایگاه دادگان	مرجع
Task1: ۲/۸۴ Task2: ۲/۸۹	Vx, Vy	DTW	SVC2004 Task1&2	یونگ ^{۲۱} و همکاران [۲۱]
۷/۲	x, y	DTW+ER2	SVC2004 Task2	لی ^{۲۲} و همکاران [۲۲]
DTW: ۱۴/۲۶ HMM: ۱۵/۰۴ ترکیب: ۱۰/۹۱	سیگنال‌های موقعیت و مشتق آنها	DTW, HMM	SVC2004 Task2	فایرز-آگولار ^{۲۳} و همکاران [۲۳]
۳/۳۹	Vx, Vy, V, Vp	DTW	SVC2004 Task2	دارز ^{۲۴} و همکاران [۲۴]
xy: ۶/۲۰ DTW: ۳/۳۰ xy+DTW: ۳/۰۳	x, y	DTW+FFT	SigSA	یانیکوگلو ^{۲۵} و همکاران [۲۵]
۳/۰۶	V, Cos(θ _v)	DTW	SigSA	خلیلی و همکاران [۲۶]
SVM-Euclid: ۱۳/۸۴ SVM-DTW: ۱۶/۰۶ SVM-LCSS: ۶/۸۴	x, y, p, θ _{az} , θ _{al}	SVM	SVC2004 Task2	گرایر ^{۲۶} و همکاران [۲۷]
۳/۵۱	سیگنال‌های موقعیت و مشتق آنها	DTW	SVC2004 + SigSA	روش پیشنهادی

[6] Kholmatov A., Yanikogla B., Identity authentication using improved online signature verification method; Pattern Recognition Letters; 2005; 26(15): 2400-2408.

[7] Sakoe H., Chiba S., A Dynamic Programming Approach to Continuous Speech Recognition; Proc. of the Int. Congress on Acoustics; 1971; Paper 20 c 13.

[8] Sakoe H., Chiba S., Dynamic-Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition; IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Proc.; 1978; 1(26): 43-49.

[9] Gavrilă D. M., Davis L. S., Towards 3-d model-based tracking and recognition of human movement: a multi-view approach; In Int. Workshop on Automatic Face- and Gesture-Recognition; IEEE Computer Society; Zurich; 1995.

[10] Schmill M., Oates T., Cohen P., Learned models for continuous planning; In 7th Int. Workshop on Artificial Intelligence and Statistics; 1999.

[11] Caiani E. G., Porta a., Baselli G., Turiel M., Muzzupappa S., Pieruzzi F., Crema C., Malliani A., Cerutti S., Warped-average template technique to track on a cycle-by-cycle basis the cardiac filling phases on left ventricular volume; IEEE Computers in Cardiology; 1998; 25: 73-76.

[12] Chu, S., Keogh, E., Hart, D., Pazzani, M., Iterative Deepening Dynamic Time Warping for Time Series; Proc. of the 2nd SIAM Int. Conference on Data Mining; Virginia; 2002.

[13] Keogh E., Exact Indexing of Dynamic Time Warping; In 28th Int. Conference on Very Large Data Bases; Hong Kong; 2002: 406-417.

[14] Myers C. S., A Comparative Study of Several Dynamic Time Warping Algorithms for Speech Recognition; Master's Thesis MIT; 1980.

اعمال روش پیشنهادی به مسئله تصدیق امضای پویا کاهش خطای EER به‌ویژه در گروه جاعلان ماهر را نشان می‌دهد. این مسئله بیانگر قابلیت افتراق آن در شناسایی بازه‌های زمانی دارای اعوجاج‌های غیرخطی و تغییرات دامنه‌ای در زوج سیگنال‌های تحت بررسی حقیقی-حقیقی و حقیقی-جعلی است.

مراجع

[1] Plamondon R., Srihari S. N., On-line and off-line handwriting recognition: A comprehensive survey; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; 2000; 22(1): 63-84.

[2] Fierrez J., Garcia J. O., Ramos D., Rodriguez J. G., HMM-based on-line signature verification: Features extraction and signature modeling; Pattern Recognition; 2007: 2325-2334.

[3] Ketabdar H., Richiardi j., Drygajlo A., Global feature selection for on-line signature verification; Proc. 12th Conf. of the Int. Graphonomics Society; Salerno, Italy; 2005.

[4] Feng H., Wah c., Online signature verification using a new extreme points warping technique; Pattern Recognition Letters; 2003; 24(1): 2943-2951.

[5] Lee J., Yoon H., Soh J., Chan B., Chung Y. K., Using geometric extrema for segment-to-segment characteristics comparison in online signature verification; Pattern Recognition; 2004; 37: 93-103.

²¹ Yeung

²² Lei

²³ Fierrez-Aguilar

²⁴ Doroz

²⁵ Yanikoglu

²⁶ Gruber

- [21] Yeung D. Y., Chang H., Xiong Y., George S., Kashi R., Matsumoto T., Rigoll G., SVC2004: First international signature verification competition; In Proc. of Int. Conf. on Biometric Authentication; Springer LNCS-3072; 2004; 16-22.
- [22] Lei H., Palla S., Govindaraju V., ER2: An Intuitive Similarity Measure for On-Line Signature Verification; Proc. 9th Int. Workshop Frontiers in Handwriting Recognition, 2004.
- [23] Fierrez-Aguilar J., Krawczyk S., Ortega-Garcia J., Jain A., Fusion of local and regional approaches for on-line signature verification, In Advances in Biometric Person Authentication; LNCS, eds. S. Z. Li, Z. Sun, T. Tan, S. Pankanti, G. Chollet, and D. Zhang, (Springer-Verlag, Berlin, Germany), 3781; 2005; 188-196.
- [24] Doroz R., Porwik P., Para T., Wrobel K., Dynamic Signature Recognition Based on Velocity Change of Some Features; Int. J. Biometrics; 2008; 1(1): 47-62.
- [25] Yanikoglu B., Kholmatov A., On-line signature verification using fourier descriptors; J. on Advances in Signal Processing; 2009.
- [26] Khalil M. I., Moustafa M., Abbas H. M., Enhanced DTW based on-line signature verification; In Proc. 16th IEEE Int. Conf. on Image Processing (ICIP); 2009; 2713-2716.
- [27] Gruber C., Gruber T., Krinninger S., Sick B., On-line Signature Verification With Support Vector Machines Based on LCSS Kernel Functions; IEEE Trans. Syst. Man Cybernet. Part B: Cybernetics; 2010; 31(6): 1059-1073.
- [15] Keogh E., Pazzani M., An Enhanced Representation of Time Series Which Allows Fast and Accurate Classification, Clustering and Relevance Feedback; Proc. Of the 14th Int. Conference of Knowledge Discovery and Data Mining; 1998; 239-241.
- [۱۶] رشیدی سعید، فلاح علی، توحیدخواه فرزاد، اصلاح الگوریتم DTW در راستای افزایش دقت و استحکام سنجش شباهت سری‌های زمانی و کاربرد آن در تصدیق امضاء، چهاردهمین کنفرانس کامپیوتر ایران، دانشگاه امیرکبیر؛ اسفند ۱۳۸۷.
- [17] The First International Signature Verification Competition (SVC 2004); <http://www.cs.ust.hk/svc2004>.
- [18] SigSA; On-line Handwritten Signature Database, <http://biometrics.sabanciuniv.edu/sigsa>.
- [19] Kholmatov A., Yanikoglu B., Susig: an on-line signature database, associated protocols and benchmark results; Pattern Analysis & Applications; 2008; 20-26.
- [۲۰] رشیدی سعید، فلاح علی، توحیدخواه فرزاد، سیستم تصدیق امضای پویای دو مرحله‌ای مبتنی بر ویژگی‌های پارامتری و سیگنالی، شانزدهمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران، دانشگاه علوم پزشکی تهران؛ دی ۱۳۸۸.