

頭部と両手腕のモーションデータの DTW距離に基づくVRユーザ識別

明治大学 総合数理学部

三浦晃暉 菊池浩明

研究背景

VR技術の普及率が高まっている

- メタバースが次世代のインターネットの利用形態として注目されている



出典『メタバース進化論』

VR空間では**匿名・異なる容姿**で他人と交流することができる



明石家さんまさん



八都宿ねねさん

課題

すでに3Dの時系列データは歩容認証に使えることが判明している

→VRの時系列データも現実世界での個人認証に利用でき、
VR空間の匿名性が損なわれてしまう可能性がある

先行研究

- 階層的分類モデル[Nairら 2023]
 - “Beat Saber”プレイヤー50,000人以上を識別を行い、232次元の特徴量を用いて10秒で73%、100秒で9割超の精度を達成した
 - マルチクラス分類器[Liebersら 2023]
 - VR環境での行動的バイオメトリクス of 安定性と時間経過を検証した
-
- Vivek Nair and Wenbo Guo, Justus Mattern, Rui Wang , James F. O’Brien, Louis Rosenberg, Dawn Song, “Unique Identification of 50,000+ Virtual Reality Users from Head & Hand Motion Data”, the 32nd USENIX Security Symposium, pp.895-910, USENIX, 2023.
 - Jonathan Liebers and Christian Burschik, Uwe Gruenefeld, Stefan Schneegass, “Exploring the Stability of Behavioral Biometrics in Virtual Reality in a Remote Field Study”, Virtual Reality Software and Technology 2023, pp.1-12, VRST, 2023.

先行研究の課題

- 頭と両手の座標や回転量の統計量と
いった**静的特徴量**で識別していた

- Beat Saberのデータであった
 - Beat Saberは前方から迫ってくる
ブロックをリズムに合わせて切る
VRリズムゲーム
- 他のゲームでもリスクがあるか不明

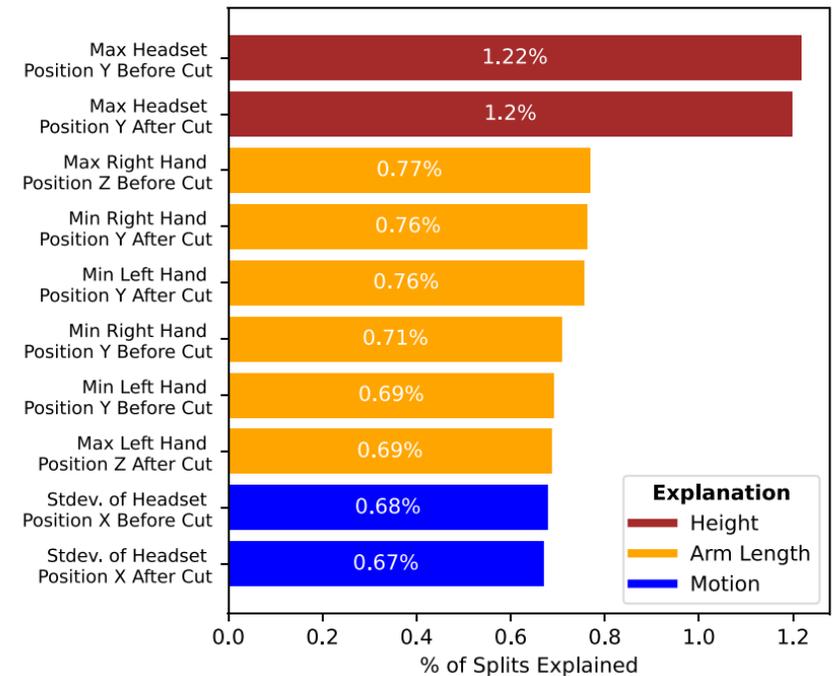


Figure 15: Explanation for 10 most important features.



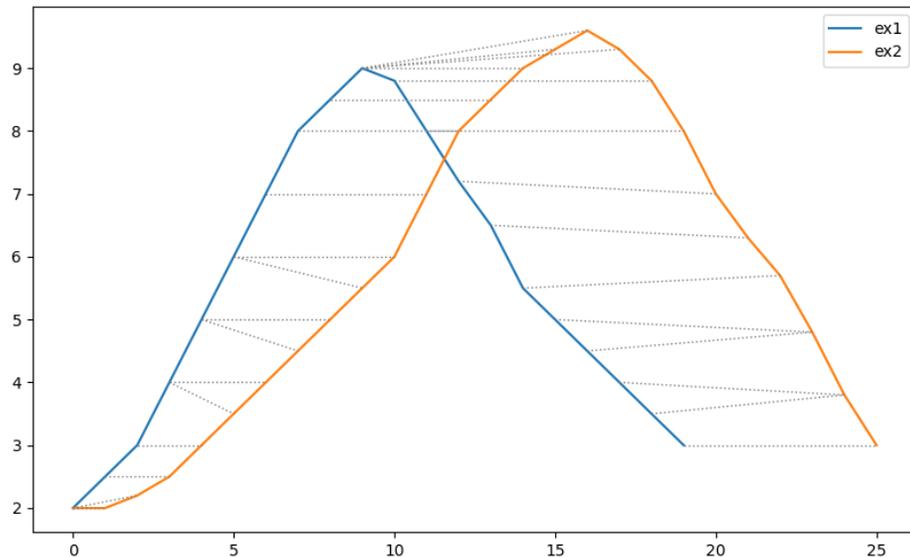
Beat Saber

研究目的

- VR体験中のモーションデータから、動作などの動的特徴量を用いて、個人がより正確に識別されるリスクを明らかにする
 - Beat Saber以外のモーションからのリスクも明らかにする

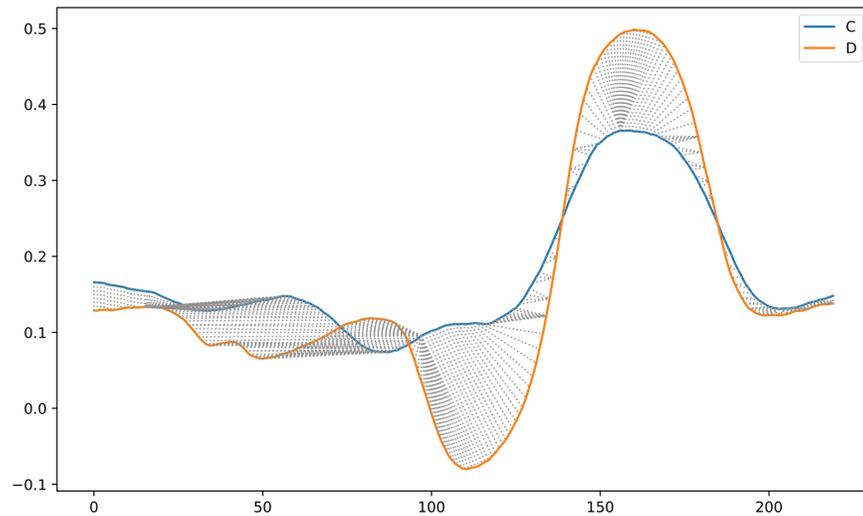
新規性：DTW (Dynamic Time Warping)

- 時系列データ同士の類似度を測る際に用いる手法の一つ
- 2つの時系列の各点の距離を動的計画法を用いて最も距離の小さい点の組み合わせを見つける
- 動作がどれだけ似ているかを定量的に評価できる



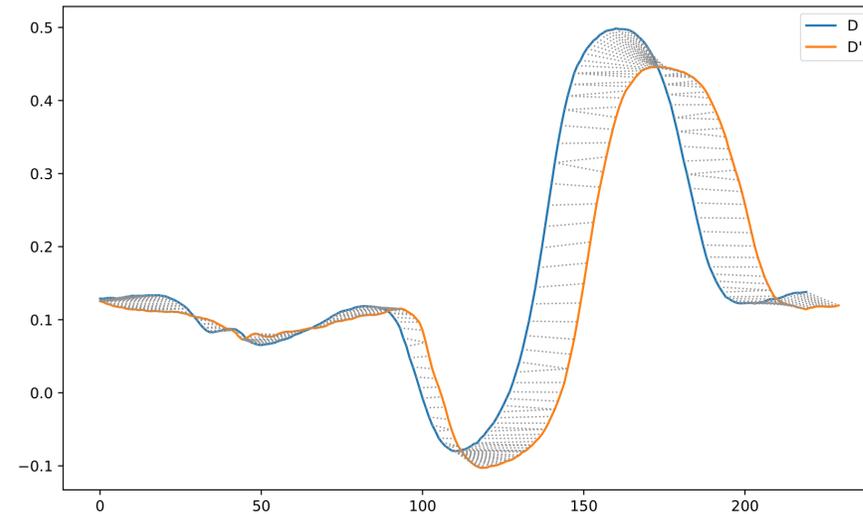
異なる長さの時系列であっても評価できる

DTWの適用例



被験者CとDの右手のx座標のデータのDTWの適用例

CとDのDTW距離は50.48
他人同士



被験者D同士の右手のx座標のデータのDTWの適用例

DとD'のDTW距離は15.68
本人同士

>

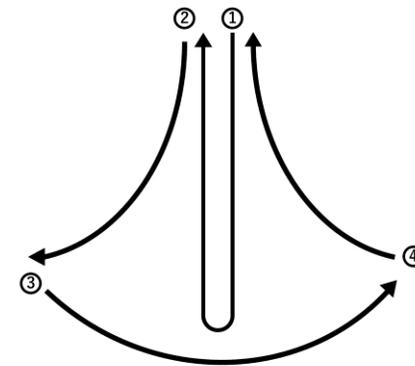
提案個人識別

方法

- テストデータとテンプレートデータ間の時系列データのDTW距離を算出する
- 最もDTW距離が小さかったテンプレートデータの該当者を識別結果とする

動作

- 四拍子の指揮
 - 単純な動作で個人差が出やすい



四拍子の指揮の例

リサーチクエスチョン

RQ1：四拍子のリズムが正確に繰り返されているかどうか、リズムに対する個人差はあるか？

RQ2：DTW 距離を用いた提案方式と静的特徴量による従来方式 (Liebersら)とで、個人識別リスクが高いのはどちらか？

実験方法



Meta Quest3

	モーション	DTW, RF	RQ
実験1	四拍子	✓	RQ1, RQ2
実験2	Beat Saber	✓	RQ2

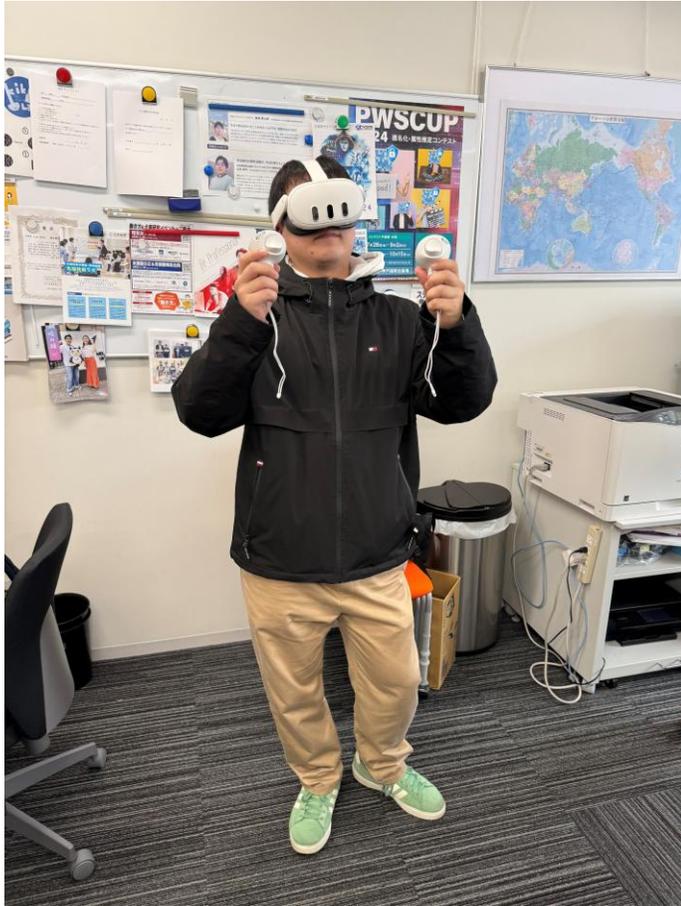
実験1

- Unityのアプリケーションを通してMeta Quest3のHMDと両手コントローラの3次元座標を取得する
- 被験者12名の四拍子の指揮を6回測定し、各被験者の6回のデータを3つのグループに分割する
- 各グループについて、そのグループをテストデータ、残りの2グループをテンプレートデータとして各手法を適用する

実験2

- Liebersらの実験をDTWで行う
 - 単一セッション学習：最初のセッションのみで学習、後続セッションでテスト
 - 複数セッション学習：あるセッションでテストする際、それ以前のセッションすべてで学習
 - 被験者は1セッション当たり3回以上プレイしたデータを提出する
 - 8セッション以上提出した被験者8人(N=8)と4セッション以上提出した被験者15人(N=15)の2グループで実施
 - 最初にスコアが上昇した動作を使う
- 重み付きF1スコアで評価する

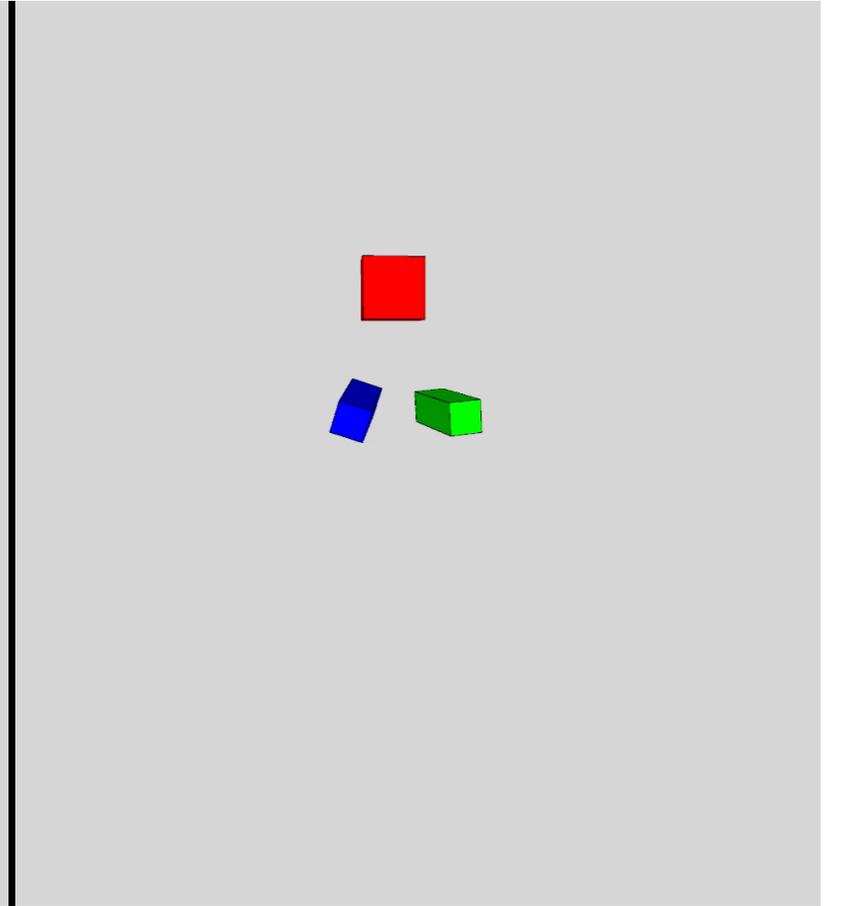
実験1：実験の様子



Aさん

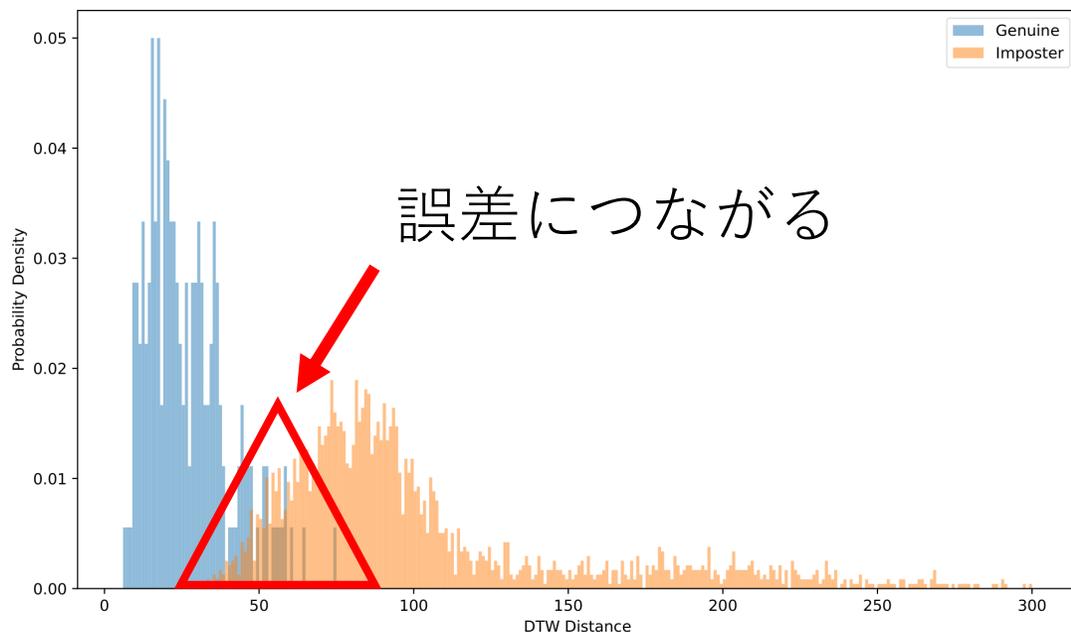


Aさん



Bさん

実験1：DTW距離分析



本人同士と他人同士のDTW距離の確率分布

本人同士：小さい値に集中
 他人同士：広い範囲に分布

各被験者のフレーム数統計量

被験者	平均値	標準偏差
A	232.5	8.3
B	180.3	13.3
C	224.3	13.4
D	225.7	11.6
E	208.5	7.2
F	202.7	20.6
G	227.7	21.1
H	222.2	15.9
I	186.5	15.3
J	246.8	9.1
K	167.7	11.8
L	221.2	10.6

リズムが**安定**している

リズムが**変動**している

四拍子が**長い**

四拍子が**短い**

四拍子のリズムに**個人差がある**

実験1：実験結果

提案：DTWによる識別結果

真 \ 推定	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1
G	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6

先行研究：ランダムフォレストによる識別結果

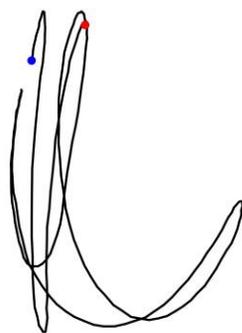
真 \ 推定	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0
F	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	1
H	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6

実験1：考察

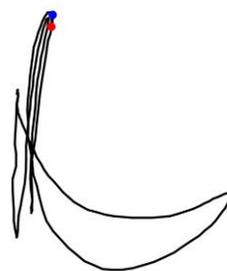
被験者Fが被験者Lと推定された

→両者の四拍子の**手の振り方が似ている**

(例)



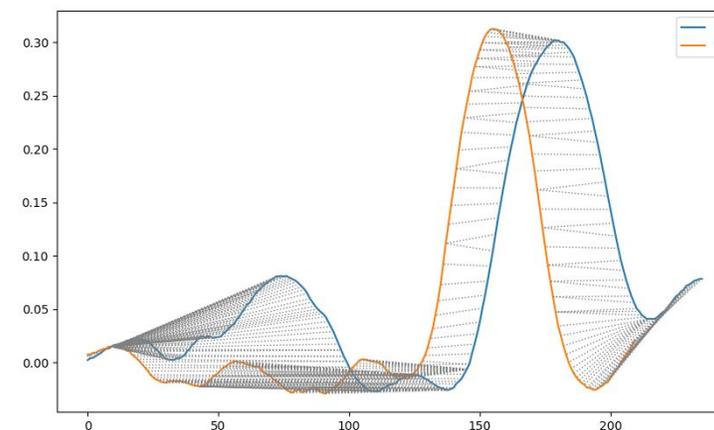
被験者F



被験者L

被験者FとL間のDTW距離

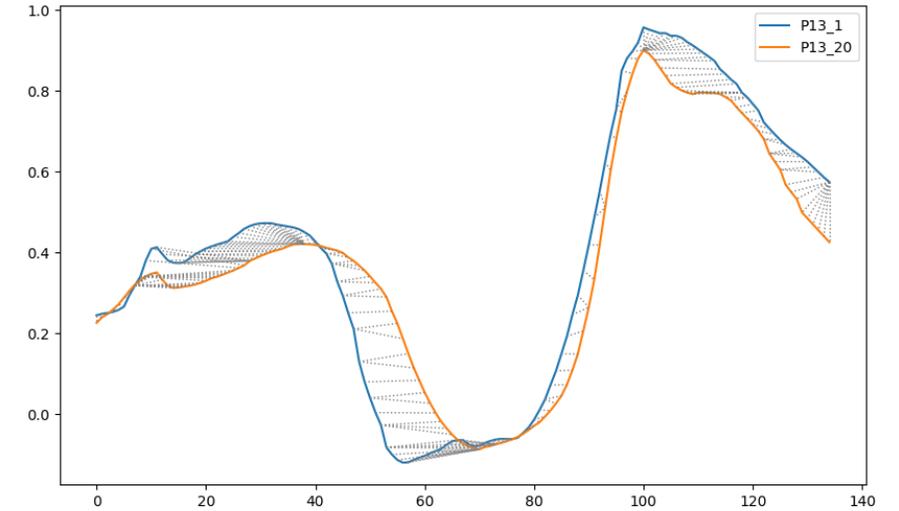
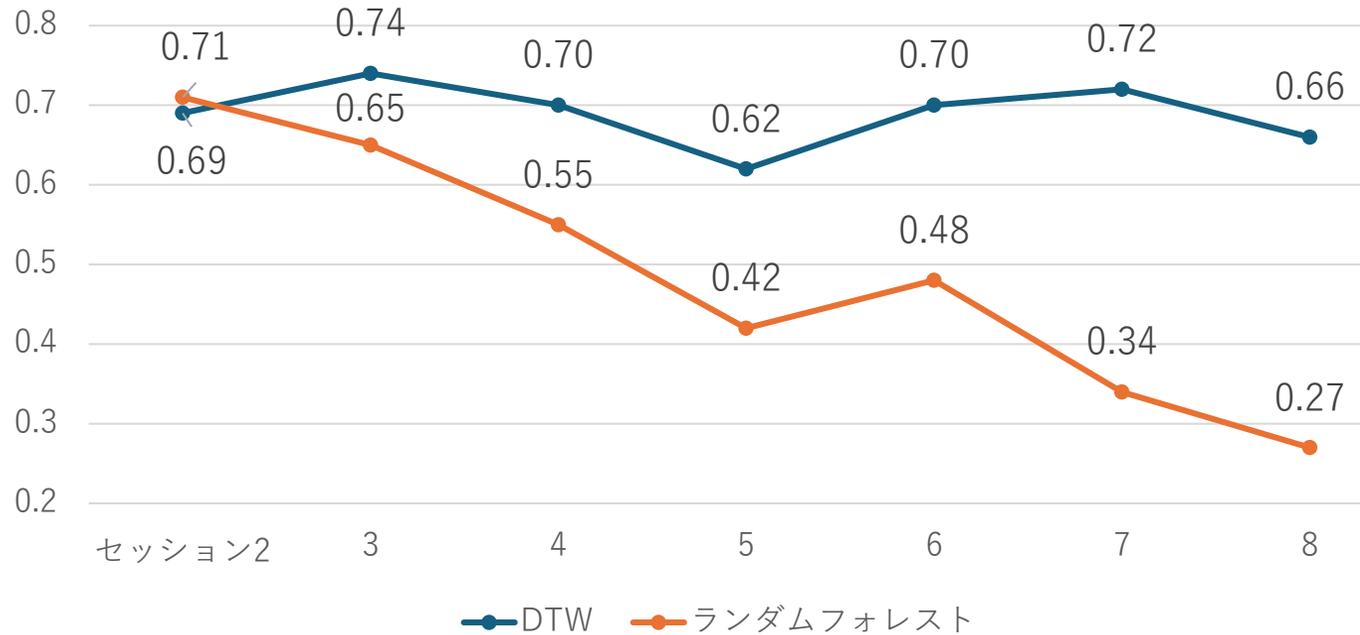
被験者FとL間のDTW距離			
テスト		F_1	
テンプレート			
本人	F_3	64.69	
	F_4	57.34	
	F_5	58.46	
	F_6	58.62	
	他人	L_3	<u>39.10</u>
		L_4	44.23
L_5		44.18	
L_6		40.62	



被験者FとLの右手のx座標のデータのDTWの適用例

実験2：実験結果(N=8)

2手法の精度比較



P13の1回目と20回目の右手のx座標のデータのDTWの適用例

DTW はランダムフォレストと比べ、時間経過による動作の変化の影響を受けにくい
→試行回数が増えると、プレイは**上達**していくと予想される
→DTWはプレイの上達による細かい**タイミングのずれに強い**

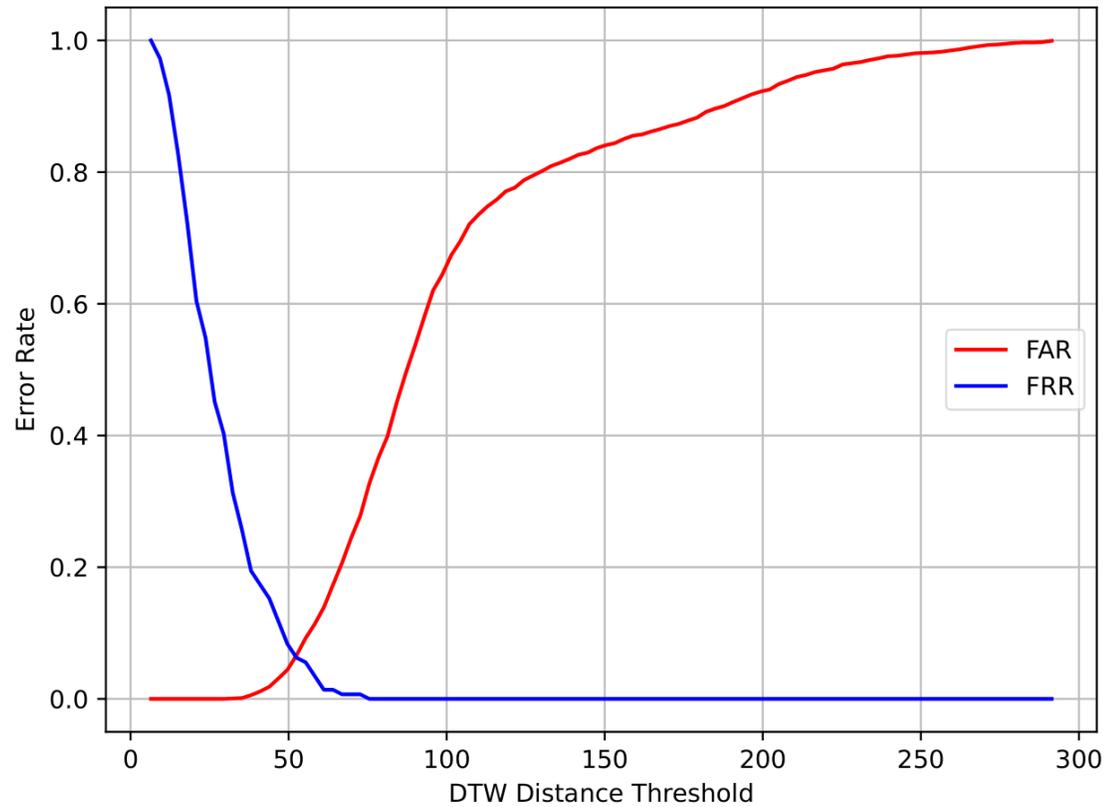
考えられる対策

- インターネット上にアップロードする際、詳細な動き情報は除去し、大まかな動きの情報のみを公開する
 - 一般化や1秒あたりのフレーム数をいくらか落として、粗い粒度のデータにして個人差を低減する
- モーションデータにノイズを付加する

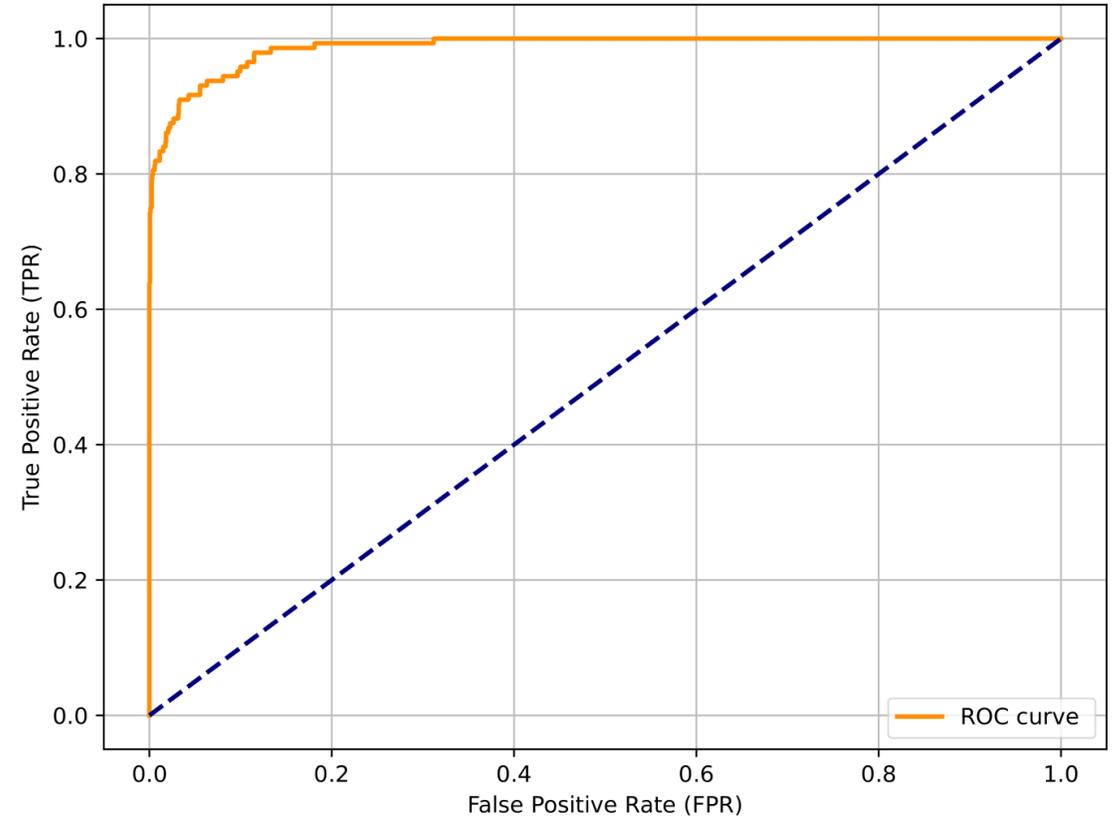
まとめ

- 四拍子の指揮の動作と Beat Saber の動作に対して DTW を用いた個人識別を行った
- RQ1：四拍子のリズムが正確に繰り返されているかどうか、リズムに対する個人差はあるか？
 - 四拍子のリズムに個人差はあるが、リズムが正確かどうかは被験者によって異なる
- RQ2：DTW 距離を用いた提案方式と静的特徴量による従来方式 (Liebersら) とで、個人識別リスクが高いのはどちらか？
 - 実験結果1と実験結果2により、DTWはRFより個人識別リスクが高い

FAR・FRRのトレードオフとROC曲線



FARとFRRのトレードオフ



ROC曲線