

# 静電容量型伸びセンサを用いた 柔軟性・伸縮性のある曲げセンサ

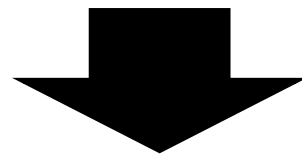
立命館大学 スポーツ健康科学部  
教授 塩澤 成弘

2024年10月3日

# 曲げセンサの必要性

人間には多数の関節が存在

➡関節の角度により、姿勢や動作が決定

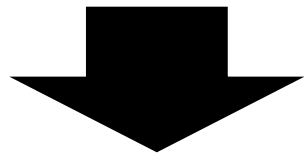


人間の運動学／力学的な運動や状態を  
正確に把握するためには  
各関節の正確に捉えることが不可欠

# 曲げセンサの必要性

人間には多数の関節が存在

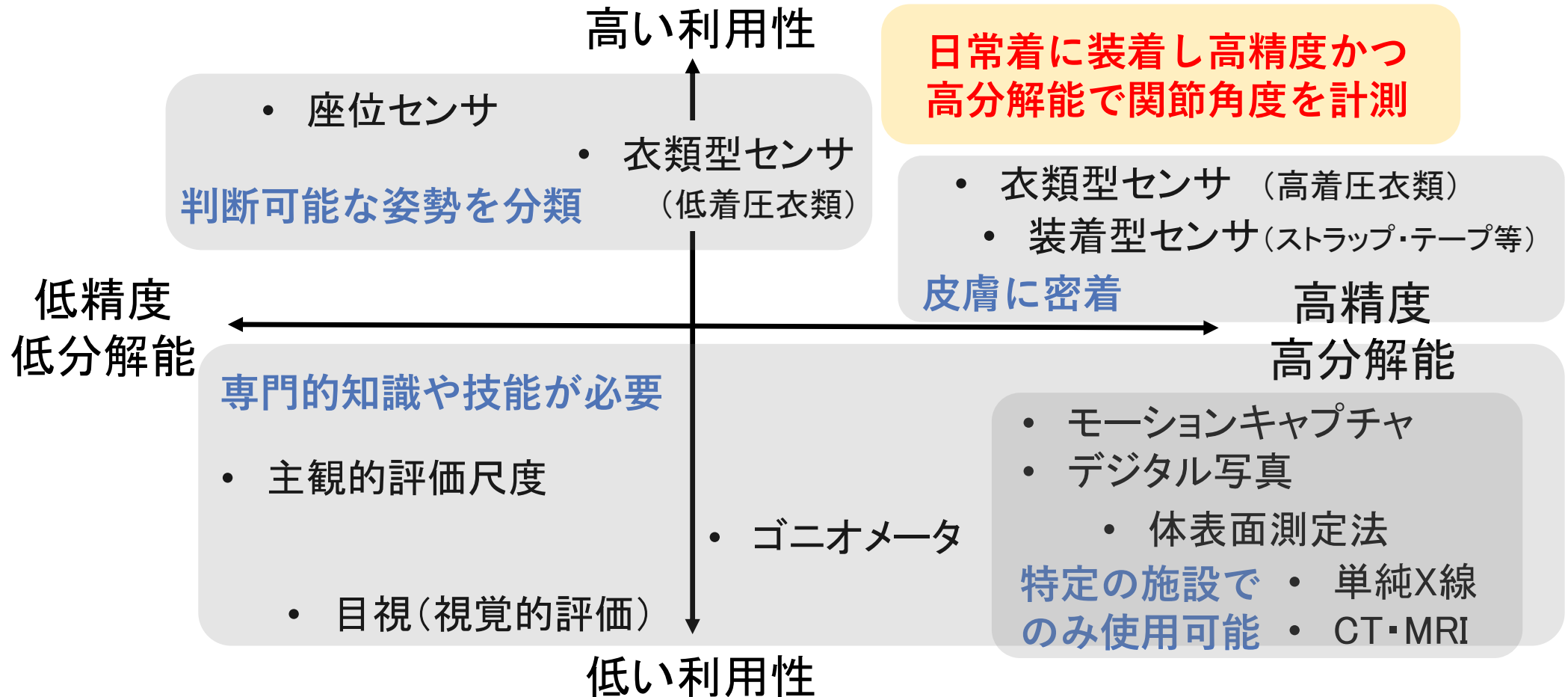
➡関節の角度により、姿勢や動作が決定



人間の運動学／力学的な運動や状態を  
正確に把握するためには  
各関節の正確に捉えることが不可欠

# 関節角度の計測方法

※利用性：場所や専門知識に左右されず，無意識かつ低拘束で使用できる



# 従来技術とその問題点

□ 臨床施設・実験室環境下での関節角度計測(すでに多く知見が蓄積されている)

✓ 多項目かつ高精度な情報を取得できる

✖ 専門家が必要

✖ 特定の場所

✖ 高価

□ 日常生活下での関節角度計測(未だに広く普及していない)

✓ 特定の膨大な情報を取得できる

□ ウェアラブルセンサ

ストラップ・テープ・高着圧衣類  
によるノイズ対策が一般的



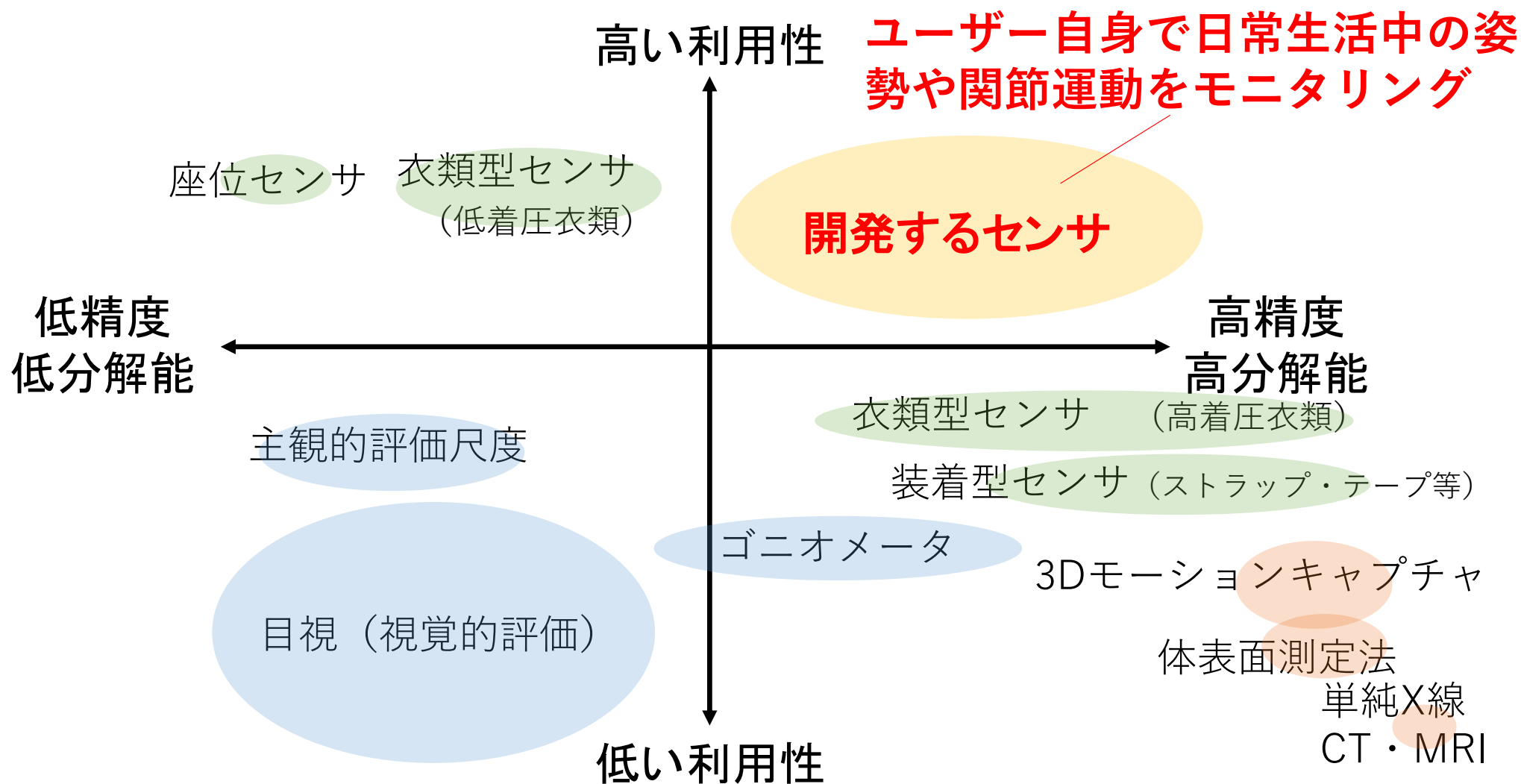
日常着のような緩い衣類では計測精度が低下

普及には

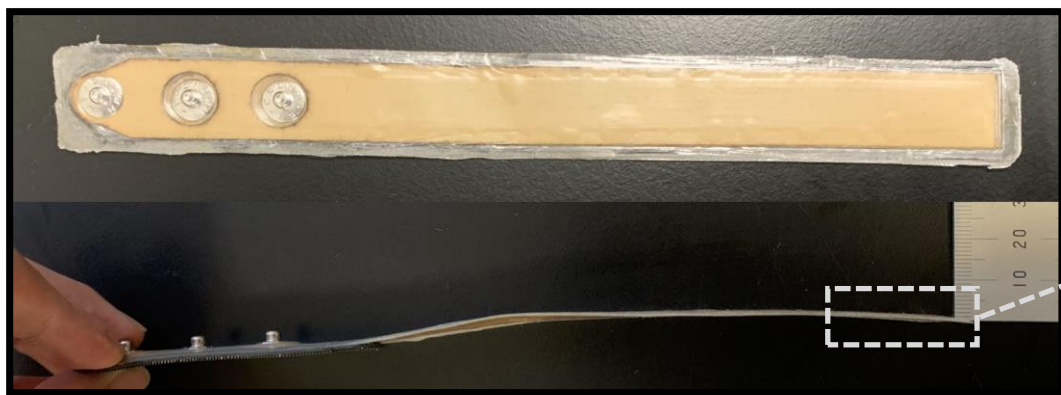
1. 高い計測精度、高分解能
2. 高い利用性(場所や専門知識に左右されず、  
無意識かつ低拘束で使用できる)

が必要

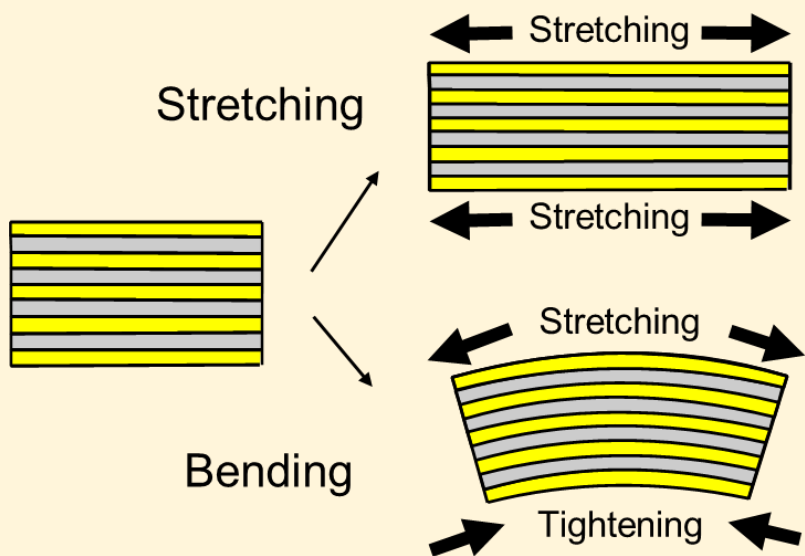
# 開発技術の位置づけ



# 開発センサ<sup>1)</sup>



$C_U$ と $C_L$ の2対のコンデンサを形成



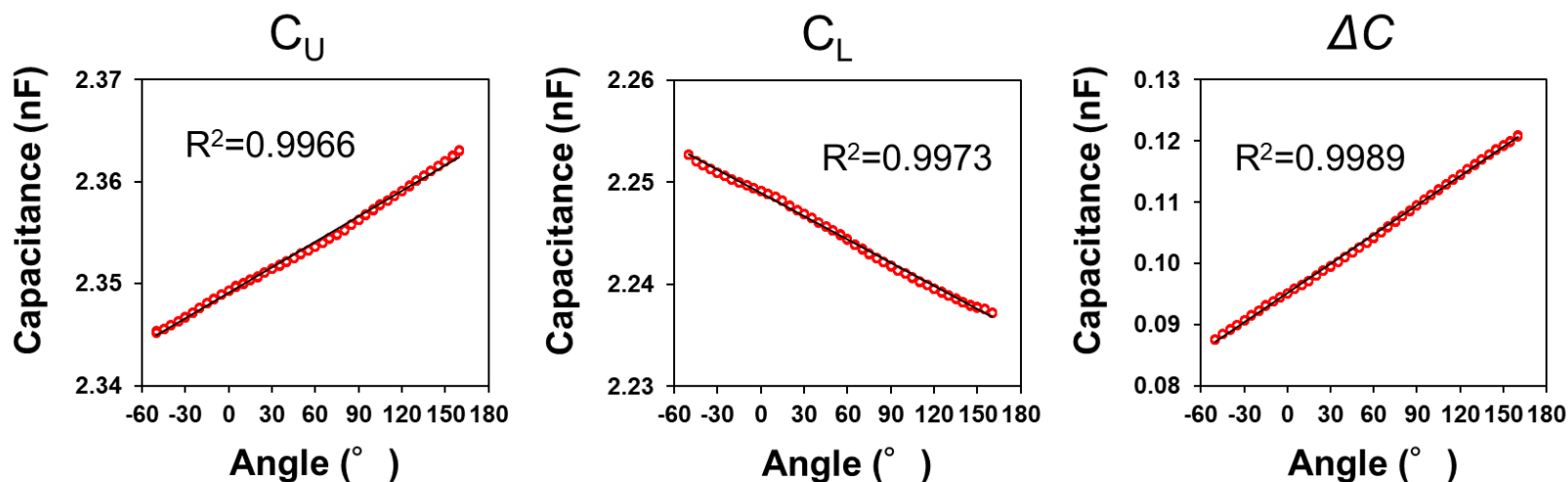
- 2層のコンデンサ $C_U$ ,  $C_L$ が伸びた場合  
 $C_U$ ,  $C_L$ はともに、静電容量が増加
- 2層のコンデンサ $C_U$ ,  $C_L$ が曲がった場合  
 $C_U$ は静電容量増加,  $C_L$ は静電容量低下

□  $C_U$ と $C_L$ を差分する  $\Delta C = C_U - C_L$

→伸びを打ち消し, 曲げを検出するセンサとなる

# 開発センサ(静特性) 1)

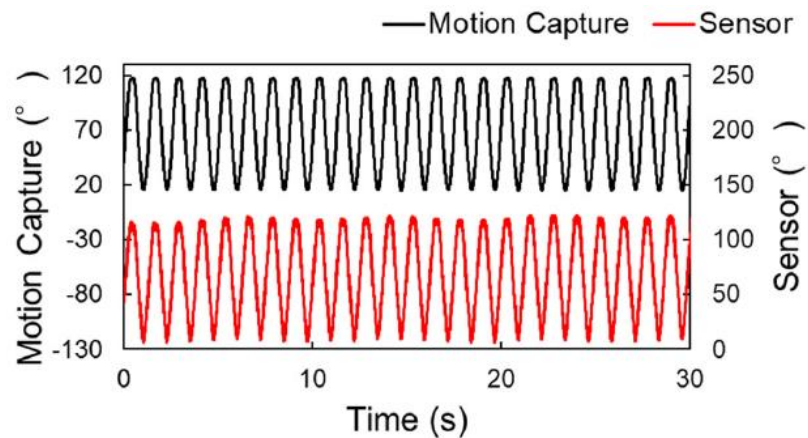
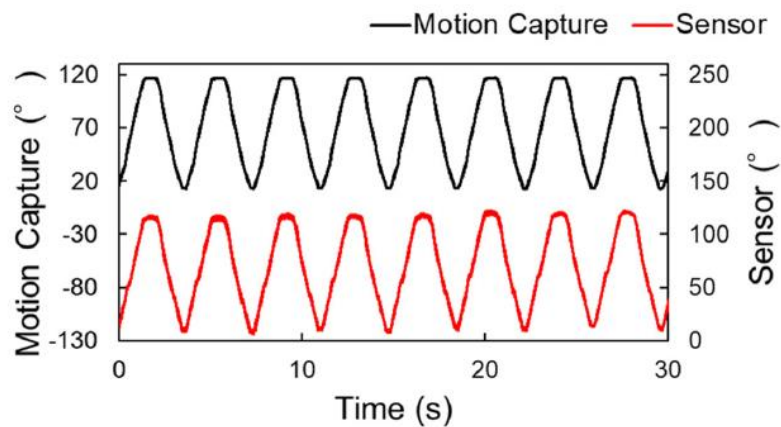
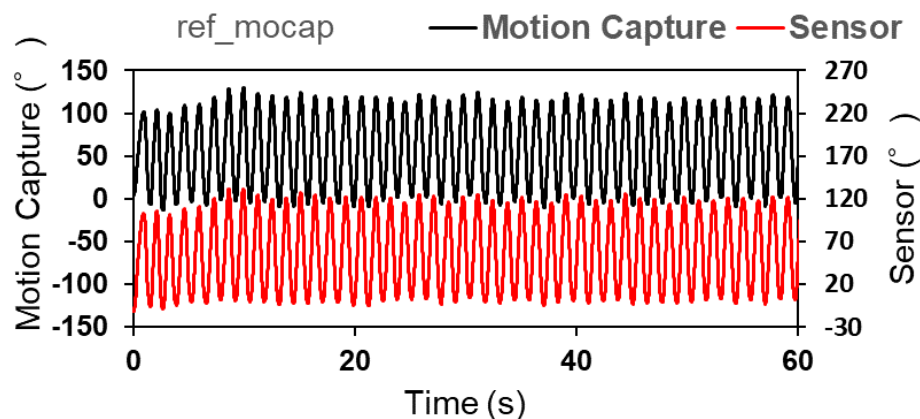
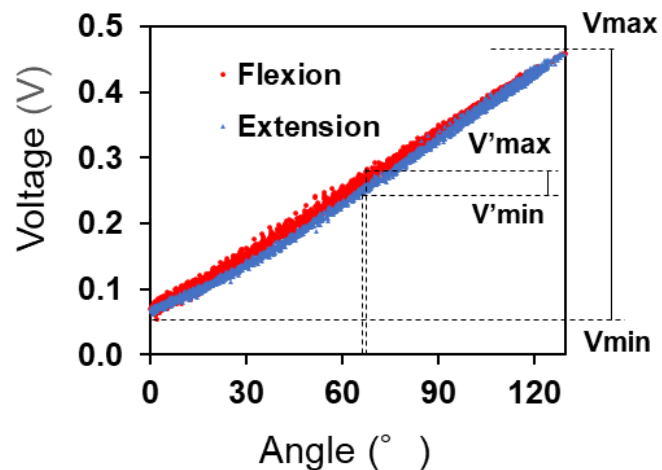
- ケミカルインピーダンスアナライザ(IM3590, Hioki)
- 振幅±2.5 V, 周波数5 kHz
- 50~160° の範囲で静電容量変化を計測



$\Delta C$ に高い相関性( $R^2=0.99$ )



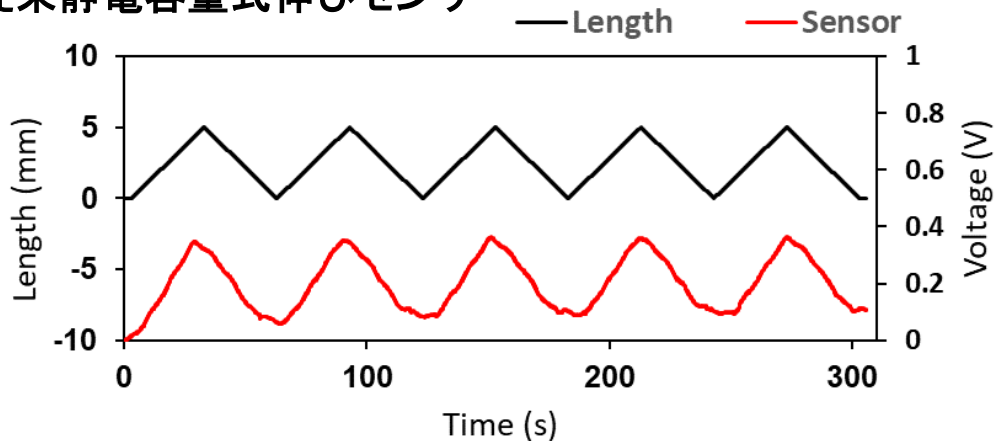
# 開発センサ(動特性) 1)



# 開発センサ(伸縮に対する特性) 1)

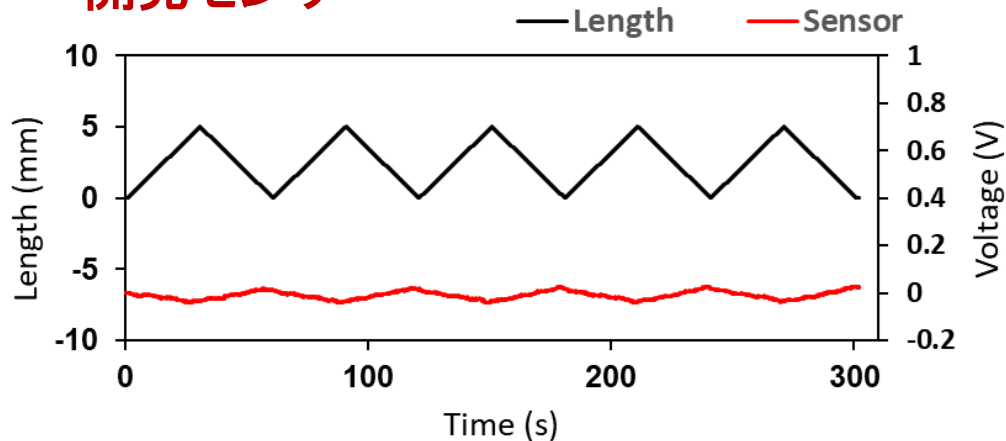
- 卓上型引張圧縮試験機(MCT-2150, A&D)
- 10 mm/min の速度
- 5 mm の伸張サイクルを5回
- 単層構造センサ(従来) vs 2層構造センサの比較

従来静電容量式伸びセンサ



伸縮の影響大

開発センサ

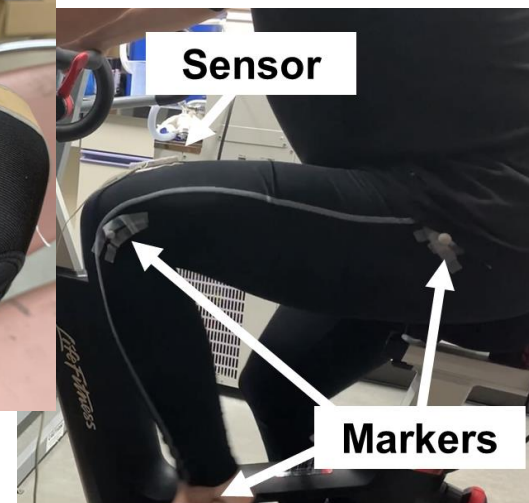
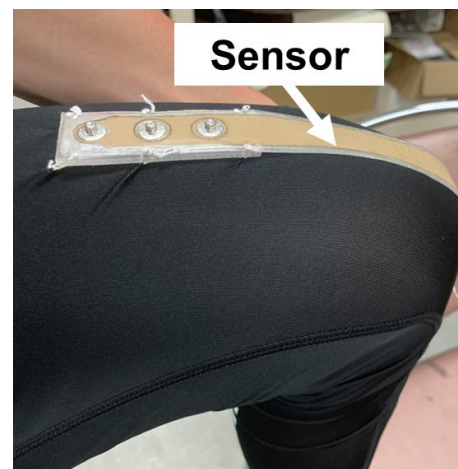
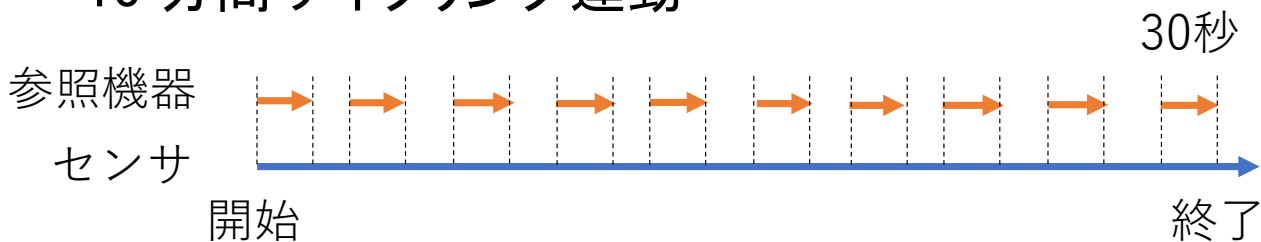


伸縮の影響小

# サイクリング運動中の膝関節角度計測例

## □ 実験方法

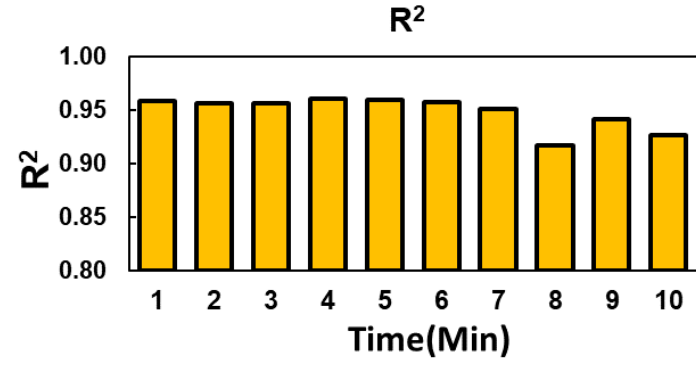
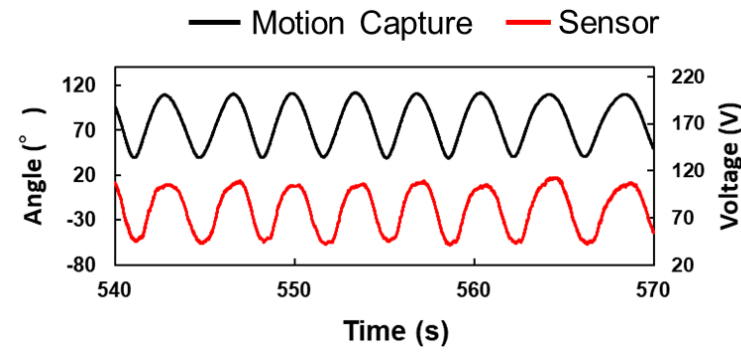
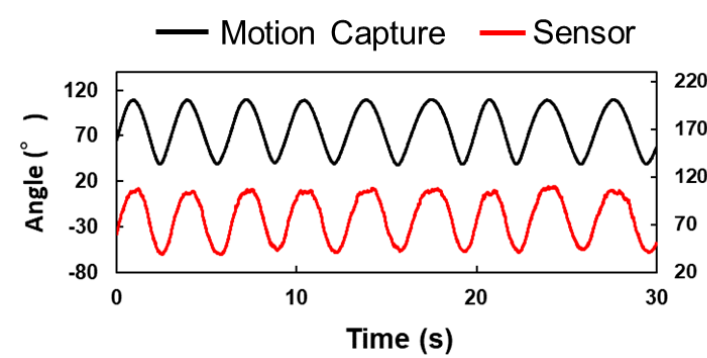
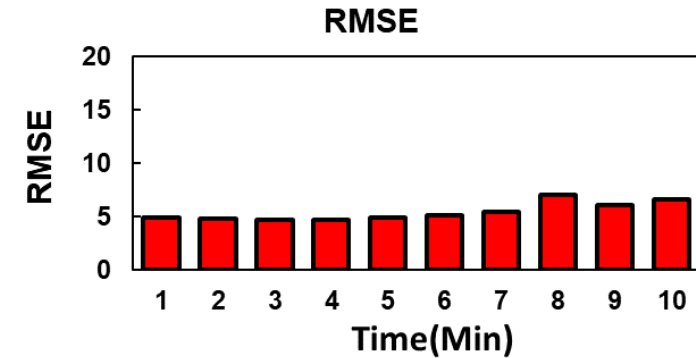
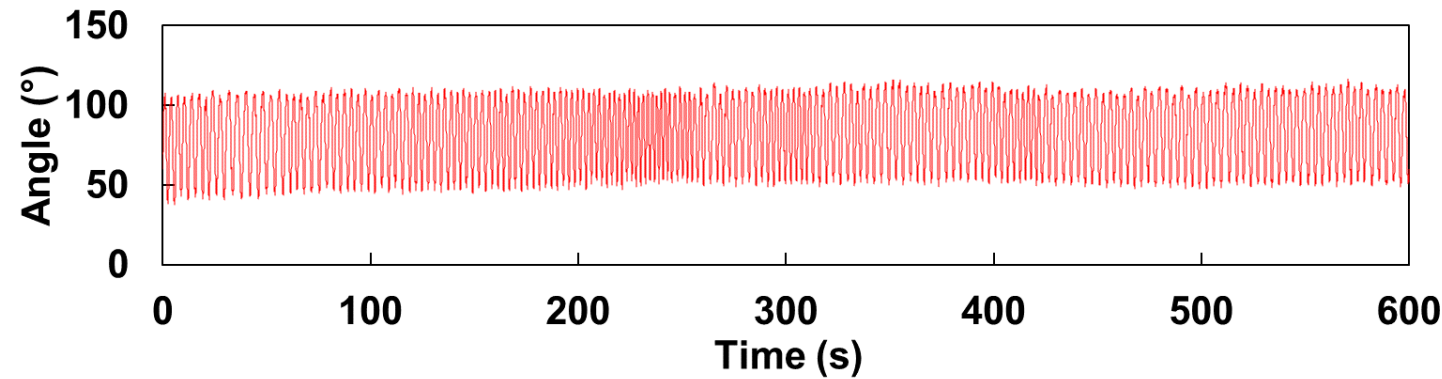
- 健常成人男性1名 (年齢28 歳、体重56.5 kg、身長162.5 cm)
- レギンス (MCM8858, UNDER ARMOUR) にセンサを刺繍で縫付
- ペダルの回転速度 : 30 rpm
- 10 分間サイクリング運動



## □ 解析方法

- 30秒間 × 10 個に分離されたセンサの出力電圧と参照角度をそれぞれ回帰分析
- 推定角度と $R^2$ , RMSEを算出

# サイクリング運動中の膝関節角度計測例<sup>1)</sup>



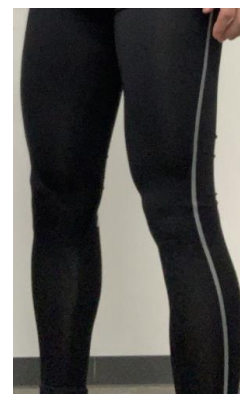
電磁干渉を受けず、10分間のRMSEは4.7~7.0°

R<sup>2</sup>は0.917~0.960

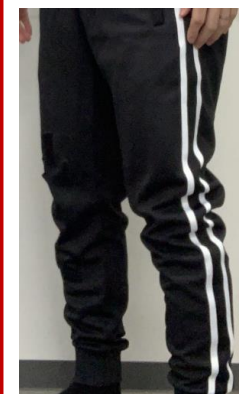
# 日常着を想定した低着圧衣類での 歩行・走行の動作計測<sup>2)</sup>

## □実験方法

- センサをポケットに収納して装着(図)
- 参照機器: 3Dモーションキャプチャ
- 歩行(2, 4 km/h)それぞれ180秒間(被験者17名)
- 走行(8, 10, 12 km/h)それぞれ90秒間(被験者20名)



密着した衣類



低着圧衣類

## □解析方法

- 前後15秒のデータを除いて抽出
- デジタルフィルタ(0.2 Hzー5.0 Hz)
- センサの出力電圧と参照角度の関係



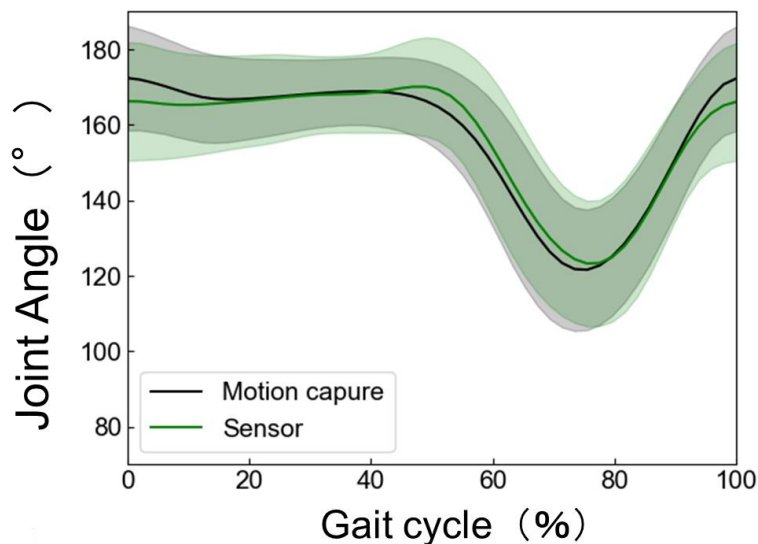
走行時の様子  
(12 km/h)

# 日常着を想定した低着圧衣類での 歩行・走行の動作計測<sup>2)</sup>

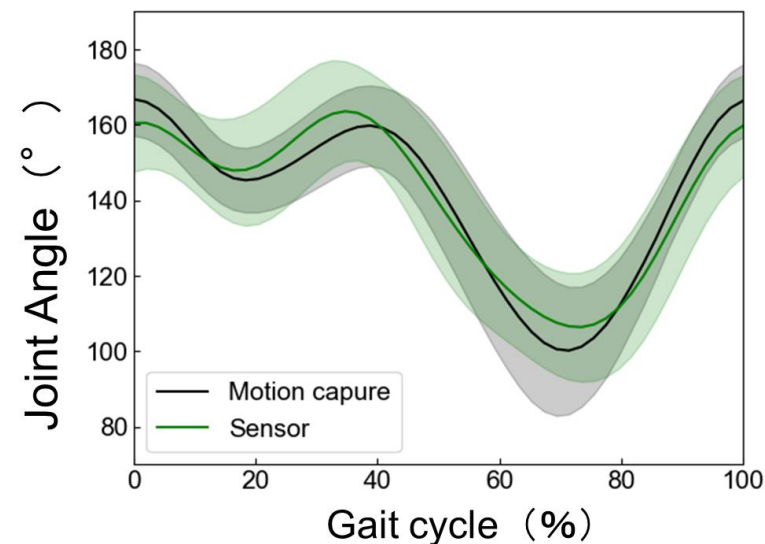
歩行と走行での計測精度

	歩行 (n=17)	走行 (n=20)
MAE	4.0±0.9°	5.8±1.1°
RMSE	5.0±1.1°	7.0±1.4°
R <sup>2</sup>	0.96±0.02	0.94±0.02

歩行



走行

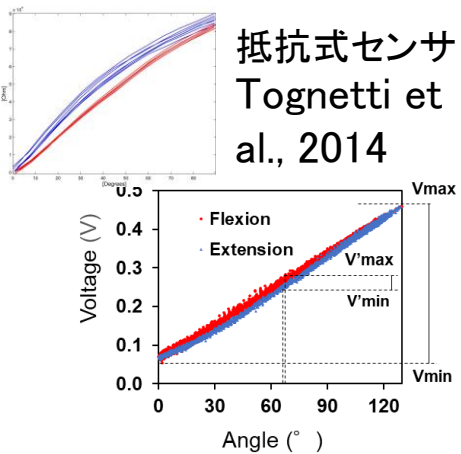
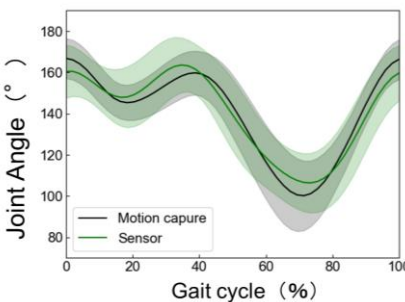

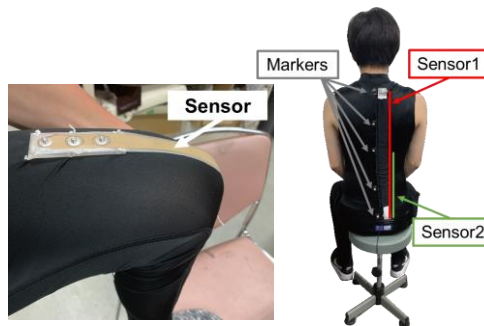


歩行サイクル(左図:歩行, 右図:走行)

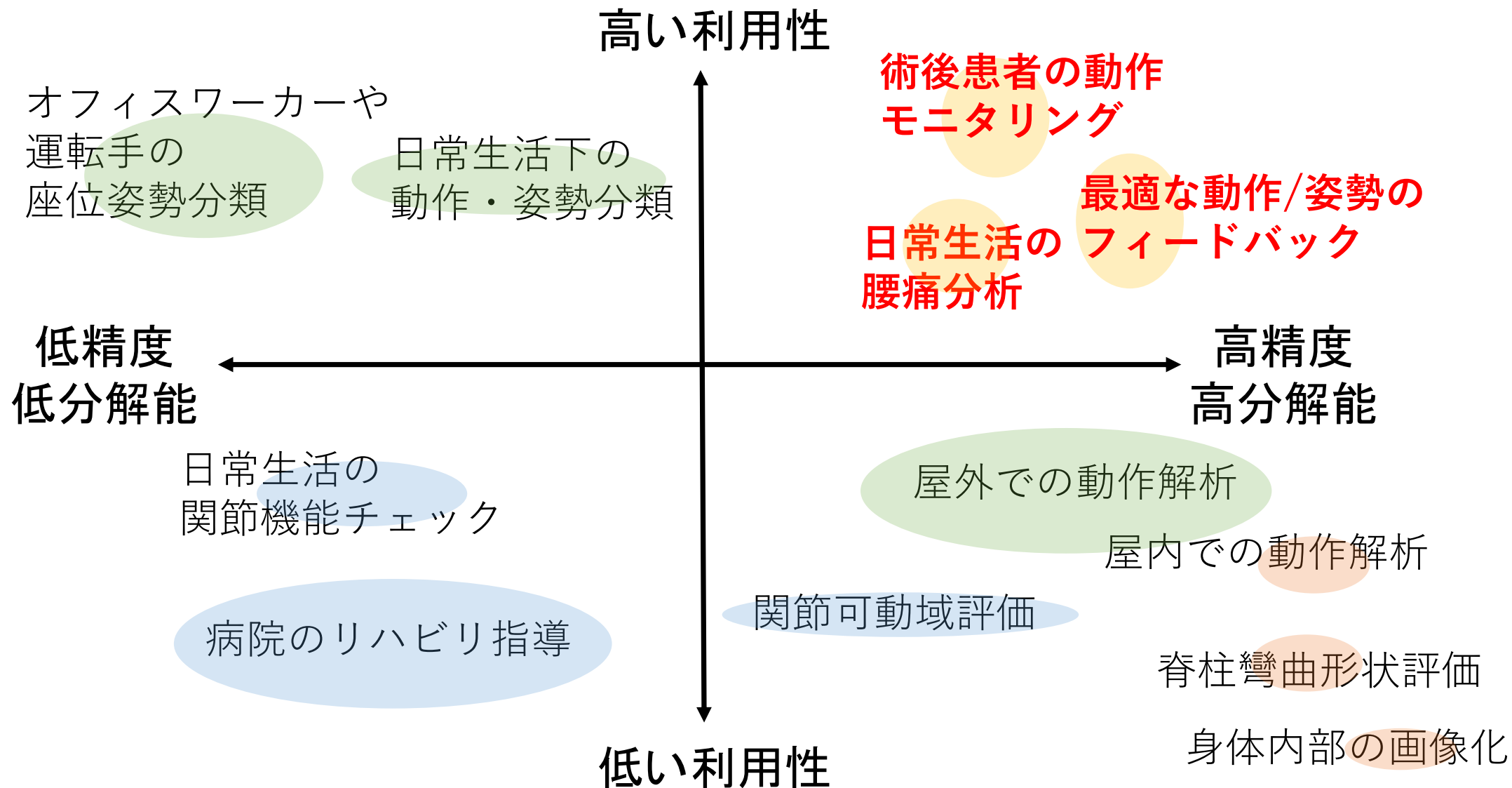
低着圧(低拘束)な計測方法で,  
詳細な関節角度や運動パターンを取得可能



# 新技術の特徴・従来技術との比較

<p>従来 課題</p>	<p>ヒステリシスが大きい</p>	<p>曲げ以外の感度を持つ</p>	<p>角度変化に対して感度が低い</p>	<p>電磁干渉を受けやすい</p>
<p>開発 センサの到達点</p>	<p>抵抗式より計測精度改善</p>  <p>抵抗式センサ Tognetti et al., 2014</p>	<p>低着圧衣類での動作計測が可能</p> 	<p>類似した直立座位姿勢を判別可能 (未発表のため詳細不記載)</p> 	<p>センサがヒトに触れても電磁干渉が生じない</p> 

# 想定される用途





## 実用化に向けた課題

- 現在、動作原理や基礎的な動作/姿勢での動作検証は完了済み
- 今後、長時間計測についての検証の必要がある。
- 材料特性が大きく影響するため、実用化に向けて、センサ素材（導電性フィルム）の選定を行う必要もあり。

# 企業への期待

- 服との一体化を検討しているため、縫製技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、ウェアラブルデバイスによる動作/姿勢を検討している企業には、本技術の導入が有効と思われる。

# 企業への貢献、PRポイント

- 本技術は至適なセンサがない日常生活での長時間計測に応用できる可能性がある。
- 応用先に合わせて必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 応用先に合わせてセンサのカスタマイズも可能。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 静電容量型センサ、  
変形検出システム及び方法
- 出願番号 : 特開2023-003244
- 出願人 : 学校法人立命館
- 発明者 : 塩澤成弘、後藤大輔、岡田志麻

# お問い合わせ先

立命館大学 BKCリサーチオフィス

T E L 077-561-2802

e-mail [liaisonb@st.ritsumei.ac.jp](mailto:liaisonb@st.ritsumei.ac.jp)

# 参考文献

- 1) D. Goto, Y. Sakaue, T. Kobayashi, K. Kawamura, S. Okada, N. Shiozawa, Bending Angle Sensor Based on Double-Layer Capacitance Suitable for Human Joint, IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology, Vol. 4, pp.129-140(2023)
- 2) 後藤, 坂上, 岡田, 塩澤, 低着圧衣類に装着した曲げセンサを用いたランニング中の膝関節計測, 生体医工学, Vol.62, 1号, pp.14-21(2024)