

柔軟膜センサによる運動時の関節の動作計測

中本 裕之^{1,a)} 平田 一郎² 大高 秀夫³ 多田 充徳⁴ 小林 太¹ 小島 史男¹

概要: スポーツにおける動作の評価を主として、人間の動作を計測方法が求められている。本論文では、装着しても違和感の無い柔軟性と薄さを兼ね備えた柔軟膜センサを提案する。柔軟膜センサは柔軟なウレタンを主材料としており、自身の伸びの程度を静電容量として変化させることができる。実験により、人間の関節部の皮膚の伸びを計測することでその関節の角度を計測可能なことを検証する。

Measurement of Joint Angle by Stretchable Strain Sensor

HIROYUKI NAKAMOTO^{1,a)} ICHIRO HIRATA² HIDEO OOTAKA³ MITSUNORI TADA⁴
FUTOSHI KOBAYASHI¹ FUMIO KOJIMA¹

Abstract: In professional and amateur sports, measurement of human motions is required to improve them. In this paper, we apply a stretchable strain sensor to measurement of human motions. Because the strain sensor is a thin structure and flexible, it is suitable for the measurement of human motions. We confirm that the capacitance of the strain sensor changes is coincided with elbow's angle measured by motion capture system.

1. はじめに

スポーツの分野においては、動作の正確さの定量化や軌道の評価のため、運動時の上肢・下肢の軌道や速度の計測が必要とされている。その計測のため、現在は高速度カメラなどの装置が使用されているが、運動が撮影範囲内に制限される。また、齋藤らは投球運動の計測を加速度センサなどを用いてサンプリング周波数を 1000Hz で実施しているが [1]、複数のセンサを使用する場合、センサの位置のずれやキャリブレーションの煩雑さから幅広い利用は難しい。運動の計測には、被験者の移動や運動の空間的自由度を保ちつつ、動作を妨げないような計測方法を備える必要がある。

我々はカーボンナノチューブ溶液の塗布によって生成した電極を備えたウレタンエラストマーを材料とする柔軟膜センサの研究を行ってきた。本論文では、柔軟膜センサを用いた人間の関節角度の計測に関する検討結果を報告する。

2. 柔軟膜センサ

柔軟膜センサを図 1 に示す。柔軟膜センサの構造は 3 層のエラストマーシートの各層間に電極層を挟み込んだサンドイッチ構造となっており、エラストマーシートと電極層の厚さはそれぞれ $50\mu\text{m}$ 、電極層の厚さは約 $5\mu\text{m}$ である。電極層の面積は $10\text{mm} \times 60\text{mm}$ であり、柔軟膜センサの面積は約 $15 \times 90\text{mm}$ である。電極層はエラストマーシートにマスクシートを張り付けてカーボンナノチューブ溶液を塗布して形成しており、マスクシートの形状にもとづいて任意の形状の電極層を形成可能である。エラストマーシートの配合と電極層の濃度に依存するが、図 1 に示した柔軟膜センサは 100 % の伸び歪みを繰り返し生じさせても、機械的な破壊、電気的な特性の変化が生じないことを確認している。外部の計測機器との接続は、各電極層に設けた銅箔を介して行う。

¹ 神戸大学大学院システム情報学研究科
Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada, Kobe 657-8501, Japan

² 兵庫県立工業技術センター
Hyogo Prefectural Institute of Technology

³ バンドー化学株式会社
Bando Chemical Industries LTD.

⁴ 産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター
Digital Human Research Center, AIST

a) nakamoto@panda.kobe-u.ac.jp

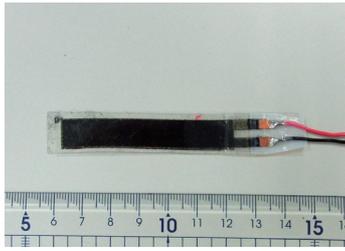


図 1 柔軟膜センサ

Fig. 1 Stretchable Strain Sensor

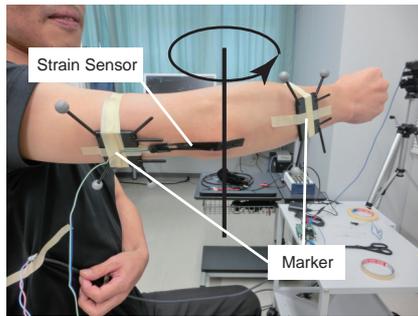


図 2 ひじ関節の計測実験の様子

Fig. 2 Measurement experiment of elbow

柔軟膜センサの電気的特性について述べる．柔軟膜センサは 2 層の電極層で 1 層のエラストマーシートを挟み込む構造であることから，平行平板導体によるコンデンサを構成する．その静電容量 C を求める式は式 (1) で表される．なお，エラストマの比誘電率を ϵ_r ，真空の誘電率を ϵ_0 とする．また， d は電極間の距離すなわちエラストマシートの厚さ， h と w は図 1 で示した向きで電極層の縦と横の長さ（以下，この電極層が占める部分を計測部分とする）を表す．図 1 の柔軟膜センサの場合， $h = 10 \text{ mm}$ ， $w = 60 \text{ mm}$ ， $d = 50 \mu\text{m}$ となる．エラストマーシートのポワソン比が 0.5 に近いいため，柔軟膜センサが横方向 w に n 倍だけ伸長したとき，そのときの縦の長さ h と厚さ d がそれぞれ h/\sqrt{n} ， d/\sqrt{n} となると仮定すると，式 (1) から静電容量も n 倍に大きくなる．したがって，静電容量を計測することで伸長量を求めることができる．

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{hw}{d} \quad (1)$$

3. 実験

関節角度の計測に関する実験を行った．図 2 にひじ関節に対する実験の様子を示す．まず，柔軟膜センサに粘着層を付加し，被験者のひじの関節にまたがるように柔軟膜センサを貼り付けた．柔軟膜センサの静電容量は専用の回路により計測した．次に，参照のためモーションキャプチャ (Optitrack, Natural Point 社) のマーカーを上腕と前腕に固定した．同社のカメラ 6 台を使用してマーカーを撮影し，マーカーの位置姿勢からひじの関節角度を算出した．ひじを 2 秒程度の周期で回転するように被験者に指示をしたと

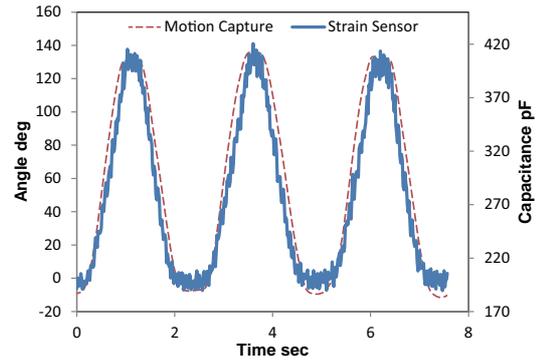


図 3 モーションキャプチャと柔軟膜センサの計測結果の関係

Fig. 3 Relation between motion capture system and strain sensor

きの，モーションキャプチャと柔軟膜センサの計測結果の関係を図 3 に示す．横軸は時間であり約 8 秒分のデータがあることを示す．左の縦軸はモーションキャプチャで計測したひじの関節角度，右の縦軸は柔軟膜センサの静電容量を表す．関節角度は，上腕と前腕を並行にした状態，すなわちひじを伸ばした状態が 0 deg であり，そこから屈曲する回転の方向が+である．図 3 によると約 140 deg の回転角度を示しており，これは正常可動範囲 0 から 145 deg のほぼ範囲を使って屈曲していることがわかる．一方，このひじの屈曲に伴い柔軟膜センサの静電容量は約 200 pF から約 400 pF まで変化しており，約 2 倍の長さにまで伸長していたことが分かる．2 つの変化は同期しており，柔軟膜センサの伸長が 2 倍程度と大きくなっても応答が来ていることを示す．また，グラフの表示範囲を指定するのみで 2 つのグラフがほぼ一致することから，静電容量を入力値として単純な式で関節角度を推定することが可能であるといえる．このことから，柔軟膜センサを人間の動作計測に応用できることを検証できた．

4. まとめ

運動時の動作の計測を目的として，柔軟膜センサを用いた関節角度の計測の可能性を検証した．実験の結果，参照用として計測したモーションキャプチャの結果と同期した静電容量の変化が得られ，静電容量から関節角度を推定できる可能性があることも結果のグラフから示唆された．

謝辞

本研究の一部は，戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の委託研究「超薄型柔軟膜を用いた貼付け型ヒューマンインタフェースの研究開発」の元に行われました．ここに謝意を表す．

参考文献

- [1] 齋藤健治ら：野球投球における上肢・体幹運動の慣性センサ計測，名古屋学院大学論集 (人文・自然科学篇)，Vol. 48, No. 1, pp. 33-48 (2011)．