

ヘテロコア光ファイバを組み込んだセンシティブ・ウェアとその応用

Sensitive wear embedded with hetero-core optical fiber and its application

10D5202 小山勇也

指導教授 渡辺一弘

SYNOPSIS

This thesis deals with a sensitive wear by using multi-functional hetero-core optical fiber sensor embedded in the wear. Multi-functional hetero-core fiber optics works to make the wear sensitive, which are designed in form of shirts, pants, and shoes, for monitoring joint motions, trunk motions, and foot pressures. An elbow joint motion and a trunk motion are monitored by the wear on which the hetero-core optical fiber sensor elements sewed so as to be sensitive to stretch on the wear. In order to get rid of the restriction to human body, a two-plane model has been proposed in which only two sets of elements simplify three kinds of motions at the trunk which are anteflexion, lateral bending and rotation. The result show that the motion consists of a composite of three motions can significantly be analyzed by means of the two elements. On the other hand, sports instruction system which provides trainees with real-time auditory feedback in their motions by using Android application on a mobile device. The wireless mobile device receives motion data from the sensitive wear for extracting important factors of motion in running and golf swing. Real-time feedback test has been demonstrated by using the developed system when trainees run on a treadmill at a constant speed, in which trainees are informed of the range of leg motion and the pace for running by listening to the trainer voice from the mobile device. Golf swing has been also tested for giving body rotational motions and temporal change of foot pressure to the trainee. Sports motion support was successfully achieved by using the developed system, with which trainees conveniently make sure of their motion based on the auditory feedback with playing the sports.

Keywords : Hetero-core fiber optics, sensitive wear, motion monitor, sports instruction, auditory feedback

1. 研究背景

ウェアラブルセンサ技術^[1,2]の発展に伴い、人はセンサ端末を装着し携帯する事で身体動作の状態を取得することが可能になり、身体動作解析、ライフログ、日常生活における健康管理やスポーツといった様々な分野に応用されるようになった。一方で、従来は身に着ける事が不可能であったセンシングデバイスを装着可能にするという概念を起点とするウェアラブルセンサは、着用物とセンシング機構が明確に区別されており、装着者自身に対する身体的または意識的な拘束性を生じる要因を有する^[3]。ユビキタス技術が持つ本来の意味に基づくならば、ウェアラブルセンサは「日常的に身につける衣服自体が感受性を持つ」といった概念を有する無意識、無拘束な形態へと将来的に拡張されるべきであるといえよう。本研究では、この概念に基づいた、人の動作状態に対する知覚機能と着用物とが一体となった形態をセンシティブ・ウェアと呼ぶ。その実現のためには、1. センシング素子、2. 身体動作の抽出方法、3. 実用的な応用方法の検討が必要と考えられる。まず、センシティブ・ウェアに適するセンシング素子には、柔軟、軽量という特徴が望まれる。次に、着用物の素材を利用した簡便な計測原理が望まれる。また、センシティブ・ウェアの用途と実用性を明らかにする必要がある。柔軟、軽量な特徴を有する光ファイバは、着用物との親和性を持つと考えられ、衣服に組み込むことによって身体の状態を捉える試みが行われている^[4,5]。ヘテロコア光ファイバ^[6-8]は、センサ部分に付与された緩やかな変形に対して鋭敏に光損失を生じ、変位量や圧力などの物理量を光強度変化によって捉える。また、簡便な計測構成を用い、安定したシングルモード伝送におけるリアルタイムな計測が可能である。

本論文では、ウェアラブル技術の拡張形態であるセンシティブ・ウェアを実現するための基本原理と技術を提示し、実験を通してその実用性を検証する。この目的のために基礎検討として、ヘテロコア光ファイバセンサを衣服や靴といった着用物に組み込み、身体の動きを実用的に把握するための手法を確立する。本研究では、ヘテ

ロコア光ファイバ技術を基盤としたセンシティブ・ウェアの構造や特徴、動作原理及び計測システムについて論じた。次に、センシティブ・ウェアが提供することが可能な肘や体幹における屈曲動作や回旋動作といった基本動作の検出性能を実験的に明らかにした。また、センサ点数の増加による拘束力の増大を防ぐための方法として、前屈、側屈、回旋動作といった複数の動作が可能な体幹部を例に、身体動作を最小限のセンシング情報により検出するための、従来に無い手法を試みた。その応用例として、携帯可能な小型デバイスとスマートフォン・アプリとを導入したスポーツ動作の教示システムを試作し、ランニングやゴルフといった運動動作に適用した実験を通し、その実用性を検証した。

2. センシティブ・ウェア

人が身体動作を行う際、その動作に応じて着衣の表面上には数十 cm 程度の僅かな伸縮量が生じる。このような伸縮量を検出し身体動作を捉え、ウェアに組み込み可能な、ヘテロコア光ファイバを用いた伸縮センサエレメントを試作し性能の評価を行った。本研究で用いるヘテロコア光ファイバはコア径 $9\mu\text{m}$ の光ファイバ伝送路上にコ

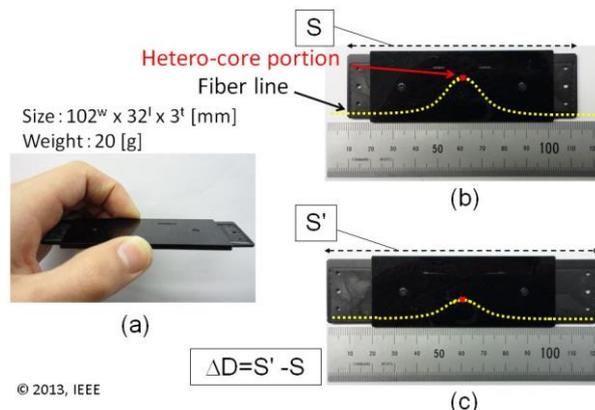


Fig. 1. Thin stretching sensor element for motion monitor: (a) the side view, (b) the top view, (c) the extended state.

ア径 $5\mu\text{m}$ の光ファイバ小切片を数 mm 程度挿入し融着して作製される。このヘテロコア部では伝搬光が一部クラッド層に漏洩するが、漏洩光の量はヘテロコア部に対する曲率変化に応じて単調に変化する事が知られている^[6]。Fig. 1 に、ヘテロコア光ファイバ伸縮センサエレメントを示す。本研究で作製した伸縮センサエレメントのサイズは $102\times 32\text{ mm}$ 、厚さ 3 mm 、重量 20 g である。エレメント管体内部の中央には曲率が付与されたヘテロコア部が配置されている。本伸縮センサエレメントは管体の伸縮量 $\Delta D\text{ mm}$ に応じて管体中央のヘテロコア部に付与される曲率が減少する機構を有し、光損失変化を計測することによって最大 20 mm までの伸縮量の検出が可能である。本研究ではリアルタイムな身体動作モニタリングを実現するため、光源に波長 $1.31\mu\text{m}$ の LED、受光部に PD、AD コンバータといった簡便な光強度ベースの計測システムを採用した。

3. モーションモニタ

3.1 関節における屈曲動作モニタリング

身体動作におけるセンシティブ・ウェアの検出性能を検証するため、肘関節における屈曲動作のモニタリング実験を行った。Fig. 2 上部に示されるように、エレメントの左右の端は、マジックテープによりスポーツウェアの左前腕部に固定されている。Posture-I, Posture-II に示されるように、エレメントは屈曲動作に応じてスポーツウェアの表面に生じる伸縮量を検出する。Fig. 2 に示される実時間応答により、屈曲動作の繰り返しに追従して伸縮量が増減することが確認された。結果より、身体動作に応じて伸縮量が生じる位置に本エレメントを組み込むことによって、身体動作を検出可能な事が明らかにされた^[7]。

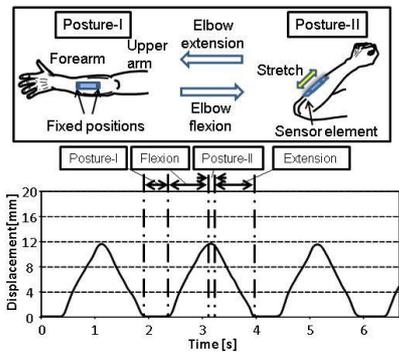


Fig. 2. Real-time response of stretch displacement for repeated elbow flexion.

3.2 体幹動作モニタリング

身体部位における複数の動作を捉えるためには、センサ点数を増加する必要がある、拘束力の増大を招く。そこで、前屈、側屈、回旋といった複合的な動作が行われる体幹部を例に、それら三種類の動作を二点のエレメントで知覚するという従来に無い手法を提案する。Fig. 3 に示すように、本手法で用いた Sensor-1 と Sensor-2 は、体幹動作によって生じる固定点間の距離変化を捉えるようウェア上に平行に配置されている。背面の左右において前屈、側屈、回旋動作に対して生じる伸縮量がそれぞれ異なる変化を示すと考えられるため、両方のエレメントによって検出された伸縮量の比を算出し各々の動作の区別を試みた。ウェアを装着した被験者は座位姿勢で背筋を自然に伸ばした状態を基本姿勢とし、前屈、側屈、回旋動作の反復運動をそれぞれ行った。Fig. 4 (a1), (b1), (c1) に、前屈、側屈、回旋動作に対する伸縮増加量 ΔD_1 , ΔD_2 の実時間応答結果をそれぞれ示す。Fig. 4 (a1)より、前屈動作における屈曲、伸展動作に応じて ΔD_1 , ΔD_2 が同時に増加・減少した。これは、前屈動作時において Sensor-1, Sensor-2 の両方に対して張力が付与されるためである。Fig. 4 (b1)より、(RB) 右側屈動作に対しては ΔD_1 のみが増減し、(LB) 左側屈動作に対しては ΔD_2 のみが増減した。これは、側屈動作において一方のエレメントにのみ初期値以上の張力の増減が付与される為である。Fig. 4 (c1)より、回旋動作に応じて ΔD_1 及び ΔD_2 が共に増加、減少した。また、(RR) 右回旋動作に対して ΔD_1 の方がより増加し、(LR) 左回旋動作に対して ΔD_2 の方がより増加する様子が示された。これは、回旋動作を行った際、前方に回転した側のエレメントが受ける張力は、もう一方が受ける張力よりも大きいためと考えられる。Fig. 4 (a2), (b2),

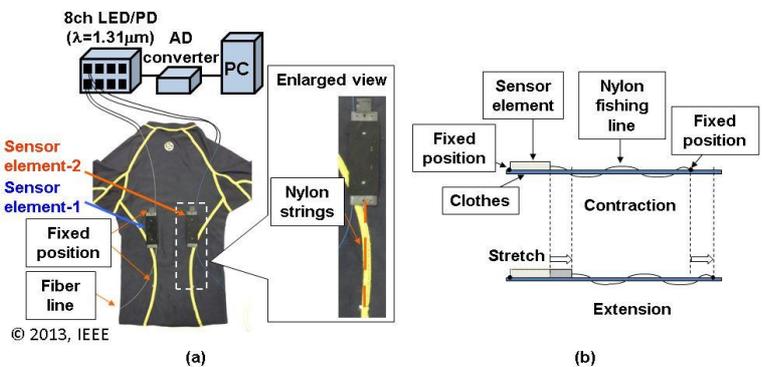


Fig. 3. Experimental setup for trunk motion measurement by using two stretching sensor elements: (a) the over view, and (b) the cross-section view of sensor element on the wear.

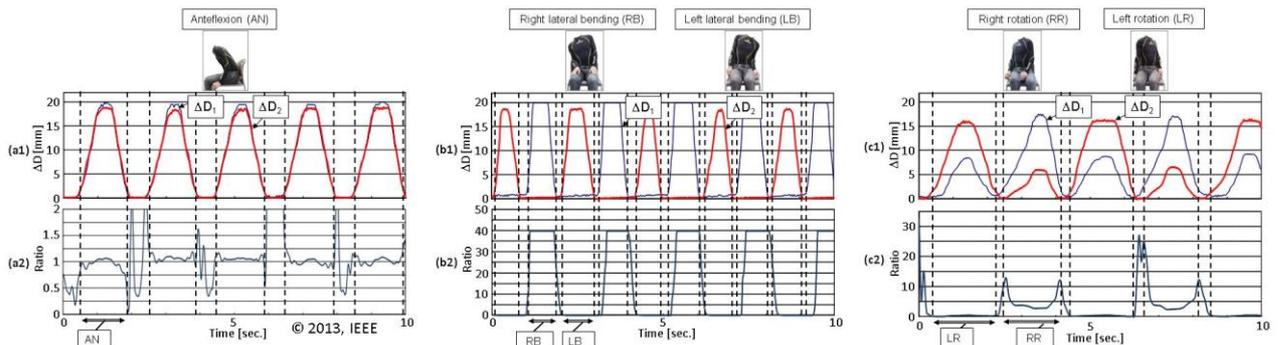


Fig. 4. Experimental results for the repeated trunk motions, showing $\Delta D_{1,2}$ and ratio $\Delta D_1/\Delta D_2$: for anteflexion (a1) and (a2), for lateral bending (b1) and (b2), and for rotation (c1) and (c2).

(c2) に、伸縮量 $\Delta D1$, $\Delta D2$ の比 $\Delta D1/\Delta D2$ を示す. Fig. 4 (a2), (b2), (c2)より, 前屈動作時は $\Delta D1/\Delta D2$ が 0.64~1.24, 左側屈動作は 0.1 未満, 右側屈動作は 8.2~40, 左回旋動作は 0.1~0.57, 右回旋動作は 2.4~25 の範囲で変化した事が確認された. 以上の結果より, 各々の動作に対する比の値は独立しており, ウェアに組み込まれた 2 点のエレメントにより被験者が行う 3 種類の体幹動作の区別が十分に可能な手法が確立された⁷⁾.

4. スポーツ動作教示システム

4.1 教示システムの構成

スポーツ分野では, 日常生活における継続的なトレーニングは技術の熟達過程において重要な役割を占める. スポーツの基本動作を習得するためには指導者による動作の教示を受ける事が効率的であるが, 初心者は教示通りに動作を変える事が困難である. また, 基本動作の習得まで常に指導を受け続ける事は, 時間または経済面における制約により現実的ではない. そこで本研究ではセンシティブ・ウェアを応用し, 日常生活における基本動作のトレーニングに有用な教示システムを開発した. Fig. 5 に教示システムの概要図を示す. 本システムは, センシティブ・ウェアを着用した練習者の動作をリアルタイムに取得・判定し, 音声により練習者にフィードバックすることにより基本動作とのずれを練習者に体感させるためのツールである. 練習者は市販のスポーツウェアを着用しており, ウェアには伸縮センサエレメントが組み込まれている. 練習者の動作に応じて生じるウェアの伸縮変化は, 光強度変化として多チャンネル計測器 (サイズ: 76^w x 135^l x 27^t mm) によってサンプリング数 50Hz で計測される. 光強度変化の情報は Bluetooth を介し, Android OS によって動作する携帯端末に送信される. 本研究では, 単純動作のスポーツとしてランニング, 複合的な動作のスポーツとしてゴルフスイングを選定し, 練習者の動作に対するフィードバックを行い検証実験を行った.

4.2 走行動作に対する教示試験

ランニングにおいて重要な脚の動作範囲と歩数に着目し, それらが走行動作中に適切な状態であるかどうかを判断し, 必要に応じて練習者に音声を教示するシステムを Android OS 上に実装した. 本システムでは, 練習者の左脚における走行中の屈曲動作を伸縮センサエレメントによりリアルタイムに検出する. 脚の屈伸動作に対して生じるスポーツウェアの伸縮量の変化を検出するため, 伸縮センサエレメントはウェアの腿部上面に取り付けられた. また, 伸縮量の時間微分値によって走行中の脚の反復動作における一回の動作を検出し, 屈曲動作の範囲と歩数が算出される. フィードバックされる音声は, 動

作範囲の値が基準値を満たしていない場合には「足が下がってきていますよ」, 基準値を満たしている場合には「その調子です」と出力される. 一方, 練習者がリアルタイムに走行ペースの増減を把握できるように, 一回の動作に要する時間から算出された 1 分間における歩数もまた通知される. また, 基準値である 160 歩/分を下回っている場合は教示音として 170 回/分の tap sound が出力され, 練習者は tap sound に合わせて動作を行うことによって走行ペースを維持することができる.

Fig. 6 (a), (b) に, 音声フィードバックが生成された際の, 脚動作に対する伸縮センサエレメントの実時間応答結果を示す. 6km/h に設定されたルームランナー上で練習者は走行動作を行った. Fig. 6 (a)に示すように, 走行時における動作範囲が基準値を下回った事が検出され「足が下がっていますよ」という音声フィードバックが生成された. 練習者は脚の動作範囲が低下した事を音声のみによって把握し, 脚の動作を意識的に動かせる事により動作範囲を改善した事が確認された. 一方, Fig. 6 (b) に示すように, 経過時刻 1 秒~2 秒における一回の動作時間は 830msec. であり, 動作時間から算出された歩数は約 145 歩/分である為, 「140 です」と教示音声出力された. さらに, 歩数が 160 を下回っている為, 教示音である tap sound が出力された. 練習者が tap sound のリズムに走行動作を同調させることによって歩数を約 166 歩/分に増加させた事が確認された. 以上の結果より, 走行動作における支援に対する本システムの有効性が実証された⁸⁾.

4.3 ゴルフスイングに対する教示試験

ゴルフスイングでは, シャフトの回転軌道であるスイングプレーンが, 上半身の回旋動作とその回転軸によって定まる事に着目し, 教示システムを実装した. Fig. 7 に, システム構成図を示す. スポーツウェアの背面には RS と LS で示される伸縮センサエレメントが組み込まれており, スイング中の上半身の回旋動作を追跡可能である. ゴルフスイングは Address, Back swing, Down swing, Impact, Follow swing により構成され, それらスイングの経過は伸縮量の時間微分値によりリアルタイムに追跡される. 次にスイング時における回転軸の位置を重心位置として特定するため, スポーツシューズ型のセンシティブ・ウェアを作製した. シューズ内のインソールに組み込まれている 4 点の荷重センサエレメントにより重心位置を特定する. Android に実装されたシステムは, 検出されたスイングの経過における重心位置に応じて, 動作のずれを音としてリアルタイムに知らせる事で練習者に基本動作の感覚を教示する. スイングの開始時に重心が後方に位置する場合は Beep 音を生成し, 前方に位置する場合は教示音を生成しない. また, Impact 時に重心が右側に位置す

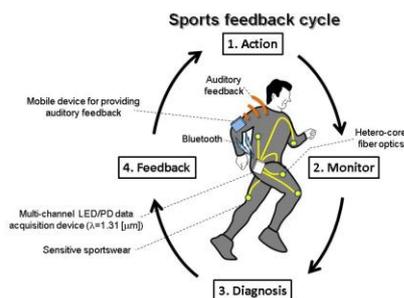


Fig. 5. Schematic drawing of sports instruction running system by using a perceptive sportswear.

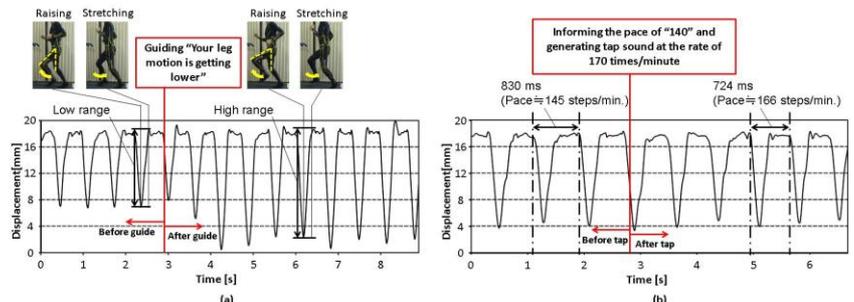


Fig. 6. Real-time response of the stretch displacement on the left leg during with the auditory feedback for (a) the range of leg motion and (b) the pace.

る場合は Chime 音, 左側に位置する場合には Buzzer 音を生成する. Fig. 8 (a1), (b1), (c1) に, 1 回目, 2 回目, 9 回目のスイング動作に対するエレメントの伸縮量 ΔLS , ΔRS の変化をそれぞれ示す. SS, TS, IS に示すようにスイングの Start 時, Top 時, Impact 時がそれぞれ検出され, スイングの状態がリアルタイムに追跡されている事が確認された. また, Fig. 8 (a2), (b2), (c2) に示すように, 各検出時の重心位置に応じて教示音が生成された事が確認された. 1 回目及び 2 回目のスイングにおいては適切な重心移動を行うことができていないため Beep 音や Buzzer 音が教示されたが, 複数回の練習経過後の 9 回目には比較的適切な重心移動を行えるようになってきていることが確認された. 結果より本教示システムによって, 二秒程度の僅かな時間においてそれぞれのスイング経過における重心位置が把握可能な事が実証された^[8]. 本システムは, 適切なスイングの感覚の習得に有用であり, スイング解析と併用する事で効果的なトレーニングが期待できる.

5. 結論

本研究では, 従来までの“身につけるセンサ”といった概念のウェアラブルセンサを, 一步先の“日常的に身につける着用物自体が感受性をもつ”といった概念に基づく無拘束なセンシティブ・ウェアへと拡張するための基本原理と技術を提示し, 実験を通じてその有用性を検証した. センシティブ・ウェアの基礎検討として, 柔軟な着用物に適するヘテロコア光ファイバを用いたセンシティブ・ウェアの構造や特徴, 動作原理および計測システムについて論じた. 着衣の伸縮変位量を検出可能なエレメントや, 靴の足底圧の検出が可能なエレメントの開発を行い, 着用者の身体動作をリアルタイムにモニタリングするシステムの構築が可能である事を実証した. 次に, センシティブ・ウェアによる肘や体幹における屈曲動作や回旋動作といった基本動作の検出性能を検証し, 基本動作のモーションモニタリングについて, その有用性と応用可能性を実験的に明らかにした. また, センサ点数の増加による拘束力という従来の動作計測技術における課題に対する解決法を提示するため, 身体部位における複数の動作を最小限のセンシング情報で実用的に把握可能な手法を確立した. その結果, ウェアに組み込まれた 2 点のエレメントにより被験者が行う 3 種類の体幹

動作の区別が可能になった. さらに, センシティブ・ウェアを応用したスポーツ動作の教示システムとして, 携帯可能な小型デバイスとスマートフォン・アプリを導入した. トレーニングにおけるフォーム改善のために, 練習者の身体動作をリアルタイムに把握し, 教示音によるフィードバックを行う支援システムを試作した. その結果, ランニングやゴルフの運動動作に適用した実験を通し, 日常生活のトレーニングにおける有用性を明らかにした. 本センシティブ・ウェアの知見により, 要求される身体動作を取得できるようヘテロコア光ファイバを組み込むことにより, 他のスポーツ支援のみならずリハビリテーションといった分野において有用性を見出す事ができると考えられる.

参考文献

- [1] G. X. Lee, et al, IEEE Trans. Instrum. Meas., 59(5), 1309-1317, 2010.
- [2] C. M. N. Brigante, et al, Industrial Electronics, IEEE Trans., 58(8), 3234-3241, 2011.
- [3] E. H. Chi, et al., Pervasive Computing, IEEE, 4(3), 22-25, 2005.
- [4] J. Rantala, et al., Personal and Ubiquitous Computing, 15(1), 85-96, 2010
- [5] A. F. Da Silva, et al, IEEE Sensors J., 11(10), 2442-2448, 2011.
- [6] K. Watanabe, et al., IEICE Trans., E83-C(3), 309-314, 2000.
- [7] Y. Koyama, et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., 62(4), 828-836, 2013.
- [8] Y. Koyama, et al., IEEJ, (In press).

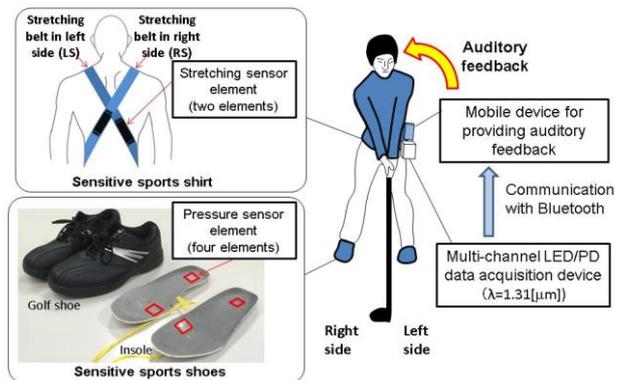


Fig. 7. Experimental setup for auditory feedback during golf swing by using the sensitive sportswears designed in the form of a sports shirt and shoes.

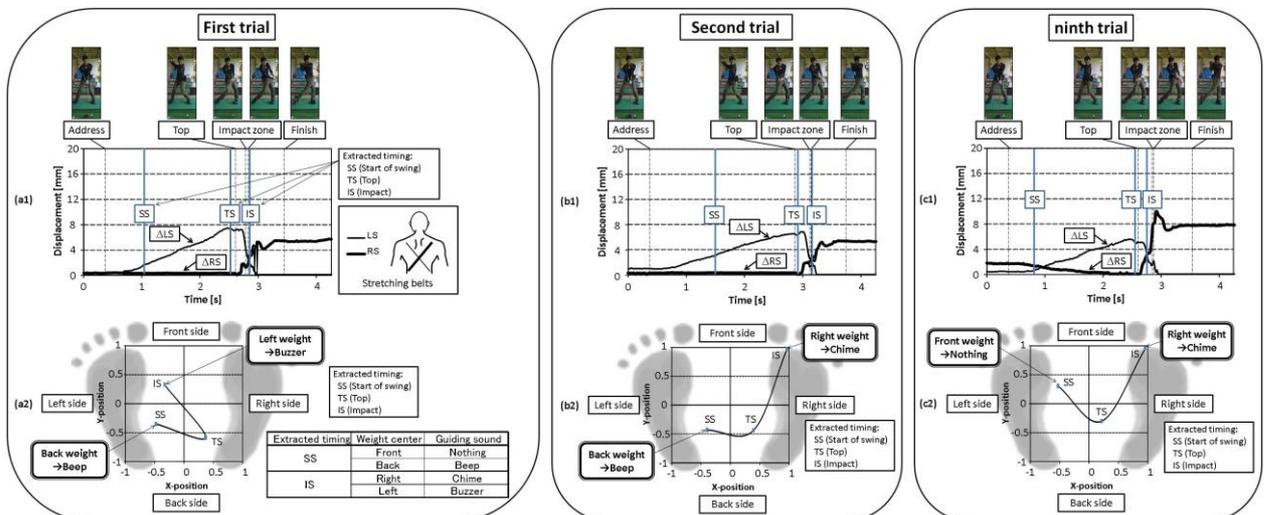


Fig. 8. Experimental results for golf swing in real time by using the sensitive sportswear system, showing stretch displacement and weight center transition. (a1) and (a2) for first trial. (b1) and (b2) for second trial. (c1) and (c2) for ninth trial.