

イヤラブルデバイスを用いた 身体感覚記録・利活用システムの構築に向けて

西山 勇毅^{1,a)} 瀬崎 薫^{2,1,b)}

概要：スポーツや楽器の演奏、自動車の運転など、効率的に新しい運動スキルを習得し、さらに向上させることは、人々の生活をより豊かにする。運動学習は、主観的な運動感覚と実際の動作とのズレを反復練習により埋める作業であるが、客観的な運動情報に比べ、主観的な情報を低負荷に記録し、それらを活用する環境は整っていない。そこで本研究では、運動学習時における主観的な運動情報を容易に収集・利活用可能なシステムを設計・実装し、評価した。

キーワード：身体感覚, 言語化支援, アスリート, 音声認識, ウェアラブルデバイス

1. はじめに

スポーツや楽器の演奏、自動車・自転車の運転など、運動スキルが必要な場面は日常生活中に数多く存在する。運動スキルとは、骨格筋を効率的に動作させることを要求される技能のことであり、知覚能力や姿勢・力など制御を統合的に行うことで効率的に骨格筋を動作させることができる。運動スキルの習得に関する研究は、認知心理学において長年研究されてきた。運動スキルの学習（以降、運動学習）では、学習の初期段階では練習回数に応じてスキルは向上する [1] が、過度な練習は故障に繋がるなど、運動スキルの向上には運動学習の「質」の向上も重要である [2], [3], [4], [5], [6]。

モーションセンサや映像機器は年々小型・高性能化しており、それらを用いて客観的に運動スキルを計測とフィードバックが可能になっている [7], [8], [9]。運動学習は主観的な運動情報と実際の運動とのすり合わせの繰り返しであるため、客観的な運動情報だけでなく、「私はこのように体を動かそうとしている」「今の動作はこのように感じた」などの、主観的な運動情報も運動学習の質の向上に寄与すると考えられる。しかしながら、ノートと筆記用具などの既存の記録手法は主観情報の記録負荷が大きく、動作ごとの高頻度での記録は難しい。また近年、Siri や Alexa,

Google Assistant などの音声アシスタントを搭載したウェアラブルデバイスや、スマートスピーカ、スマート家電などの登場により、日常的に音声認識技術を利用できるようになった [10]。特に Apple 社の AirPods シリーズ [11] や Nokia 社が開発した eSense [12], AfterShokz 社の骨伝導ワイヤレスイヤホン [13] といったイヤラブルデバイス（耳に装着するウェアラブルデバイス）は、音声認識の利用シーンを広げると考えられる。

本研究では、イヤラブルデバイスを用いたハンズフリーでの音声入力を用いて、運動学習時における主観的な運動情報を容易に収集・利活用可能なシステムの設計・実装する。主観的な運動感覚情報を収集・利活用可能にすることで、新たな運動学習機会をの創出できると考えられる。実装システムを用いて 8 名のエリートアスリート（野球選手）を対象に本システムの評価実験を行なった。

本研究の貢献は以下の通りである。

- 主観的な運動感覚の記録の重要性と応用可能性について言及したこと
- 音声認識技術を用いた主観的な運動情報を記録するシステムを設計・実装したこと
- 実際のエリートアスリートを対象にシステム評価実験を行いフィードバックを得たこと

2. 関連研究

本章では、既存の運動学習のプロセスとそのモデル、並びに情報技術を用いた運動学習の支援システムと、主観情報の収集手法に関する関連研究を述べる。

¹ 東京大学生産技術研究所
IIS, The University of Tokyo, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan

² 東京大学空間情報科学研究センター
CSIS, The University of Tokyo

a) yuukin@iis.u-tokyo.ac.jp

b) sezaki@iis.u-tokyo.ac.jp

2.1 運動学習モデル

二重貯蔵モデル [14] では、短期記憶と長期記憶という二つの記憶容量があり、触覚や資格・聴覚などの感覚登録器に入力された感覚情報のうち、注意が向けられた情報だけが短期記憶に入ると仮定されている。短期記憶の容量には限界があり (7 ± 2 程度)、その保持時間は短く通常 15 から 30 秒程度で消失すると言われている。また長期記憶に転送された情報は、ほぼ永久に長期貯蔵庫に保持される。

Chase が提案した技能学習の理論モデル [15] では、(1) 感覚器官を通して入力された感覚のうち、意識が向けられたものが短期記憶に転送される、(2) 短期記憶上には事前に長期記憶から取得した基準値が保持されており、(3) 基準値と転送された値を比較することで修正の有無を判断し、(4) 正しいとされた情報が筋骨格に伝達され運動となる。また (5) 同時に感覚器官にもフィードバックが行われることで、フィードバックループが生まれ継続的に誤差の修正作業が行われる。このループを繰り返すことで、スキルの向上実現すると考えられている。また、学習時のフィードバックの種類やタイミングの違いにより学習効率が変わることも明らかになっている [2], [3], [4], [5], [6]。

運動スキルの学習では、学習の初期段階では練習回数に応じてスキルは向上する [1] が、スキルの難易度が上がるにつれ学習曲線は鈍化し、高原現象と呼ばれるスキル向上の停滞や、一時的なスキルの低下 (いわゆるスランプ) が発生することが知られている。また過度な練習は故障に繋がるなど、運動スキルの向上には運動学習の「質」の向上も重要である。その中でも Baker ら [2] が行った実験では、メンタル・リハーサルと呼ばれる、学習する技能が言語化しやすい動作に関しては、学習すべき技能の内容を前もって言語によってリハーサルしておくことで、技能学習の効率が上がる事が知られている。

メタ認知とは、「認知の認知」と呼ばれ、自身の認知状態を認知する行為のことである。メタ認知的活動はメタ認知的モニタリングとメタ認知的コントロールの二種類に分けて考えることができる [16]。メタ認知的モニタリングは、「この部分が理解できない」など主観的な違和感を気付くことであり、メタ認知的コントロールはモニタリングした認知にたいして、修正などのアクションを計画することである。また、メタ認知的活動は、事前段階・遂行段階・事後段階といった認知対象の行動前後においても行うことができる。

運動学習をより効率的に行うためには、単純に「反復練習を多く行う」や「客観的な運動情報をフィードバックする」だけでなく、主観的な運動感覚を活用し運動学習の質を向上させることが、効果的な運動学習に必要なと考えられる。

2.2 客観情報を用いた運動学習支援

ハイスピードカメラやレーダー技術、小型慣性センサを用いて客観的な運動スキルの計測を容易に行うことができる。例えば、TrackMan [17] や Rasodo [18] などのレーダーを用いることで、野球やテニス、ゴルフのボールの回転数や起動、速度など様々なデータを計測できる。近年では、慣性センサが埋め込まれたボール [19] やバット [20] などの道具や、身体に直接装着する [21], [22] ことで、レーダーを用いるよりも低価格に正確なモーションデータを計測できる。また、計測データのフィードバックに関する研究が数多く行われている [7], [8]。例えば、大西ら [7] は左右の靴底に敷いた圧力センサより算出した客観的な値をランナーにフィードバックすることで、ランニングスキルの向上を支援している。

情報技術の発展により、客観的な運動情報の計測とフィードバックは容易になった一方で、主観的な情報の記録やその利用に関する研究はまだ行われていない。

2.3 主観情報の収集手法

経験サンプリング法 (Experience Sampling Method, 以降 ESM) [23] は主観情報の収集手法の一つであり、実験実施者は任意のタイミングで被験者に質問を送信し、被験者はその質問にその場で回答する手法である。ESM を用いることで、時間経過によるバイアスを最小限に主観情報を収集できる。特に近年は普及しているスマートフォンなどのモバイル端末に ESM を実装し、モバイル端末の通知機能やセンサ類を活用することで、日常生活の中でより自然な形でデータ収集を可能にしている [24]。

さらに、Wei ら [25] は、スマートスピーカーを用いた ESM を提案している。提案手法では、環境を認識するセンサと、スマートスピーカーの音声認識機能を組み合わせることで、スピーカーの近くにユーザが立ち寄った時に、スマートスピーカー側から音声で質問が飛ぶ仕組みである。提案手法を利用することで、ハンズフリーで主観情報を記録することができる。

スマートフォンや音声認識を用いて主観的な情報を記録する取り組みやシステムが提案されているが、これらの手法が運動学習において利用できるかはまだ明らかになっていない。

3. 運動学習における主観情報の収集と利活用

運動学習の質をさらに高めるためには、客観的運動パフォーマンスの記録やフィードバックだけでなく、主観的な運動情報を活用することで多様な運動学習支援が可能になる。ウェアラブルセンサやカメラ等を用いて、客観的な運動情報を計測可能になっているが、運動学習における主観的な運動感覚を低負荷に記録する手法はまだ提案されていない。

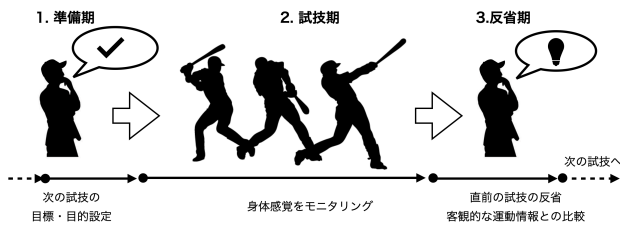


図 1 運動学習のプロセス

図 1 に運動学習のフェーズを示す。まずは運動学習は、準備期・試技期・反省期の 3 つのフェーズに分かれ、各フェーズにおいて、可能な範囲で主観・客観的な運動情報を得る。取得した主観・客観的な運動情報の間の差を埋めることでスキル向上が実現する。

実際の運動学習の現場における課題を明らかにするために、日頃から運動学習を行なっているエリートアスリートへのアンケート調査を行なった。具体的には運動学習時における主観的・客観的な運動情報の記録経験と、記録における課題、理想の記録頻度について調査した。

3.1 予備調査

慶應義塾大学の体育会野球部に所属する選手 123 名（男性：123 名，平均年齢：20.22 歳）にアンケート調査を行った。アンケート項目を以下に示す。

アンケート項目

- これまでに何か運動に関する情報を記録媒体に記録したことがありますか？
- 運動情報の記録にはどのような記録媒体を使用していますか？（複数選択可）
- 具体的にどのような運動に関する情報（運動情報）を記録していますか？（複数選択可）
- 「記録しよう」と考えたが、運動情報を記録できなかった経験はありますか？
- 記録できなかった理由について教えてください。（複数選択可）
- 自宅など練習場以外の場所では、どのくらいの頻度で運動情報を記録しますか？
- 練習場ではどのくらいの頻度で運動情報を記録しますか？
- 記録負荷が限りなく低いとして、客観データ（動作スピードなど）を「どのくらいの頻度」で記録するのが理想的ですか？
- 記録負荷が限りなく低いとして、主観データ（身体感覚など）を「どのくらいの頻度」で記録するのが理想的ですか？

3.1.1 運動情報の記録経験

アンケート結果より、116 名（94.81%）がこれまでに何かしら運動情報を記録した経験を有している。記録内容（図 3）は、「練習内容」が 75% と最も高く、次いで「主観的な運動の感覚（68%）」、「コーチ・チームメイトからのアドバイス（63.79%）」、「練習の反省（57%）」であった。

3.1.2 記録ができなかった経験

図 4 に示すように、回答者の約半数（49.14%）が、「記録しよう」と考えたが、運動情報を記録できなかった経験があると回答した。それらの主な要因は、「記録が面倒になっ

運動情報の記録にはどのような記録媒体を使用していますか（または、していましたか）？

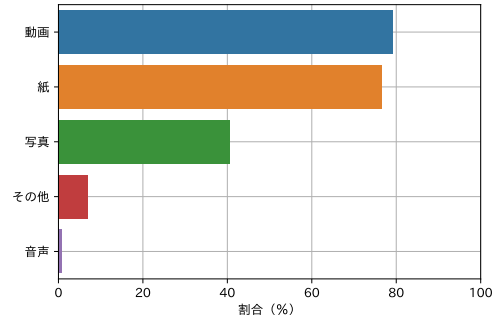


図 2 運動情報の記録メディア

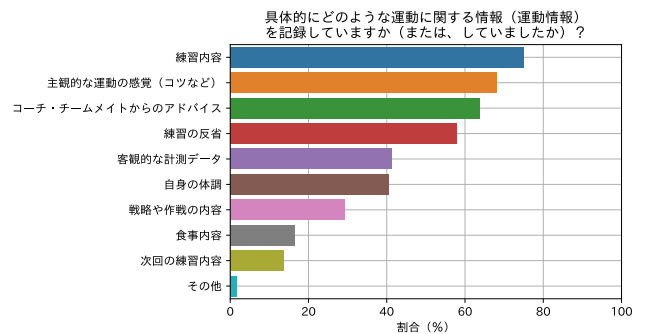


図 3 記録している運動情報の内容

「記録しよう」と考えたが、運動情報を記録できなかった経験はありますか？

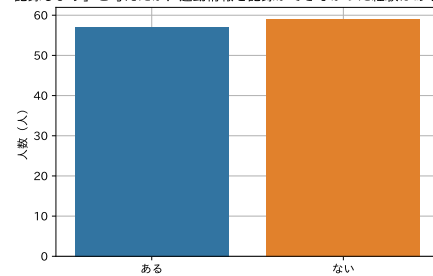


図 4 記録できなかった経験

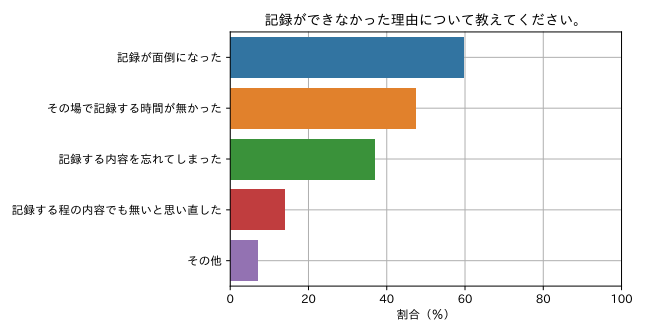


図 5 記録できなかった理由

た（53%）」、「その場で記録する時間が無かった（47%）」、「記録する内容を忘れてしまった（36%）」と回答している（図 5）。

3.1.3 現実と理想の運動情報記録

運動情報の記録頻度（図 3.1.3）は、現在の環境では「1

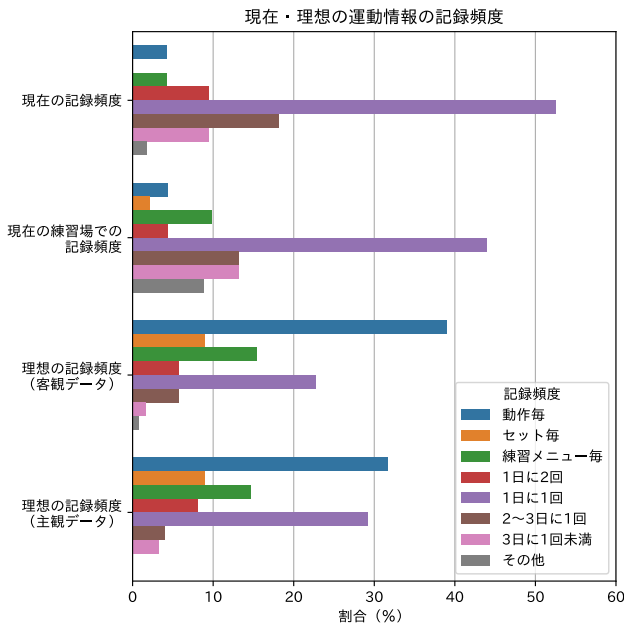


図 6 理想・現実の記録頻度

日に1回」が最も多く49.59%であり、練習場でも同様に「1日に1回」が最も多く43.96%であった。一方、理想の記録頻度に関する調査では、客観・主観データ共に「動作毎」が最も多く、客観データが39.02%、主観データは31.71%となった。逆に「1日に1回」は全体的に低下した。記録の負荷が低い環境であれば、より高頻度に記録できる環境を整えることが望ましいと考えられる。

3.2 主観的な運動情報記録負荷

予備調査の結果より、主観的な運動情報の記録は学習者にとって負荷が非常に高いことが明らかになった。またエリートアスリートは理想的には、「動作ごと」などより細かく主観的な情報を記録したいが、記録負荷が高いため、現状は一日に1回だけの記録に留まっていることが明らかになった。主観的な運動情報の記録が難しい要因として、「手動入力の作業負荷」と「入力手法の制約」「時間経過による忘却」があげられる。

運動学習における主観的な運動情報記録のためには、運動学習の妨げにならないように、ハンズフリーでかつ短時間に記録できる必要がある。

4. MiQ: イヤラブルデバイスを用いた主観情報の収集・還元基盤

3.2節で整理した通り、既存の主観的な運動情報記録手法には、「手動入力の作業負荷」と「入力手法の制約」「時間経過による忘却」が存在している。そこで本研究では、これらの問題を解決するために、音声認識技術を用いて、上記3つの問題を解決する運動学習時の主観的な感覚情報を低負荷に記録し、それらを利活用可能なプラットフォー

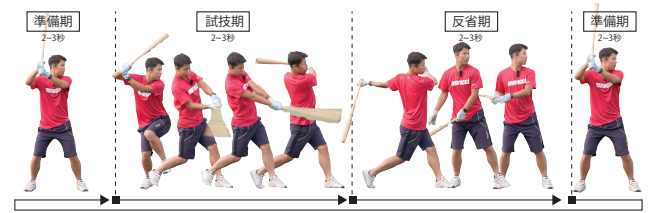


図 7 反復練習（素振り）のプロセス

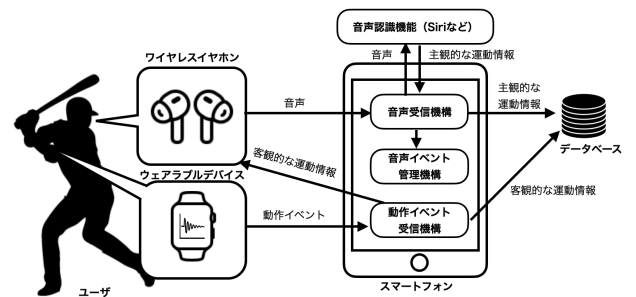


図 8 システム構成図

ムを提案する。

本研究では、日頃から運動学習を日常的に行なっている、エリートアスリートを対象にシステムの開発と設計を行う。運動学習の例として、野球競技において一般的に行われている反復練習である「素振り」を対象に、「素振り」練習における主観的に運動情報の入力負荷を低減させるシステムを構築する。

「素振り」は、打者が頻繁に行う一般的な練習メニューである。素振りでは、投手の投球をイメージしながら、イメージ上のボールを正確に打つようにバットスイングを行う。「素振り」などの反復練習は、図7に示すように、「準備期」「試技期」「反省期」3つの期間に分けることができる。試技期において生まれた主観的な身体感覚を、反省期において内省し、準備期において次の試技での目標設定を行う。このプロセスを繰り返すことで主観的な運動感覚と実際の感覚とのすり合わせを行う。

4.1 システム設計

図8に提案プラットフォームのシステム構成図を示す。本プラットフォームは、客観的な運動情報を計測するウェアラブルデバイスと音声認識を行うワイヤレスヘッドセットとスマートフォンから構成される。特に反省期と準備期において、音声認識を用いて主観的な運動感覚の言語化とその記録を支援する。

4.2 実装

本論文では、ウェアラブルデバイスとして Apple Watch (Series 5)、ヘッドセットとして AfterShokz 社の骨伝導ワイヤレスイヤホン (AEROPEX)、スマートフォンとして

iPhone 12 Pro を利用した。ウェアラブルデバイスとワイヤレスイヤホンはそれぞれ Bluetooth を用いてスマートフォンとペアリングする。音声はワイヤレスイヤホンのマイクを用いてスマートフォンに転送し、スマートフォン上でリアルタイムに音声認識処理を行う。音声認識は Apple 社の Siri を iOS の Speech API 経由で利用し、端末上で音声認識を行なった。

ウェアラブルデバイス上は、モーションセンサ（加速度・角速度センサ）を用いてバットスイングのイベント検知と客観的な運動情報を算出し、スマートフォンに転送する。客観的な運動情報として、スイングイベント検知時における合成加速度の最大を算出した。各モーションセンサは 100Hz でデータを収集し、2 秒ごとにスイングイベントの判定を行なった。スイングの判定は、macOS の CreateML を用いて作成した。事前に 5 名の野球経験者から合計 100 スイング分のモーションデータ（加速度・角速度センサのデータ）収集し、収集データからスイング判定モデルを作成した。

図 9 にスマートフォンアプリケーションのスクリーンショットを示す。ホーム画面 9(a) では、本システムの起動と停止、設定情報を確認できる。「Dictation」のボタンをオンにすることで、継続的に音声認識を行う。認識した文字列は、リアルタイムに画面上に表示される。音声認識は、2 秒以上音声入力が無い場合に停止し、音声入力が再開すると音声認識も再開する。

履歴画面 9(b) に示すように、トレーニングセッションごとに入力された主観・客観的な運動データを同時に保存される。保存された運動データは、図 9(c) のように時系列に保存される。各カードをクリックすることで、データの詳細を確認できる。図 9(d) の画面下に設置されたボタンをクリックすることで、Google Speech Recognition を用いて音声認識を再実施や元音声の再生、データの共有・削除を行うことができる。

5. 評価実験

実際のエリートスポーツ選手を対象にシステムの評価実験を行なった。具体的に、下記の二点に評価する。

仮説 1 音声認識システムの利用により主観的な運動情報の記録負荷が低下し記録量が増加する

仮説 2 主観的な運動情報を記録することで新しい気づきが得られる

5.1 評価項目

仮説 1 の評価のために、表 1 に示すように音声認識を用いた主観情報記録負荷に関する質問を、Q1 から Q6 のアンケート調査を行う。

またプラットフォーム全体のユーザビリティを System Usability Scale (SUS) [26] を用いて評価する。SUS は 10

項目の質問項目から構成され、各項目について「(1) まったくそうは思わない」から「(5) まったくそう思う」までの 5 段階で評価する。

SUS 質問項目

- SUS-01 このシステムを頻繁に利用したいと思う
- SUS-02 このシステムは不必要で複雑であると思った
- SUS-03 このシステムは使いやすいと思った
- SUS-04 このシステムを使えるようになるにはテクニカルサポートが必要だと思う
- SUS-05 このシステムの様々な機能がうまくまとまっていると思った
- SUS-06 このシステムは一貫性がないところがたくさんあると思った
- SUS-07 ほとんどの人が使い方簡単に学べると思う
- SUS-08 このシステムは非常に扱いにくいと思った
- SUS-09 このシステムを使いこなせると確信している
- SUS-10 このシステムを使い始める前にたくさんのお話を学ばなければならぬと思った

仮説 2 の評価のため、「Q7: MiQ の利用によって、何か新しい発見や気づきはありましたか? (はい・いいえの二択)」のアンケート調査を行い、その結果をもとにインタビューを行う。インタビューでは「Q8: 発見や気づきがあった場合、それはどのようなものですか? (自由記述)」について議論を行う。

5.2 実験環境

被験者は、予備調査と同様に、慶應義塾大学体育会野球部の選手 (8 名) とした。実験対象の野球部は、2021 年の東京六大学野球リーグ戦にて春・秋シーズンで連続優勝するなど、大学野球界で国内トップレベルの実力を有する野球部である。実験場所は、被験者が普段練習を行なっている練習場で行なった。

本実験では、以下の手順で実験を実施した。

実験手順

- (1) 実験内容の説明を行い consent フォームにサインする
- (2) スマートウォッチと完全ワイヤレスイヤホンを装着する
- (3) システムの動作確認を行う
- (4) 5 分間の「素振り」を行う
- (5) 休憩中 (10 分間) に認識した文字列 (図) を確認
- (6) アンケート調査とインタビューを実施

被験者には、各スイングの前後に「自身の運動感覚やその動作の修正目的」を言語化するように指示をした。システムの動作確認時に、音声認識の具体例を表示する。

5.3 実験結果

8 人の被験者がそれぞれ 5 分間を素振りを行なった。その結果、最終的に合計 262 スイングのデータを収集した。5 分間の平均バットスイング数は、平均 32.75 スイング (最大: 56 スイング, 最小: 20 スイング, 標準偏差: 10.63) であった。バットスイングのインターバルは、平均 9.16 秒であった。



図 9 画面構成

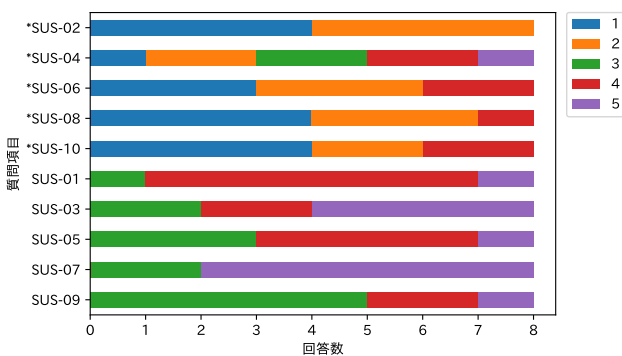


図 10 SUS の回答

アンケート結果を表 1 に示す。Q1 と Q2, Q3 の結果より、既存手法と比較して入力の手荷は低下 (Q1) し、記憶量の増加 (Q2), 入力内容が質が向上 (Q3) する傾向があった。一方で、音声認識の精度に関しては、ユーザによって差が見られた。

図 10 に SUS の結果を示す。SUS スコアは 74.06 と「好ましい」程度あることが分かった。SUS-04 と SUS-09 以外の項目は、ポジティブな回答が多かった。

また被験者が全員が、本システムを利用したことで新しい気づきがあったと回答した。

6. 考察

6.1 主観的な運動情報の種類

入力された音声データの生データから文字列の書き起こしをこなった。被験者 6 と被験者 8 が記録した主観的な運動情報の一部を例として示す。また、運動情報を保存したタイミングから準備期・試技期・反省期のどのタイミングで保存された情報かを分類した。

被験者は、準備期において多く言語化する準備期型と、反省期において多く言語化する反省期型に大きく傾向が別

れた。例えば、被験者 6 は自身の意識する感覚を、試技ごとに口ずさむように言語化する傾向があり、準備期型であると考えられる。逆に被験者 8 は、試技後の反省期において、直前の試技の反省点を述べる傾向があり、反省期型であると考えられる。

被験者 6 の言語化例

準備期「頭動かさないでインサイドアウト」
準備期「前体重・前体重」
準備期「頭ぶらさずに目線一定」
準備期・試技期・反省期「目線はピッチャーで、よいしょ、いいスイング。」

被験者 8 の言語化例

反省期「ちょっと顔が残せなかった。」
反省期「スイングが波打った。」
反省期「ちょっと堪えきれなかった。」
反省期「ドアスイング気味になってしまった。」
反省期「ヘッドが寝てしまった。」

試技期において、全ての被験者が「よいしょ」や「よし」、「うっし」など掛け声を出すことが多かった。これらの掛け声や呼吸の情報も、運動学習に活用できる可能性が考えられる。

6.2 主観的な運動情報の応用可能性

インタビューの結果、「意識していた項目を後から振り返られるのは嬉しい (被験者 4)」など、全ての被験者は主観情報の記録に対してポジティブな意見であった。また、素振りだけでなく、フリーバッティングなどのより実践に近い形式での利用を期待する声 (被験者 2・3・4・5・6) も得られた。

音声認識の精度については、「認識される声で話せばうまく確率は高いかも。おかしい文字列もあったが、音声を聞

質問項目	1	2	3	4	5	最頻値	平均値
Q1 従来手法と比較して入力への負荷はどのように変化しましたか？ (1) 非常に増加した～(5) 非常に低下した	0	0	0	1	7	5	4.875
Q2 従来手法と比較して記録量に何か変化はありましたか？ (1) 非常に減少した～(5) 非常に増加した	0	0	0	3	5	5	4.625
Q3 従来手法と比較して入力内容の質に何か変化はありましたか？ (1) 非常に低下した～(5) 非常に向上した	0	1	1	4	2	4	3.875
Q4 音声認識の精度はどのように感じましたか？ (1) 非常に不満～(5) 非常に満足	0	3	1	3	1	2&4	3.25

表 1 アンケート結果

けば分かる (被験者 2)」など、一人での練習時などノイズが少ない環境であれば、既存の音声認識アルゴリズムでも対応可能なことが分かった。しかしながら、専門用語 (例えば、ドアスイングなど) や単語の羅列 (頭ぶらさずに目線一定) では既存アルゴリズムだけでは、正しい文字列として認識されないケースがほとんどであった。音声認識精度の向上は今後の課題である。

客観的な運動情報との連携も今後の課題である。全ての被験者からは、客観的な運動情報との連携に関する要望があった。例えば、練習中に意識している箇所 (例えばバットスイングの角度など) に応じてフィードバックする内容を変更するなどである。主観的な運動情報を組み合わせることで、客観的な運動情報のフィードバックをより効果的に事ができると考えられる。

7. おわりに

情報技術の発展により、客観的な運動スキルを容易に計測できるようになった。運動学習は、主観的な運動感覚と実際の動作とのズレを反復練習により埋める作業であるため、客観的な運動情報だけでなく、主観的な運動情報の記録とその振り返りも効果的な運動学習のためには重要な要素である。しかし予備調査により、既存手法では主観的な運動情報を記録する負荷が高く、主観情報の記録と振り返りが困難であることが明らかになった。そこで本研究では、音声認識技術を用いて運動学習時における主観的な運動情報を容易に収集・活用可能にするシステム (MiQ) の設計・実装した。さらに、エリートアスリート 8 名を対象に評価実験を行い評価した。その結果、提案システムを利用することで、主観的な運動情報の入力負荷が低下し、記録量が増加することが明らかになった。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20K19840 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Peterson, J.: Experiments in ball-tossing: The significance of learning curves, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 2, No. 3, p. 178 (1917).
 [2] Baker, K. E. and Wylie, R. C.: Transfer of verbal training to a motor task, *Experimental Psychology*, Vol. 40, pp. 632–638 (online), DOI: 10.1037/h0057374 (1950).
 [3] Bilodeau, E. A., Bilodeau, I. M. and Schumsky, D. A.: Some effects of introducing and withdrawing knowledge of results early and late in practice, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 58, No. 2, pp. 142–144 (online),

DOI: 10.1037/h0040262 (1959).
 [4] Greenspoon, J. and Foreman, S.: Effect of delay of knowledge of results on learning a motor task, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 51, No. 3, pp. 226–228 (online), DOI: 10.1037/h0041992 (1956).
 [5] Reynolds, B. and Adams, J. A.: Motor performance as a function of click reinforcement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 45, No. 5 (online), DOI: 10.1037/h0053616 (1953).
 [6] Trowbridge, M. H. and Cason, H.: An experimental study of Thorndike's theory of learning. *Journal of General Psychology*, Vol. 7 (online), DOI: 10.1080/00221309.1932.9918465 (1932).
 [7] Ohnishi, A. et al.: An Auditory Feedback System to Improve the Foot Pressure Balance for Runners, *Proceedings of the 17th International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia*, MoMM2019, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 94–101 (2019).
 [8] Schaffert, N. et al.: A Sound Design for Acoustic Feedback in Elite Sports, Vol. 5954, pp. 143–165 (2009).
 [9] Katsura, D. et al.: How Agents Provide Sports Motivation: Impression Ratings of Videos in Sport Climbing, *Proceedings of the 8th International Conference on Human-Agent Interaction*, HAI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 254–256 (online), DOI: 10.1145/3406499.3418752 (2020).
 [10] Bentley, F., Luvogt, C., Silverman, M., Wirasinghe, R., White, B. and Lottridge, D.: Understanding the Long-Term Use of Smart Speaker Assistants, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3264901 (2018).
 [11] Apple: AirPods Pro, <https://www.apple.com/jp/airpods-pro/>.
 [12] Kawsar, F., Min, C., Mathur, A., Montanari, A., Acer, U. G. and Van den Broeck, M.: ESense: Open Earable Platform for Human Sensing, *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*, UbiComp '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 381–383 (online), DOI: 10.1145/3267305.3267640 (2018).
 [13] AfterShokz: 骨伝導イヤホン, <https://aftershokz.jp/>.
 [14] Atkinson, R. C. and Shiffrin, R. M.: The Control of Short-Term Memory, *Scientific American*, Vol. 225, No. 2, pp. 82–91 (1971).
 [15] Chase, R. A.: An information-flow model of the organization of motor activity, *The Journal of Nervous and Mental Disease*, Vol. 140, No. 4, pp. 239–251 (1965).
 [16] Nelson, T. O. and Narens, L.: Why investigate metacognition, *Metacognition*, pp. 1–25 (1994).
 [17] Trackman 株式会社: TRACKMAN, <https://trackmanbaseball.com/>.
 [18] BASEBALL ONE 株式会社: Rapsodo, <https://baseball-one.com/rapsodo/>.

- [19] 美津濃株式会社: MA-Q, <https://www.mizuno.jp/baseball/products/MAQ/>.
- [20] 美津濃株式会社: BLAST BASEBALL, <https://www.mizuno.jp/baseball/products/BLAST/>.
- [21] Onsideworld Co., L.: PULSE THROW, <https://onsideworld.com/pulse/>.
- [22] Nishiyama, Y., Ito, T., Yonezawa, T., Nakazawa, J., Takashio, K. and Tokuda, H.: DALT: Detection Algorithm of Throwing Form Changing to Prevent the Baseball Player's Throwing Related Injuries, *UbiHealth: 6th International Workshop on Ubiquitous Health and Wellness* (2012).
- [23] Larson, R. and Csikszentmihalyi, M.: *The Experience Sampling Method*, pp. 21–34 (online), DOI: 10.1007/978-94-017-9088-8.2, Springer (2014).
- [24] van Berkel, N., Ferreira, D. and Kostakos, V.: The Experience Sampling Method on Mobile Devices, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 50, No. 6 (online), DOI: 10.1145/3123988 (2017).
- [25] Wei, J. et al.: Developing the Proactive Speaker Prototype Based on Google Home, *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2021).
- [26] Lewis, J. R.: The System Usability Scale: Past, Present, and Future, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 34, No. 7, pp. 577–590 (online), DOI: 10.1080/10447318.2018.1455307 (2018).