

モーションキャプチャデータと LLM を用いた 身体動作指導システムの検討

Toward a Physical Skill Coaching System

Integrating Motion Analysis and Knowledge-Grounded LLM Feedback

橋本 旺都[†]

松田 裕貴[†]

Akito Hashimoto

Yuki Matsuda

1 はじめに

日本には歌舞伎や能などの伝統芸能、西陣織や有田焼などの伝統工芸をはじめとする、世界に誇るべき高度な技術が数多く存在している。しかしその一方で、深刻な後継者不足や働き手の高齢化、ライフスタイルの変化に伴う需要の低迷により、多くの分野で技術の衰退が危惧されている。実際、近年になって復元された薩摩切子 [1] や、901 年（延喜元年）以降の平安時代中期から、安土・桃山時代末期の 1596 年（慶長元年）までに制作された、日本刀である「古刀」のように、一度完全に技術が途絶えてしまった事例も少なくない [2]。熟練者の技術の多くは言語化が難しい「暗黙知」として存在しており、これが技能継承を困難にする一因ともなっている。

この課題を解決するため、近年ではモーションセンサを用いた動作解析による技能継承の取り組みが進んでいる。従来手法では、取得した関節角度や軌道のズレといった空間的な誤差を数値やグラフとして提示する、あるいは仮想空間上（VR）に熟練者の骨格を重畳表示するといった視覚的・定量的なアプローチが主流であった。しかし、このような幾何学的な情報のみを提示する手法は、習得者自身が「自分の身体を具体的にどう動かして修正すればよいか」を頭で解釈しなければならず、認知負荷が高いという課題があった。そこで、より直感的な指導を実現するために、大規模言語モデル（LLM）を用いて動作データを自然言語によるアドバイスへと変換する試みが登場している。しかし、動作データの解析から指導内容の生成までを LLM に過度に依存する既存のシステムには、新たな問題が生じている。具体的には、LLM が事実とは異なる指導を行うハルシネーション（誤情報の生成）を誘発することや、伝統技術のような暗黙知を含む専門性の高い分野においては、一般的な LLM の事前知識だけでは指導内容の不正確さを招くといった課題である。つまり、「習得者に伝わりやすい言語化」と「専門的かつ正確な動作評価」の両立が、技能継承システムにおける新たな障壁となっている。

そこで本研究では、これらの課題を解決するため、プ

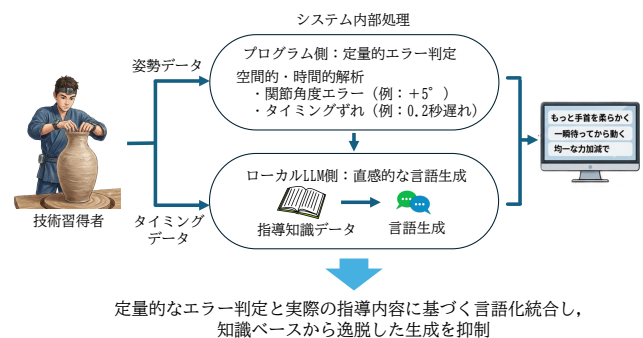


図 1: 提案手法の概要

ログラムによる定量的な誤差判定と、熟練者の知見を体系化した独自の指導データセットに基づくローカル LLM の言語生成を融合させたハイブリッド型指導システムを提案する。そして、本システムは、センサデータを直感的な言語フィードバックへと変換することで習得者の認知負荷を軽減すると同時に、指導知識ベースのルールベース検索およびローカル LLM を用いて専門性の高い分野に対しても正確かつ効果的な指導が可能なシステムの実現を目指している（図 1）。また将来的には、検索拡張生成（RAG）[3] の導入による大規模な指導データへの対応も見据えている。

本システムでは、プログラムによって習得者と熟練者の姿勢および動作タイミングを比較し、身体部位、誤差の方向・大きさ、時間的なずれなどの定量的な誤差情報を算出する。また、これらの誤差情報と、職人や指導者から収集した具体的な指導内容とを対応付けた指導知識ベースをあらかじめ構築する。フィードバックの生成時には、検出された誤差情報を検索クエリとして、指導知識ベースから関連する指導内容を検索し、定量的な誤差情報とともにローカル LLM へ入力する。ローカル LLM は、検索された指導内容を根拠として、習得者が身体動作の修正に利用しやすい自然言語フィードバックを生成する。このように、動作の定量的な評価をプログラム側が担い、LLM の役割を検索された指導知識に基づく言語化に限定することで、熟練者の指導内容から逸脱した情報の生成を抑制し、専門的な知識に整合した指導の実現を図る。

[†] 岡山大学, Okayama University

本稿では、定量的な誤差判定とローカル LLM による言語生成を融合させたハイブリッド型指導システムを提案し、プロトタイプを実装した。プロトタイプの動作を確認するため、著者ら自身で実施可能でありかつ、空間的・時間的な誤差特性を含む動作としてバスケットボールのフリースローを対象とした初期実験を行った。結果として、熟練者の知見に基づいた妥当な言語指導を生成でき、本システムが試行に対する言語生成において、事前に構築した知識ベースの記述と整合した指導内容を生成可能であることが示唆された。

2 関連研究

本章では、技能継承研究、圧力センサと LLM を用いた姿勢推定研究、および AR と LLM を用いたスキルトレーニング研究について述べる。

2.1 技能継承に関する研究

技能継承に関しては様々な手法が提案されている。Seymour ら [4] や綿貫 [5]、奥野ら [6] は、VR 技術や力覚提示を用いて動作理解や技能獲得を促進する効果を示した。尾暮 [7] は背景知識のオントロジー化によりノウハウの継承を図り、宇田川ら [8] は視線計測から熟練者の注意配分を分析した。

近年では AR や MR 技術の応用も進んでおり、Kaj-tazi [9] や Miyata [10] は動作追跡や視線情報と連携した作業プロセスの可視化を、Wang ら [11] はマルチモーダル情報を用いた技能訓練の効率化を実証している。

さらに AI や LLM の活用として、Falckenthal ら [12] や Trio ら [13] は、マルチモーダルデータや創作ログを機械学習・自然言語処理で解析し、言語化が困難な判断基準や創作プロセスのモデル化を試みている。また、Guo ら [14] は脳活動計測から暗黙知伝達における対人間脳活動同調の有効性を実証している。

2.2 圧力センサと LLM を用いた姿勢推定研究

Kulon ら [15] は、デュアル圧力マッピングセンサと LLM を融合させた、リアルタイムの姿勢モニタリングおよび臨床的知見に基づくフィードバックを提供するインテリジェントユーザインタフェース「SitWell」を提案している。この研究では、座面と背もたれに配置された圧力センサから得られる空間的データをユーザー個別に訓練された畳み込みニューラルネットワーク (CNN) で高精度に分類し、その姿勢履歴 (タイムライン) とユーザーの臨床プロファイルを組み合わせたプロンプトを LLM に入力することで、LLM 自体の追加学習を行うことなく、臨床的知見に基づいたパーソナライズされた姿勢改善アドバイスの自動生成を実現している。しかし、このシステムが生成するフィードバックは時に一般的すぎる傾向があり、側弯症や後弯症といった多様な筋肉骨

格系疾患を持つそれぞれの人の身体状態に適合した固有フィードバックを提供するまでには至っておらず、安全性や臨床的妥当性の観点から個々の特性に合わせたプロンプトの生成や姿勢・運動機能に関する臨床専門家による検証が課題として残されている。

2.3 AR と LLM を用いたスキルトレーニング研究

Lee ら [16] は、自己主導型のバスケットボールのスキルトレーニングを支援する AR システム「ViSTAR」を提案している。このシステムは、カメラからユーザーの 3D モーションデータを再構成し、動的タイムワーピング (DTW) 等を用いて関節レベルの時空間データを分析した上で、LLM を介して自然言語による具体的なコーチングの指示へと変換する。しかし、このようにカメラを用いたセンシングでは、映像に映らない死角部分の判定を行うことが困難であるという課題がある。

2.4 本研究の立ち位置

SitWell および ViSTAR は、複雑な身体データを LLM によって解釈可能な言語へと変換する有効性を示している。しかし、LLM に「データの分析・推論」まで依存すると、ハルシネーションや計算コストの増大が発生しやすい。本研究では、物理的なズレ (最大誤差部位) やタイミングの遅早といった誤差算出をプログラム側で行い、ローカル LLM の役割を知識ベースから取得した指導内容の言語化に限定する。また、ローカル環境で処理することにより、外部 API へのデータ送信を必要としない構成とした。

3 提案手法

本研究では、深刻な後継者不足や需要低迷に直面している伝統技術をデジタルデータとしてアーカイブ化し、仮に一度継承が途絶えてしまった場合でも高度な技能の記録および再現を支援すること、および新たな担い手が従来の映像学習や数値確認よりも直感的かつ効果的に技術を習得できる指導システムの構築を目指している (図 1)。

この目的を達成するため、職人や指導者などの実際の指導の様子から言語表現を指導データセットとしてあらかじめ構築する。そして、モーションセンサを用いて熟練者 (お手本) と習得者の動作データを収集・比較し、その差分を熟練者の暗黙知に基づいた直感的な言語表現でフィードバックする「ハイブリッド型指導システム」を提案する。本システムは、光学式モーションキャプチャのような大掛かりなスタジオ設備を必要とせず、職人の作業場や稽古場といった実際の技能実践現場において導入可能とすることを目指している。

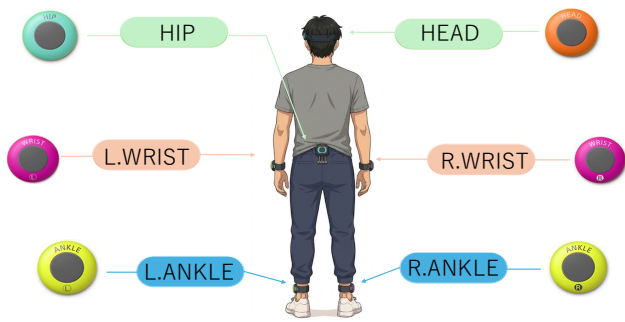


図 2: センサ装着位置

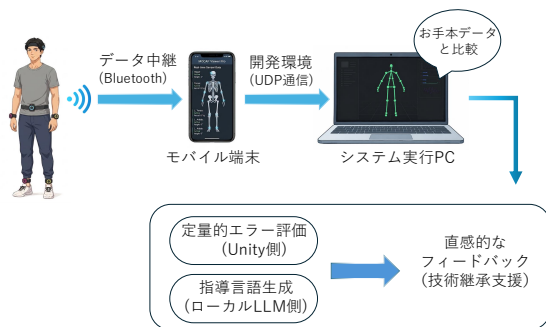


図 3: データ取得方法

3.1 動作データの計測および取得

身体動作データの取得には、小型・軽量かつワイヤレスなモバイルモーションキャプチャデバイスであるソニー社製「mocopi^{*1}」を使用する。図 2 に示すように習得者および熟練者の頭部、腰部、両手首、両足首の計 6 箇所に専用のバンドを用いて装着する。

各センサから取得された加速度および回転データは、Bluetooth を介してスマートフォン等の制御端末へと送信され、骨格位置および姿勢（インバースキネマティクス）が推定される。推定された 3 次元モーションデータは、UDP 通信を用いてシステム基盤である 3D 開発環境（Unity）へと即座に転送される。（図 3）本デバイスを採用したことにより、従来の光学式モーションキャプチャシステムのような多数のカメラ設置や広範なキャリブレーションスペースが不要となるため、作業スペースが限られる伝統工芸の工房や、屋外を含む多様な環境への適用が可能となると考えている。

3.2 ハイブリッド型指導手法のアーキテクチャ

本システムは、モーションセンサから得られたデータのズレを単なる数値として提示するのではなく、熟練者が弟子に対して行うような、暗黙知を反映した自然言語によるフィードバックへと変換して提示する。この処理は、プログラム側が厳密に担う「定量的誤差評価モジュール」と、ローカル LLM が担う「指導内容の言語生成モジュール」の 2 段階のパイプラインで構成される。

と、ローカル LLM が担う「指導内容の言語生成モジュール」の 2 段階のパイプラインで構成される。

3.2.1 第一段階：プログラムによる定量的誤差評価

Unity 上の判定システム内では、習得者とお手本となる熟練者のモーションデータが同一の時間軸上で比較される。動作の開始タイミング（トリガー）を基準として両者のフレーム同期を取り、各関節における位置ベクトルおよびクォータニオンを用いた回転角度の差分を計算する。

ここでは具体的に、以下の 2 点の誤差をミリ秒単位のサイクルで算出する。

1. 空間的誤差：全身の骨格モデルにおいて、お手本との位置・角度の乖離が最も大きい部位（最大誤差部位）の特定。
2. 時間的誤差：特定の動作における関節速度の閾値を超える動きが生じるタイミングの差（お手本に対して動作が「早い」か「遅い」か）の算出。

これらの計算はすべて数式ベースのプログラムによって行われるため、LLM に依存せず、あらかじめ定義した計算手順に基づいて誤差を算出する。

3.2.2 第二段階：知識ベース駆動型 LLM による指導内容の言語生成

第一段階で確定された「最大誤差部位」「誤差の向き・角度」「時間的なずれ（早い・遅い）」といった定量的データは、システム内部でテキスト化され、あらかじめ格納された対象技術の「指導データ（知識ベース）」とともにローカル環境で動作する LLM へのプロンプトとして入力される。ここで用いる指導データは JSON 形式のデータ構造で構成されており、具体的には「最大誤差部位（例：左前腕）」「当該部位の誤差距離（例：5cm）」「時間的なずれ（例：0.2 秒遅い）」といった定量的誤差の条件と、それらに対応する「熟練者の指導内容（例：『左手をもう少し側面へ』）」が格納されている。

本手法における LLM は、自ら数値を解釈して新しい知識を推論するのではなく、ルールベース検索と知識に基づく言語生成を組み合わせる適切な指導内容を生成する役割に特化している。具体的には、ジャンル（例：フリースロー）、動作フェーズ（例：リリース）、タイミング評価（例：ジャストタイミング）、部位ごとのズレ（例：右前腕、2cm）、平均誤差（例：20°）を検索クエリとして用いている。本システムでは一部の候補のみを抽出するのではなく、あらかじめ構築された JSON 形式の指導データをすべて参照し、入力されたクエリ（誤差状態）と教本内の記述を厳密に照合・マッチングさせる。

LLM は、このマッチングによって特定された内容に

^{*1} <https://www.sony.jp/mocopi/>

基づき、熟練者特有の直感的な表現（例：手首の誤差に対して『もう少し手首を曲げて』、タイミングの遅れに対して『もうワンテンポ早く』など）を用いた最終的な言語フィードバックを出力する。全件照合によるルールベース検索を用いることで、知識ベースから逸脱した内容の生成を抑制し、指導内容の信頼性の向上を図る。また、クラウド API を介さないローカル環境での実行により、伝統技術の秘匿性の高い知見の外部 API へのデータ送信に伴う情報流出リスクを低減するとともに、通信環境に依存しない処理を可能とする。

さらに、本システムはモーションセンサによって取得した「体の動きのデータ」と、参照する「指導データ（知識ベース）」に基づいて指導を生成するため、対象技能に応じた知識ベースとセンシング手法を構築することで、多様な伝統工芸・芸能の専門的な指導や、スポーツやリハビリテーションといった一般的な身体運動の指導への活用可能性がある。

4 予備実験

提案システムが有する指導の実現性、および生成される指導言語の妥当性を評価するための基礎検証として、バスケットボールのフリースロー動作を対象としたデータ収集および指導の予備実験を実施した。なお、本予備実験におけるシステム実行環境として、PC には MacBook Air (Apple 社製, M2, メモリ:16GB) を使用し、ローカル LLM には Meta-Llama-3.1-8B-Instruct を採用した。

伝統技術の検証に先立ちフリースロー動作を対象とした理由は、同動作が「下半身から体幹、そして両手首へと力を伝える全身の協調運動（空間的要素）」であり、かつ「ボールを一連の滑らかなリズムでリリースへと導くシークエンスにおいて、タイミングのズレが成否を分ける（時間的要素）」という、本システムが検知すべき双方の誤差特性を網羅した運動であり、学内で著者ら自身でデータ収集可能であるためである。そこで本稿では、提案システムの処理パイプラインを確認するための基礎的なケーススタディとして採用した。

実験にあたり、まずバスケットボール経験者（競技歴 10 年）のフリースロー動作（図 4）を参照動作データとしてシステムに事前登録した。その後、別の実験参加者 1 名（習得者）に対して、提案手法に基づきモーションセンサを図 2 に示す計 6 箇所に装着した。実験参加者にはお手本となる熟練者の映像を事前に提示した上で、自由なタイミングでフリースロー動作を行わせ、その際の動作データを 10 回分収集・評価した。また、本実験における LLM の知識ベースとしては、バスケットボール経験者の指導内容データをシステム内に格納して使用した。



実験参加者（習得者）

お手本（熟練者）

図 4: フリースロー動作

4.1 実験結果

実験の結果、構築したハイブリッド型指導システムは、実験参加者の動作における空間的な形状のズレ（空間的誤差）と、動作のテンポのズレ（時間的誤差）の双方を検知し、事前に定義した知識ベースに準拠した回答が 10 回の試行で 8 回出力された。結果を以下の表 1 にまとめる。

具体例として、実験参加者がシュート動作を行う際、熟練者と比較して「セットポジションからリリースにかけて左手がボールの前面に回り込み、両手打ちに近い姿勢になっている（空間的誤差）」という誤差が発生したケースにおけるシステム内部の処理と出力を以下に示す。まず、第一段階の定量的誤差評価モジュール（Unity 側）において、各関節のクォータニオンの差分から左手首および左肘関節の回転角度・位置の乖離が最大誤差部位として特定された。次いで、第二段階の指導内容の言語生成モジュールにおいて、この「ガイド手の位置・角度の崩れ」という定量情報がローカル LLM へと入力された。この際、LLM は「左手首の角度が〇〇度ズレています」のような、身体動作との対応を直感的に理解しにくい可能性がある機械的数値をそのまま提示することはしなかった。システム内の知識ベースと厳密にマッチングを行った結果、LLM は以下のような自然言語によるアドバイスを生成した。

「リリースの際は両手打ち気味にならないよう、左手をボールの側面に持ってこよう。」

本システムでは、動作の時間的なズレが閾値以上（今回の閾値は 3 秒）と検出された場合にはタイミングの修正アドバイスを優先提示し、時間的ズレが閾値未満で空間的な姿勢のズレが検知された場合には姿勢修正のアドバイスを出力する仕様となっている。出力されたアドバイス（図 5）は、時間的なズレが閾値未満で空間的なズレ

表 1: 実験結果

試行	最大誤差部位	検索された指導内容	生成結果	生成整合性
1	左太腿	体が斜めになってしまっている．ゴールに対してまっすぐ対面するようにしよう	体が斜めになってしまっている．ゴールに対してまっすぐ対面するようにしよう	○
2	左前腕	右足のバランスが崩れている．両足を揃えて真っ直ぐ飛ぶようにしよう	左足の位置をまっすぐにし、両足を揃えて飛び上がるようにしよう	○
3	右前腕	両手を上に上げすぎています．もう少し下の方で腕を構えよう	右前腕を下の方で構えよう	×
4	右足	タイミングのズレを指摘する言葉を必ず追加と右足のバランスが崩れている．両足を揃えて真っ直ぐ飛ぶようにしよう	ワンテンポ遅れています．両足を揃えて真っ直ぐ飛ぶようにしよう．	○
5	右太腿	右足のバランスが崩れている．両足を揃えて真っ直ぐ飛ぶようにしよう	右足のバランスが崩れている．両足を揃えて真っ直ぐ飛ぶようにしよう	○
6	左前腕	左脇がかなり開いてしまっている．もう少し脇をしめよう	左脇がかなり開いてしまっている．もう少し脇をしめよう	○
7	右前腕	両手打ち気味になっている．左手をもう少しボールの側面に持てこよう	両手打ち気味になっているので、左手をもう少しボールの側面に持てこよう．	○
8	左前腕	腕を前に出しすぎている．もう少し上に向かって腕を出すイメージでシュートしよう	左前腕の位置を少し前に出すようにしよう．	×
9	右上腕	右腕が前に出過ぎている．もう少し体の近くに腕を持てこよう	右腕が前に出過ぎているので、もう少し体の近くに腕を持てこよう．	○
10	左前腕	手首の曲げがあまり．もう少し手首を曲げてスナップを効かせよう	左前腕を少し曲げてスナップを効かせてください．	○

レが検知されたケースであり、検知された定量情報に基づき LLM が適切な自然言語表現へと再構成したものである。

一方で、知識ベースに準拠しない指導内容が生成されたケースが確認された。試行 3 では、両手を下げるアドバイスを表示すべき箇所で右前腕を下げるアドバイスになっているが、これは最大誤差部位が右前腕であることの影響を受けていることが原因と考えられる。試行 8 では、腕を前方へ出しすぎないように指導すべき箇所で反対に前に出すというアドバイスになっている。これは、指導内容に「上に向かって腕を出すイメージでシュートしよう」という文言があることから、この内容が文章生成時に影響を与えたものと考えられる。

次に、本システムの実行画面（図 5）について詳述する。画面内には、濃い青色で示される経験者の参照動作と、薄い青色で示される習得者の動作データが 3D モデ

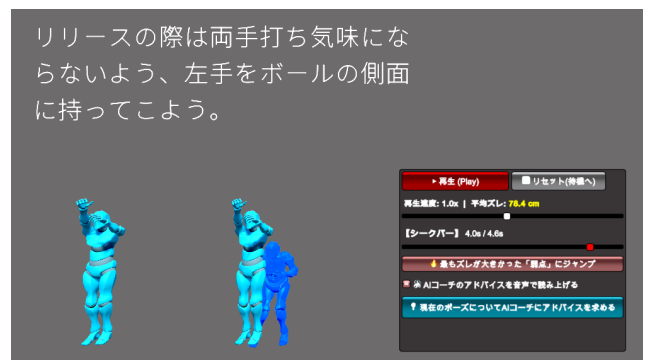


図 5: 実行画面

ルとして描画される。習得者を表す薄い青色の-avatar は画面内に 2 体配置されており、それらは常に同期して動作する。一方は経験者の-avatar に重畳して表示させることで、お手本となる動作との空間的なズレ（誤差）

を直感的に比較・把握しやすくしている。もう一方は単独で表示されており、習得者が自身の動作全体を客観的に確認することを目的としている。

さらに、本インタフェースには動作の振り返りを支援する多様な機能が実装されている。具体的には、アニメーションの一時停止機能や、シークバーを用いた任意のタイミングへの再生位置の調整（巻き戻し・早送り）機能、ならびに再生速度を 0.1 倍から 2.0 倍の範囲で変更する機能を備えている。加えて、システムが算出した「最もズレが大きかった箇所（最大誤差発生時点）」へと瞬時にジャンプする機能も搭載しており、習得者の効率的な振り返りと動作修正を支援する仕様となっている。

さらに、モーションの終了から実験参加者へフィードバックが提示されるまでのシステム全体の処理遅延は 2 秒ほどである。これにより、実験参加者はいまだ自身の運動感覚が残っている状態で即座に誤差を自覚し、次の試行へと反映することが可能であった。

以上の結果から、提案するハイブリッドアーキテクチャは、専門的な知識ベースを踏まえつつ指導内容を生成可能である見通しが得られた。一方、現在の 6 点トラッキングシステムでは指先の繊細な動作を計測するには限界があるという技術的課題も浮き彫りとなった。

4.2 考察と課題

本予備実験を通じて得られた結果は、提案システムが有する処理パイプラインの動作可能性と、今後の社会実装に向けた重要な技術的課題の双方を浮き彫りにした。

まず考察として、大まかな身体骨格運動に対しては、6 点のモーションセンサから推定されたインバースキネマティクスデータとプログラムによる定量的評価、およびローカル LLM による言語化のパイプラインを通じて動作することが確認された。従来の動作指導システムで一般的であった数値的・空間的なフィードバックは、習得者が運動を実行しながら脳内で自身の身体感覚へと翻訳する必要があった。これに対し、本手法のように直感的な言語表現へ再構成して提示するアプローチは、習得者が直感的にフォームを意識しやすいフィードバックを提供できる可能性がある。

一方で、システムの実用化に向けた重要な発展課題として、指導内容のパーソナライズが挙げられる。現行のシステムでは、習得者の身体的特徴に関わらず参照動作データを一律の絶対基準として誤差を算出しているが、人間個々の骨格差や関節可動域を考慮しない画一的な指導は、習得者に対して不自然な身体負荷を強いる可能性がある。したがって今後は、個々の身体特性に応じた最適化アルゴリズムを導入し、習得者の体型や特性に合わせて指導の基準値やアドバイス内容を動的に最適化する機能の実装を進める必要がある。

また、現在の 6 点トラッキングシステムでは、指先の微細な制御を要する動作の計測には限界がある。そのため、まずは本システムで対応可能な全身運動を対象にパーソナライズを含めた検証を進めた上で、将来的にはハンドトラッキング等の追加センシング技術の導入による高解像度化を検討する。

5 おわりに

本研究では、深刻な後継者不足やライフスタイルの変化に伴う需要低迷により、世界に誇るべき高度な伝統技術が途絶えつつある現状を打破するため、技能の記録および指導を支援するシステムの実現を目指している。本論文では、モーションセンサによる定量的誤差判定プログラムと、ローカル環境で動作する LLM による知識ベース駆動型の言語生成を融合させた「ハイブリッド型指導システム」を提案した。バスケットボールのフリースロー動作を対象とした予備実験では、10 試行のうち 8 試行において、生成された指導内容が検索された知識ベースの記述と整合していた。この結果から、モーションデータに基づく定量的な誤差判定と、知識ベースを用いた言語生成を組み合わせた処理パイプラインの実現可能性が示された。一方、対象部位や動作方向が知識ベースの記述と一致しない試行も確認されており、検索処理および言語生成の安定性には課題が残る。今後は、習得者個々の骨格差や身体特性に対応するパーソナライズドフィードバック機能の構築を進めるとともに、ハンドトラッキング等のセンシング技術のマルチモーダル化による対応動作の拡張を目指す。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費（26K21206）の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- [1] 新村和憲. 1. 島津斉彬の集成館事業と薩摩切子 (化学風土記：わが街の化学史跡). 化学と教育, Vol. 38, No. 3, pp. 302–306, 1990.
- [2] 中田隼矢. 日本刀の科学分析とアウトリーチ活動. まてりあ, Vol. 64, No. 3, pp. 172–178, 2025.
- [3] Patrick Lewis, Ethan Perez, Aleksandra Piktus, Fabio Petroni, Vladimir Karpukhin, Naman Goyal, Heinrich Küttler, Mike Lewis, Wentaoh Yih, Tim Rocktäschel, Sebastian Riedel, and Douwe Kiela. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. In H. Larochelle, M. Ranzato, R. Hadsell, M.F. Balcan, and H. Lin, editors, *Advances in Neural In-*

- formation Processing Systems*, Vol. 33, pp. 9459–9474, 2020.
- [4] Neal E. Seymour, Anthony G. Gallagher, Sanziana A. Roman, Michael K. O’Brien, Vipin K. Bansal, Dana K. Andersen, and Richard M. Sattava. Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance: Results of a Randomized, Double-Blinded Study. *Annals of Surgery*, Vol. 236, No. 4, pp. 458–464, 2002.
- [5] 綿貫啓一. VR 技術を用いたものづくり基盤技術・技能における暗黙知および身体知の獲得. 人工知能, Vol. 22, No. 4, pp. 480–490, 2007.
- [6] 奥野雄太, 鬼塚健一郎, 星野敏. 農村地域の伝統産業の技能の保存・継承におけるヴァーチャル・リアリティ技術の有用性の検証. 農村計画学会誌, Vol. 39, No. Special Issue, pp. 164–174, 2020.
- [7] 尾暮拓也, 花房英光, 古田一雄. 保修技術継承のための学習支援システム. 人工知能学会論文誌, Vol. 16, No. 6, pp. 531–538, 2001.
- [8] 宇田川洋一, 三ツ木もも, 木村崇. 建築設備の技術伝承・技能伝承に関する研究 (第3報) 非熟練者の視点と熟練者の視点の比較. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, Vol. 2023.10, pp. 609–612, 2023.
- [9] Kastriot Kajtazi. AR-Supported Knowledge Transfer: Motion Tracking and Process Visualization for Tacit Knowledge Capturing. Diploma Thesis, TU Wien, 2025.
- [10] Manato Miyata, Masaaki Imahashi, Masatoshi Itoh, and Keiichi Nakamoto. Augmented Reality-Based System for Skill Transfer to Assist Workpiece Fixturing on a Machining Center. *International Journal of Automation Technology*, Vol. 19, No. 5, pp. 712–719, 2025.
- [11] Chenyu Wang, Meng Zhu, and Sharifah Akman Syed Zakaria. Cross-modal deep learning enhanced mixed reality accelerates construction skill transfer from experts to students. *Scientific Reports*, Vol. 15, pp. 1–15, 2025. Article No. 34462.
- [12] Bettina Falckenthal, Manuel Au-Yong-Oliveira, and Cláudia Figueiredo. Intergenerational Tacit Knowledge Transfer: Leveraging AI. *Societies*, Vol. 15, No. 8, 2025. Article No. 213.
- [13] Oronzo Trio, Federica Caboni, Federica Cavallo, and Dirk Meissner. Artificial Intelligence and Tacit Knowledge in Radio Content Production. *Journal of Knowledge Management*, Vol. 30, No. 4, pp. 1282–1302, 2026.
- [14] Xiaotong Guo, Shuailong Zhang, Fangyuan Tian, Hanliang Fu, and Mengmeng Wang. Micromechanisms of tacit knowledge transfer in construction projects from the perspective of interpersonal brain synchronization. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, Vol. 65, No. 1, pp. 62–70, 2025.
- [15] Janusz Kulon and David Faith Odesola. SitWell: An Intelligent User Interface for Real-Time Posture Monitoring and Clinically-Informed Feedback. In *Companion Proceedings of the 31st International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI ’26 Companion, pp. 93–96, 2026.
- [16] Chunggi Lee, Hayato Saiki, Tica Lin, Eiji Ikeda, Kenji Suzuki, Chen Zhu-Tian, and Hanspeter Pfister. ViSTAR: Virtual Skill Training with Augmented Reality with 3D Avatars and LLM coaching agent. In *Proceedings of the 2026 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI’26, pp. 1–16, 2026.