

Title	VRを用いた筋力トレーニングの基本動作の習得支援
Author(s)	秦, 海天
Citation	
Issue Date	2025-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/19726
Rights	
Description	Supervisor: 藤波 努, 先端科学技術研究科, 修士 (知識科学)

修士論文

VR を用いた筋力トレーニングの基本動作の習得支援

QIN HAITIAN

主指導教員 藤波努

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術専攻
(知識科学)

令和 7 年 2 月

Abstract

近年、フィットネスや筋トレの話題がますます盛んになっており、多くの人がフィットネスや筋トレでシェイプアップを試みるようになったが、この種の運動に関しては、最初の基礎が特に重要である、なぜならしっかりとした基礎は、将来的に高度なトレーニングに取り込んだ時怪我につながるような不規則な動きを防ぐ、標準的な動きを効果的に調整することができる、そのため、例えば、トレーナーを雇うことで、運動の安全性と動きの正しい習得を保証するために指導するプロが身近にいる利点がある。プロは、運動の安全性だけでなく、運動の正しい学習を指導するために周りにいるが、このタイプの方法は、多くのお金と時間のコストを必要とし、また、ほとんどの場合、スペースの制限があるので、現代の生活では、それは最も好ましいとは言えない。また、近年は情報の伝達が迅速になり、筋力トレーニングの正しい動作を学びたい場合、ネットワークプラットフォームで関連するキーワードを検索することで、簡単に情報を得ることができる。しかし、この方法には、リアルタイムで自分の状態を確認できないという欠点がある。個人の理解力によっては、誤ったフォームを身につけてしまい、結果として怪我のリスクを高める可能性がある。

本研究では、このような現状を踏まえ、VR 技術を活用した新たな学習方法を提案する。具体的には、「プロトレーナーを雇う方法」と「ネットワークリソースを利用する方法」の利点を組み合わせ、VR 空間を構築することで、効果的に動作を学習できる環境を提供する。

従来のトレーニング方法では、専門トレーナーと対面でトレーニングを行うためにジムに行く必要があり、時間的・地理的な制約（例：トレーナーとのスケジュール調整や移動時間）が発生する。しかし、VR 技術を活用することで、こうした制約を解消し、自由な時間と場所で効果的にトレーニングを行うことが可能となる。さらに、VR 空間に骨格トラッキング機能を導入することで、リアルタイムで自分の動作を確認し、より効果的なフォームの習得が可能になる。

空間的制限の問題を効果的に解決することができ、一方、骨格モデルを追加することで、自身の変化をリアルタイムで観察することができ、動作が標準化されていない場合にアラームを発するサウンドプロンプト機能を追加することができる。本研究は、VR 技術が筋力トレーニング学習に有用であるかどうかを実証するものである。本研究は VR 技術を活用して筋力トレーニング初心者

が基本動作を学習する効果を検証するとともに、動作学習中のけがのリスクを軽減することを目的とする。本研究では被験者が VR システム内のモデル動作を模倣しながら、リアルタイムで自身の骨格モデルの状態を確認できるシステムを開発した。実験では被験者の腰部および膝部の角度変化を記録し、VR の使用が動作の正確性と安全性に与える影響を評価した。また、動作が不正確な場合に警告を発する音声提示システムを導入し、トレーニング中のフィードバック機能を強化した。さらに、アンケート調査を実施し、被験者の主観的な視点からトレーニングの効率および満足度を評価した。本研究で得られたデータを分析した結果、骨格ディスプレイとリアルタイムフィードバックにより、VR 学習段階における腰部角度の誤差が顕著に減少し、平均で約 20-30%の減少幅が確認された。指導なしやビデオ学習と比較して、VR 学習は参加者が動作の誤りを自覚し、修正することを可能にし、誤り累積時間約 15-25%短縮された。VR の骨格ディスプレイとリアルタイムフィードバックは、参加者の動作に対する理解を深め、最終復習段階においても高い動作標準を維持することができる。その結果動作の規範性は従来の学習方法よりも顕著に向上する。

総じて、VR 学習は動作の規範性を高め、誤り累積時間を短縮するうえで大きな効果を発揮した。VR 学習のフィードバックと没入型体験は、運動学習に対して従来よりも効率的で直観的なアプローチを提供している。

これらの結果から、本研究の成果は安全かつ効率的な筋力トレーニング学習環境の構築に新たな視点を提供するだけでなく、スポーツ障害のリハビリテーションや医療リハビリテーションなどへの応用も期待される。

目次

第1章 はじめに	1
第2章 関連研究	4
2.1 筋力トレーニングにおける技術的補助に関する研究の現状	4
2.2 筋力トレーニングのリスク	5
2.3 現在の研究の不足を指摘	8
第3章 実験設計	10
3.1 アンケートによる動作選定	10
3.2 アクション映像の選定と紹介	15
3.3 腰の角度とひざの角度の計算	16
3.4 VR ヘッドセットの接続	17
3.5 実験者募集	17
3.6 事前アンケート	17
3.7 実験プロセス	18
3.8 事後アンケート	18
3.9 感想と改善アンケート	19
3.10 データ収集に使用した方法とツールを記述する	19
3.11 データ分析の手法	20

3.12 計算公式	23
第 4 章 実験・評価	25
4.1 研究結果	25
4.2 第三回実験結果	27
4.3 第二回	28
4.4 実験者表現優れたデータ例	30
4.5 あんまり顕著ではないデータ例	36
4.6 討論	49
4.7 革新性	51
第 5 章 おわりに	52
5.1 研究成果	52
5.2 これからの展望	53

図目次

3.1.1：運動習慣あるかどうか	10
3.1.2：運動頻度を調査する	11
3.1.3：主に有酸素運動や無酸素運動行うに関する調査	11
3.1.4：有酸素運動の人、無酸素運動を始まる意欲があるかどうかを調査	12
3.1.5：有酸素運動の人気になる動作	12
3.1.6：有酸素運動の人いくつ動作の中でどちらが最も習得難しい	13
3.1.7：無酸素運動の経験向けのアンケート（一番好きな動作）	14
3.1.8：無酸素運動の経験向けの（最も難しいと思われる動作）	14
3.12.1：角度計算	23
3.12.2：標準偏差の公式	23
3.12.3：平均二乗誤差	23
3.12.4：腰と膝の角度の誤差の公式	24
3.12.5：データの変化率の計算式	24
4.4.1：第一回実験（優れた例）	32
4.4.2：第二回実験	33
4.4.3：第三回実験	34

4.4.4：第四回実験	35
4.5.1：第一回実験（あんまり顕著ではないデータ）	39
4.5.2：第二回実験	40
4.5.3：第三回実験	41
4.5.4：第四回実験	43

表目次

4.1: 各実験者最後の練習効果、VR 学習と比較	25
4.2 : 第三回実験結果	27
4.3 : 第二回実験結果	28
4.4 : 優れた例（四回実験のデータと標準データを比較した結果）	30
4.5 : あんまり顕著ではないデータ（四回実験のデータと標準データを比較した結果）	36

第1章 はじめに

本研究は、知識科学倫理審査会議（承認コード:KSEC-A2024120603）の承認を得て実施した。

笹川スポーツ財団が実施した「スポーツライフに関する調査」によれば2014年から2020年にかけて、日本におけるアクティブなスポーツ愛好者の割合は増加傾向を示している。しかし、新型コロナウイルス感染症の影響により、2022年の調査ではその割合が減少していると考えられる、一方で全年齢層において筋力トレーニングが人気の高い種目である、ランキングの上位4位以上にランクインしていることから、その重要性が増やしていると考えられる。また、IT技術やテクノロジーを活用して運動やスポーツを行う人々の割合も増加している。特に「健康・ヘルスケアデータの管理用アプリ」や「ウェアラブル端末」、「インターネット上の無料動画」を利用する人が増えていることが報告されている、このような背景から筋力トレーニングの効率性や安全性を向上させるための新たな取り組みを求めている。

さらに、仮想環境が運動スキル学習に与える影響についての研究も注目されている。Michalski SC ら[1]の研究ではVR環境下での卓球トレーニングにおいて、仮想共同体現（Virtual Co-embodiment）技術が協同トレーニング条件における運動スキル学習を有意に向上させることが示されている。この研究では、協同トレーニング条件下の参加者がほかの条件（視角共有条件、単独トレーニング条件）と比較して、トレーニング回数の増加に伴い最も顕著な進歩を示した。特に学習過程における正確性と効率性の向上が確認されている、仮想共同体現技術の応用可能性が示唆されている。

また、Shin ら[2]の研究では、仮想現実回転追跡タスク（VRRT）を用いた実現により、仮想身体表現が運動スキル学習に与える影響が明らかにされた。この研究では、仮想手条件下における学習率がほかの条件（非仮想手条件、コントロール形状仮想手条件）と比較して優位に高いことが示された、さらに身体所有感や代理感との正の相関が確認された。この結果は、参加者が仮想身体を自分の一部として認識し、より強いコントロール感を得られる場合、運動スキル学習がより効率的に進むことを示唆している。これらの研究成果を踏まえて、本研究ではVR技術を活用し、筋力トレーニング初心者が基本動作を効率的かつ安全に学べるシステムの構築を目指す。具体的には、リアルタイムでの姿勢

フィードバック機能や動作の正確性を向上させる仕組みを提案し、筋力トレーニングの学習環境を最適化する新たな方法を提示する。

筋力トレーニングには、複数の関節と筋肉の連動を伴う複合動作が多く含まれる。ディープスクワット、ハードプル、バーベルベンチプレス、クリーンエクササイズなどの動作は、技術的に要求されるだけでなく、トレーナーに強い身体コントロールと動作理解力を要求する。例えば、スクワットでは膝の屈曲角度の正確なコントロール、直立した腰、背筋の伸展、さらに身体の重心移動の習得が必要になる。初心者の場合、動作の微妙なズレはトレーニング効果を著しい低下させるだけでなく、膝や腰、さらには肩のけがの引き金にもなりかねない、研究によると、フリーウェイトトレーニングにおける複合動作（スクワットや懸垂など）は、傷害のリスクが高く、肩、腰、膝が最も傷害を受けやすい部位であることが示されている[3]。ドイツのアマチュアアスリートを対象とした全国調査では、筋力トレーニング中に負傷する確率は、女性よりも男性の方が有意に高いことが指摘されており、これは男性が高負荷のトレーニングを行う傾向にあることと関連している可能性がある。また、肩関節は上肢スポーツにおいて筋力支配への依存度が高いため、特に傷害のリスクが高い。そのため、本研究では、初心者はトレーニング開始時に回旋筋群の保護トレーニングを強化することを推奨している。

既存の筋力トレーニング補助器具には、初心者が複雑な動作を習得するうえで大きな欠点である。従来のマニュアルや静止画像では、動的に動きの詳細を表示する機能がないため、動きの詳細を視覚的に表現することが難しく、動きの仕様に対するユーザーの学習ニーズを満たすことができない。オンライン動画はトレーニング動作を動的に表示することはできるが、リアルタイムでのモニタリングやフィードバックがないのが普通である、初心者が自分の動作の正確性や改善方向を判断するのは難しい

また、現在のトレーニングアプリのほとんどは、一般的な動きの説明やデモンストレーションに基づいている、個人の実際のトレーニング状況に基づいたパーソナライズされたガイダンスを提供することができない。リアルタイムのフィードバックと修正がなければ、初心者は動作エラーによる潜在的なけがのリスクを蓄積しやすい。上記の問題は、トレーニングの有効性と安全性を高めるうえで、既存のツールの有効性を制限している。[4]

まとめると、初心者は筋力トレーニングにおいて高い学習困難性と動作ミス

のリスクに直面しているだけでなく、既存の補助ツールの機能不足によっても制限されている。これらの問題は、健康目標の達成に深刻な影響を及ぼし、スポーツ傷害のリスクを高める可能性がある、そのため、リアルタイムのモニタリングと動作の最適化に基づいた、新しい筋力トレーニング支援ツールを開発することが特に重要である。

仮想環境（VR）とモーションキャプチャ技術を組み合わせることで、このようなツールは、トレーナーの動きをリアルタイムで監視・分析し、正確なフィードバックと個人に合わせた調整提案を提供することができる、その結果、トレーニングリスクの効果的に提言し、動きの仕様とトレーニング効果を向上させることができる。本研究は、このような補助ツールの設計と開発を探究し実現することを目的として、より直観的で安全かつ効率的な筋力トレーニングソリューションを初心者に提供し、筋力トレーニングの普及と発展を促進することを目的とする。

本研究では、コンピュータビジョンとバーチャルリアリティ技術を組み合わせた筋力トレーニング支援システムを提案し初心者の動作学習における困難性と安全性の問題を解決することを目的とする。本システムは主に、データ取得、エラー検出、フィードバック機構、仮想トレーニング環境構築の四つの側面から構成される。

まず、Mediapipe を用いてユーザーからリアルタイムの動作データを抽出し、キーポイント座標を作成する。次に、設定された動作仕様基準を通して、ユーザーの動作の逸脱を正確に分析する。システムは、サウンドプロンプト、ビジュアルハイライト、データ記録などの様々なフィードバック方法を通じて、ユーザーが徐々に動きを修正するようガイドする。最後に、Unity をベースとした仮想トレーニング環境は、ユーザーと仮想モデルとの間のリアルタイムのインタラクションを実現し、初心者に直感的で効率的なトレーニング体験を提供する。さらに、本研究ではシステムの有効性を評価するために、比較実験をデザインし、動作仕様とユーザーエクスペリエンスに対する効果を検証した。

第2章 関連研究

2.1 筋力トレーニングにおける技術的補助に関する研究の現状

近年、筋力トレーニングの効果を最大化するために、バーチャルリアリティ（VR）技術が注目されている。従来の補助方法には限界がある、特に初心者や高齢者に対する効果的なトレーニング方法が求められている。VR技術の導入により、これまでのトレーニング方法では実現できなかった効果を引き出す可能性が示唆されている。

2.1.1 従来の補助方法の限界

従来の筋力トレーニング補助方法では、特に初心者が動作の正確性を確保することが難しく、また個別のフィードバックが不足していることが問題となる。このような限界を克服するために、VR技術が新たな手段として導入されてきた。Prasertsakulらの研究によると、VRを活用したトレーニングは、運動学習や姿勢コントロールにおいて非常に効果的であることが示されている。この研究では、VRベースのエクササイズプログラムが学習曲線の改善を促進し、モーター技能の向上に寄与することが確認された。また、VRを使用することで重心動揺（CoP）パラメータが低減し、バランス能力の向上にもつながることが示されている[5]。

特に、VR技術は初心者や高齢者を対象にした筋力トレーニングにおいて転倒予防や運動能力の向上に寄与する可能性が高いとされている。VR環境では、リアルタイムで姿勢や動作をモニタリングし、誤った動作に対するフィードバックを即時に提供することが可能となるので、従来の方法では難しかったトレーニング効果を実現できると期待されている。

2.1.2 競技者トレーニングへの応用と課題

VR技術の競技者トレーニングにおける効果については賛否両論がある。Akbaşらは、VRが競技者のトレーニングにおいて限られた役割を果たす可能性を指摘し、詳細なランダム化比較試験（RCT）が必要であると述べている[6]。とはいえ、VRは特にオープンスキルスポーツ（サッカー、フェンシング、ボクシング、柔道など）のパフォーマンス評価において有効であると広く認識さ

れている。これらのスポーツでは、相手の行動に常に適応する必要がある、VR環境がそのトレーニングにおいて重要な役割を果たすことが期待されている。

2.1.3 視覚フィードバックと神経認知メカニズム

Richlan ら（2023）のレビューによると、VR を活用したトレーニングは、従来のトレーニング方法に比べて有意な効果を示すことが多く、特に視覚的フィードバックやイメージングが神経認知メカニズムを強化し、アスリートのモーター技能や心理的能力の向上に寄与する可能性があることが示唆されている[4]。これにより、VR 技術は筋力トレーニングの効果を高める有力な手段となり得ることが確認されている。

2.1.4 技術の進展と今後の課題

Haar ら（2021）の研究は、VR 内での視覚フィードバック操作が実世界のスキル学習においても有効であることを示している、VR 環境でのトレーニングがモーター学習を促進する可能性があることを示唆している[7]。また、Kinect を使用した研究では、低コストでVRやAR技術に応用できることが確認された、筋力トレーニングにおける動作解析やコーチングの新たな可能性が広がることが期待されている[8]。

一方で、VR 技術が実際のパフォーマンスにどのように転送されるかについては、さらに多くの研究が必要である。例えば、Kim ら（2019）の研究では、VR 訓練が実際の歩行能力に転送されることが確認されている、この成果が他の運動技能にも応用可能であるかどうかを調査することが今後の課題となる[9]。

2.2 筋力トレーニングのリスク

2.2.1 筋力トレーニングのけがリスク

筋力トレーニングは健康維持において非常に重要である一方で、運動やその学習過程において発生する怪我のリスクには十分な注意が必要である。

筋骨格系損傷(「Musculoskeletal Injuries」 MSK-Is)は、競技パフォーマンスや長期的な体力に影響を及ぼす重要な要因である、筋力トレーニングや青少年の身体活動において特に懸念される。近年、筋骨格系損傷の疫学的特徴、予防戦略、治療法を中心に多くの研究が行われており、関連するリスクを理解するための重要な基盤となっている[14]。

Gimigliano ら(2021)は、成人アスリートの MSK-is に関する研究で、スポーツや一般的な傷害の種類によって傷害リスクに違いがあることを発見し、多くの文献に基づいたこの研究の結果は、アスリートが伝統的な鍛え方をすることで直面する健康上の課題を浮き彫りしている。例えば、高負荷のスポーツでは、アスリートの下肢に大きなストレスがかかり、さまざまな怪我につながりやすい。この研究では、熾烈なスポーツにおける MSK-I の最も一般的なタイプとして、筋肉や腱の緊張と靱帯の捻挫が挙げられている。これは、筋肉や靱帯の使いすぎや誤用によるこれらの怪我を避けるためには、従来のトレーニング方法では不十分な場合があるという事実を反映している[14]。

伝統的なトレーニングのもとでの傷害については理解が深まったが、これらの傷害を減らし、トレーニングの成果を向上させるための革新的なトレーニング方法を模索するには、まだまだ探求の余地がある。スポーツトレーニングにおける新たなトレーニング補助として、バーチャルリアリティ VR 技術の応用が広く注目されている。

要約すると、筋骨格系の損傷は、筋力トレーニングにおいて、特に経験の浅い初心者にとって無視できないリスクである。既存の研究結果に基づき、標準化された動作に対する指導方法とリアルタイムのフィードバックメカニズムをさらに探求することは、傷害の発生率を低下させ、筋力トレーニングの安全性と有効性を向上させるのに役立つであろう。これらの知見は、インテリジェントなトレーニング補助器具の開発に科学的根拠と実用的方向性を与えるものである。

パワーリフティングの傷害研究の分野では、Ulrika Aasa らによる *Injuries among weightlifters and powerlifters: a systematic review* が代表的な研究である[15]。この論文は、一般的な傷害の種類、発生率、傷害部位など、ウェイトリフティング選手とパワーリフティング選手の傷害に関するシステマティック・レビューを提供し、スポーツ医学とアスリート・トレーニングの実践に重要な基礎を提供している。

2.2.2 傷害発生しやすい部位

Aasa らによる研究では、筋力スポーツにおける筋骨格系の傷害の一般的な部位は、腰と肩に集中していることが示されている。これらの部位は、高負荷トレーニング中に大きな機械的ストレスを受けるため、傷害のリスクが高い。

特に、ウェイトリフティングや同様の筋力トレーニングでは、腰痛と肩こりが最もよく報告されるタイプの傷害である。

肩、膝、腰の傷害は、ウェイトリフティングとパワーリフティングでよく見られた。膝の傷害はウェイトリフティングで多く、その理由のひとつは、ウェイトリフティング選手がディープスクワットをするとき、バーベルが腹斜筋の上部に垂直に後方からかかるため、膝関節周囲のトルクが大きくなりやすいことであろうと研究は指摘している。[15]

ウェイトリフティングとパワーリフティングにおける傷害リスクを抑制するためには、正確な動作指導と初心者への適切なトレーニング支援が不可欠である。Aasa らの研究を基に、本研究が提案する VR ベースの動作補正システムは、初心者が正しい動作を効率的に習得するための一助となる可能性を示している。また、Keogh & Winwood らのウェイトリフティングのトレーニング操作中の傷害の疫学に関する研究でも、技術的特性やトレーニング要件が異なるため、身体傷害のリスクはスポーツによって異なることが示されている[16]。Aasa ら[15]の知見と共通して得られたのは、[筋緊張、関節捻挫、腱炎が最も一般的な傷害であり、肩、股関節、膝が最も一般的な傷害部位であった。さらに分析を進めると、スポーツによって傷害の種類や部位に特異性があることがわかった。例えば、ウェイトリフティングでは肩や腰の傷害が多いのに対し、膝や股関節の傷害はウェイトリフティングで多い。例えば、肩や背中の傷害はウェイトリフティングで起こりやすく、膝や背中の傷害はウェイトリフティングで起こりやすいのは、これらの部位にかかる負荷が大きいためである]。[16]

近年、フィットネスを求める人が増えている。クロスフィットは、総合的なフィットネストレーニングシステムとして注目されている。エアロビクス、体操、パワーリフティングなどのスポーツの要素を組み合わせたクロスフィットは、常に変化する機能的な動きの範囲を通じて、参加者のフィットネスと健康を向上させる[17]。

スペインのクロスフィット関係者を対象とした Lucas Lastra-Rodriguez らによる調査では、182 人の回答者に合計 143 件の負傷が記録されており、筋肉や関節の負傷がこのスポーツで広く見られる問題であることが示唆されている[17]。この研究ではさらに、一般的な負傷部位は肩（29.1%）、腰（17.5%）、膝（15.8%）であり、これらの負傷の大部分は非公式の競技会ではなく、トレーニング中に発生している（85.7%）ことを指摘している。

このような結果は、クロスフィットのような機能的な運動を含むフィットネス活動において、トレーニング中の負傷リスクが高いことを示している。しかし、これらのリスクを軽減し、運動効果を最大化するためには、トレーニング中にリアルタイムで動作の正確性を監視し、適切なフィードバックを提供するシステムが必要である。

2.2.3 リスク軽減方法

傷害リスクを軽減するための方法に関する研究が徐々に注目されるようになってきた。なかでも、フリーウェイトトレーニングやウェイトトレーニングなどの高負荷運動は、傷害リスクが高くなる可能性があるため、盛んに研究されている[18]。Maria A Bernstorffらの研究では、フリーウェイトトレーニングは、有酸素運動やマシントレーニングと比較して、傷害の発生率が有意に高いことが示唆されている。さらに、この研究では、プロのトレーナーの指導のもとでトレーニングを行った場合、傷害のリスクが有意に低くなることが指摘されている。これは、トレーナーが個人単位で処方的なトレーニングプログラムを作成し、動作ミスがあった場合にタイムリーな修正フィードバックを提供できるためである。しかし、これまでの研究では、主に傷害の分布と発生率の統計的分析に焦点が当てられている、初心者トレーニングの際の具体的な傷害予防戦略や、リアルタイムのエラー修正機能についての探求はまだ不十分である。これらの研究結果および文献を総合すると、筋力トレーニングにおける初心者の課題として、正しいフォームの習得の難しさやスポーツ傷害のリスクが依然として大きな問題であることが明らかとなる。特に、クロスフィットなどの機能的運動においては、負傷リスクが高く、リアルタイムで動作の正確性を監視し適切なフィードバックを提供するシステムの必要性が指摘されている。一方で、既存のトレーニング手法（ビデオ指導やインストラクターによる指導）では、コストや効率性、フィードバック不足といった課題が残されている。

2.3 現在の研究の不足を指摘

2.3.1 既存研究の不足

これらの研究結果および文献を総合すると、筋力トレーニングにおける初心

者の課題として、正しいフォームの習得の難しさやスポーツ傷害のリスクが依然として大きな問題であることが明らかとなる。特に、クロスフィットなどの機能的運動においては、負傷リスクが高く、リアルタイムで動作の正確性を監視し適切なフィードバックを提供するシステムの必要性が指摘された。一方で、既存のトレーニング手法（ビデオ指導やインストラクターによる指導）では、コストや効率性、フィードバック不足といった課題が残されている。

2.3.2 本研究の革新性

本研究では、これらの課題を解決するために、リアルタイム姿勢検出技術とVR技術を組み合わせた新しいアプローチを提案する。このシステムは、初心者向けにリアルタイムで動作解析とエラー検出を行い、直ちにフィードバックを提供する機能を有する。これにより、利用者が安全かつ効率的にトレーニングを行える環境を構築することを目指している。また、腰部および膝部の角度変化を記録・分析することで、VRシステムを活用した動作学習の有効性を検証し、従来の手法に比べた優位性を示す。

2.3.3 本研究の成果期待

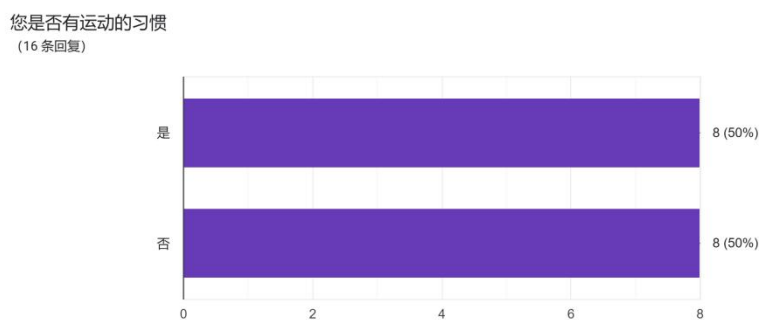
本研究の成果は、VR技術を活用した筋力トレーニングの新たな可能性を広げるだけでなく、スポーツ傷害のリスク軽減や運動技能向上への実践的貢献も期待される。

第3章 実験設計

3.1 アンケートによる動作選定

本研究におけるアンケート調査の対象は20～30歳の健康な成人である、男女比率はおおよそ均等であった。参加者の選定条件として週に一回以上の運動習慣があることを基準とし、筋力トレーニングやほかの運動に対する興味がある者を主に募集した。

3.1.1 運動習慣の有無



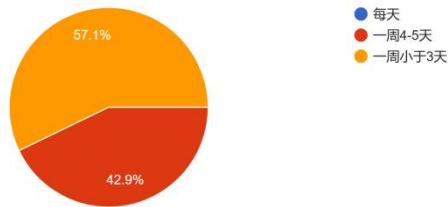
(図 3.1.1)

図 3.1.1：運動習慣があるかどうか

「動作を選定するためまず運動習慣を調査する、習慣がある人の割合は半々である。」

3.1.2 運動頻度

您做运动的频率是多少
(14 条回复)



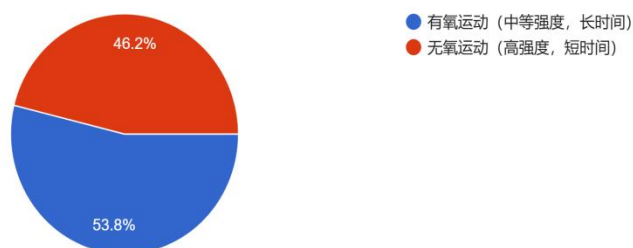
(図 3.1.2)

「また、運動頻度について調査する、42.9%の人は週四五回実施している、57.1%の人は週三回未満である、毎日運動する人がいないである。」

図 3.1.2：運動頻度を調査する

3.1.3 運動のカテゴリー

您的运动类别倾向于什么
(13 条回复)



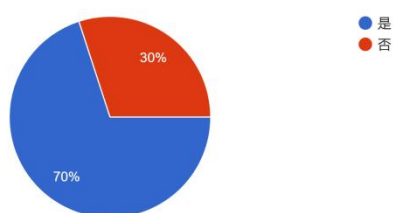
(図 3.1.3)

「運動種類を調査する際、53.8%の人は有酸素運動を傾ける、46.2%の人は主に無酸素運動を行う。これによる一般的には有酸素運動を実施する人が多く。」

図 3.1.3：主に有酸素運動や無酸素運動行うに関する調査

3.1.4 プログラムに無酸素運動を加える意志があるかどうか

如果有指导您是否愿意将无氧运动加入到您的运动计划
(10 条回复)



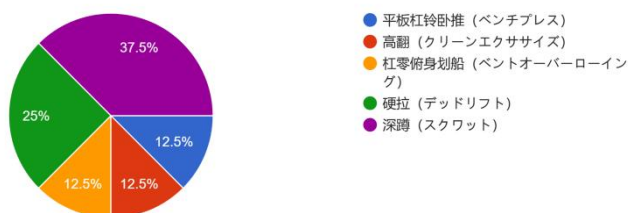
(図 3.1.4)

図 3.1.4：有酸素運動の人、無酸素運動を始める意欲があるかどうかを調査す

「有酸素運動の群体に対するさらなる調査する、この群体は 70%の人は自分のプランに無酸素運動を追加するつもりである、これによる無酸素運動は人気であるを示される。」

3.1.5 いくつかの動作のうち、どれが望ましいか

在以下运动中您更倾向于哪一项
(8 条回复)



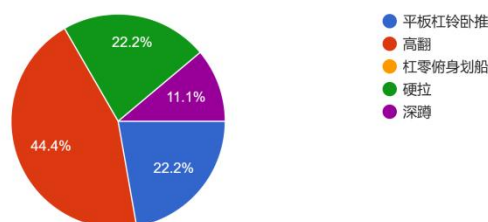
(図 3.1.5)

図 3.1.5：有酸素運動の人、気になる動作

「さらに深めに調査による、スクワット好きな人は37.5%を占める、グリーンエクササイズは12.5%である、デッドリフトは25%である、ベンチプレスは12.5%である、ベントオーバーローイングは12.5%である。これによるスクワットは大人気動作であると示される。」

3.1.6 最も難しいと思われる動作はどれか

以上動作中您觉得哪一项掌握难度更大
(9条回复)



(図 3.1.6)

図 3.1.6：有酸素運動の人、いくつ動作の中でどちらが最も習得難しいと思うこと

「これによるこの群体の思う通りスクワットは大人気ですが、習得することにはそんなに難しいではないであると示される、逆に12.5%であるクリーンエクササイズが一番難しいと思われる。」

3.1.7 いくつかある動作の中でどれが一番好きですか？

在以下无氧运动中您最喜欢哪一项
(14 条回复)



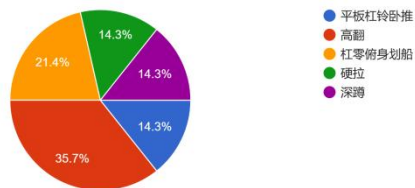
(図 3.1.7)

図 3.1.7：無酸素運動の経験者向けのアンケート

「無酸素運動群体に向け調査によるいくつか動作の中で一番好きな動作はベンチプレス 50%を占める、デッドリフトは 14.3%である、スクワットは 35.7%を示された。」

3.1.8 最も難しいと思われる動作はどれか

以上動作中您觉得哪一项在开始学习时难度最高
(14 条回复)



(図 3.1.8)

図 3.1.8：無酸素運動の経験者向けのアンケート

「無酸素運動群体の調査によるクリーンエクササイズも最も難しい動作と認められる。」

事前アンケート調査による、有酸素運動と無酸素運動の嗜好、および特定の運動に対する主観的な印象について、研究参加者の分布を明らかにした。 調査

の結果、以下のことが明らかになった：

運動タイプの好み

回答者の中では有酸素運動が優勢であった。しかし、有酸素運動人口の70%が、トレーニングプログラムに無酸素運動を加える意向を示している。これは、トレーニング全体における無酸素運動の可能性と人気が高いことを示唆している。

運動の好みと知覚される難易度

主観的嗜好の観点からは、ほとんどの参加者がスクワットを無酸素運動として好んでいた。

しかし、動作習得の難易度を調査したところ、44.4%がクリーンエクササイズを習得するのが最も難しい動作であると認識していた。このことは、クリーンエクササイズを選択することが、トレーニングを計画する際に、より高いレベルの不安や技術的な課題を誘発する可能性があることを示唆している。

無酸素運動経験者からのフィードバック

無酸素運動経験者は、フラットバーベルベンチプレスを選択する傾向が高く、この結果は、筋力トレーニング集団の間で一般的な選択であることを反映している。

経験豊富なトレーナーでさえ、36.7%がハイロールを最も難しい動作と考えており、ハイロールテクニックの複雑さが再確認された。

実験動作の選択

総合的な調査結果から、クリーンエクササイズは複雑な無酸素運動として、習得の難易度が広く認知されているだけでなく、無酸素トレーニングにおける特殊な位置づけから研究価値が高いことがわかった。このことを踏まえ、本研究では、複雑な動作の学習指導にVR技術を用いることの有効性を探るため、実験動作としてクリーンエクササイズを選択した。選択した動作の標準的なビデオを探す。

3.2 アクション映像の選定と紹介

3.2.1 画像モデル選定

アンケート調査による、実験対象動作としてクリーンエクササイズを抽出した。また、動作デモの正確性・権威性を担保するため、YouTubeにアップロードされているプロアスリートの指導動画を参照元とする。選択した動画デー

タを PyCharm 開発環境にインポートし、処理を行う。インポートした動画から、MediaPipe と OpenCV 技術を使って、主要な身体部位の座標データを抽出する。具体的には、関節の位置や角度の変化など、動きの主要なパラメータが含まれる。

3.2.2 データ可視化する

抽出したデータを可視化し、動きの軌跡と関節角度の変化曲線を生成する。モーションデータをプログラムインターフェースを介して Unity プラットフォームに転送する。動画の動きと整合性のあるスケルトンモデルを Unity で同時に生成し、標準的な動きを 3D 空間で可視化できるようにする。これによる、実験者は比較のための視覚的なリファレンスを得ることができる。

3.2.3 リアルタイムモーションキャプチャ

外部の HD カメラを接続し、参加者の動きをリアルタイムでキャプチャする。OpenCV でカメラデータを読み込み、リアルタイムで送信する。MediaPipe を使ってリアルタイムカメラの映像を処理し、各フレームのキーポイントデータを抽出して 3D 座標に変換する。

3.2.4 Unity で機能を実現する

低レイテンシーと高効率を確保するため、UDP プロトコルを使用して、キャプチャした 3D データを Unity に転送し、リアルタイムで処理する。UDP プロトコルの利点は、伝送速度が速く、リアルタイムデータ伝送に適していることである。環境ノイズや動きの変化によるデータの揺らぎを低減するため、カルマンフィルタリングなどの平滑化アルゴリズムを用いて送信データを処理することで、データの安定性を確保し、画像の揺らぎや不安定さを回避している。Unity の 3D モデル機能を用いてバーチャルキャラクターの骨格モデルを作成し、リアルタイムデータに応じてモデルのポーズを調整することで、参加者の動きと同期させている。

3.3 腰の角度と膝の角度の計算

3.3.1 標準データを検出

標準映像の腰の角度と膝の角度を計算し、角度変化の閾値を指定する。腰の

角度の変化範囲を 20～80、膝の角度の変化範囲を 25～175 に指定する。

3.4 VR ヘッドセットの接続

3.4.1 デバイスの利用と音声提示機能の導入

参加者は VR ヘッドセットを装着し、自分の仮想骨格モデルをリアルタイムで表示する。このインタラクションを通じて、参加者は自分の動きとバーチャルモデルの比較を確認し、その都度姿勢を調整することができる。また、音声プロンプト機能による、動作が規定範囲から外れると音声で注意喚起が行われ、リアルタイムに姿勢を修正することができる。MediaPipe のキーポイント抽出機能と 3D 座標変換機能による、各フレームの映像データを正確に解析することができる。MediaPipe のキーポイント抽出機能と 3D 座標変換機能による、ビデオデータの各フレームを正確に分析することができる。UDP プロトコルの高速伝送とカルマンフィルタリングによるスムーズな処理による、データのリアルタイム性と安定性を確保している。Unity の 3D モデル機能と VR ヘッドセットを組み合わせることで、参加者は自分の動きを視覚化し、リアルタイムのフィードバックで調整・最適化することができる。

3.5 実験者募集

実験参加者は 10～15 名を予定（実際は 13 名）参加者は 20～30 歳の運動障害や身体障害のない学生から選ばれた。参加者は指導ビデオを見て標準的な動作姿勢を理解し、ビデオの内容に従って 2 回目の運動を行う。運動時間は 30 秒である。2 回目の運動のデータを記録する。

3.6 事前アンケート

基本情報（性別、年齢、身長、体重）、週間の運動回数、主な運動の種類、怪我の経験の有無、運動習慣、その他調査（運動姿勢を気にしているか、運動指導を受けているか、運動の失敗を自分で見つけるか）など、VR 機器に対する耐性（使用経験の有無、新技術スポーツに対する考え方）、実験への期待。

3.7 実験プロセス

3.7.1 一回目

実験者は自分の印象に従って 30 秒間運動する。最初の動作のデータを記録する（各フレームのデータ内容、腰の角度、膝の角度）。

3.7.2 二回目ビデオ学習段階

参加者は指導ビデオを見て標準的な動作姿勢を理解し、ビデオの内容に従って 2 回目の運動を行う。運動時間は 30 秒である。2 回目の運動のデータを記録する。

3.7.3 三回目 VR トレーニング段階

VR 環境では、参加者はヘッドセットを装着し、仮想骨格モデルと自分の動きを比較する。実験者はリアルタイムのフィードバックと角度の変化に応じて姿勢を調整する。動きの角度が範囲外になると、システムは音声によるプロンプトを発し、参加者に動作の修正を促す。この音声フィードバックは、基準値を外れた際に即座に知らせる仕組みであり、参加者が動作の正確性を意識しながらトレーニングを行うことを助ける。

また、各フレームの腰と膝の角度データを記録し、動作中のリアルタイムフィードバックを確保する。音声フィードバックと視覚的な仮想骨格モデルの併用により、参加者は動作の精度を高めながら学習を進めることができる。

3.7.4 四回目

ビデオ学習と VR トレーニングの後、実験者は最終的な運動テストを行う。動作時間は 30 秒とし、前 2 回との比較のために各フレームの動作データを記録する。学習効果を評価するために最後の運動のデータを記録する。

3.8 事後アンケート

3.8.1 実験に対する参加者の総合的な満足度、長所と短所、実験期間中の運動

改善に関する知覚的变化。

3.8.2 運動効率の改善や傷害リスクの認知の変化など、運動トレーニングの効

果に関する参加者の評価。

3.8.3 VR 技術を取り入れた運動トレーニング方法に対する参加者の受容性、

継続使用意欲、従来の方法との比較の評価。

3.9 感想と改善アンケート

参加者は、実験プロセス全体についての感想、VR 技術が効果的に自分の動作改善に役立ったと思うかどうか、今後のトレーニング方法についての提案をまとめる。

3.10 データ収集に使用した方法とツールを記述する

実験セクションでは、実験の手順と方法について詳しく述べる。データの正確性と処理の効率性を確保するため、Python を使用して、モーションデータの自動記録と自動処理を実現するコードを記述した。この処理による、データ管理が簡素化されただけでなく、データ解析の効率も向上した。Pandas、NumPy、SciPy などのライブラリを利用することで、データのクリーニング、変換、分析を簡単に行うことができた。さらに、Matplotlib や Seaborn などの可視化ライブラリを利用することで、データをグラフやチャートの形で可視化することができる、実験結果をよりよく理解し、解釈するのに役立った。実験中、モーションデータを自動的に記録・処理するコードによって、手動操作の面倒さやエラーが大幅に軽減された。実験の進行状況をリアルタイムでモニターし、その後の分析や研究のためにさまざまな統計レポートやグラフを素早く作成することができた。この方法は、データ処理の効率を向上させるだけでなく、データの正確性と一貫性を保証し、本研究に確かな基盤を提供する。実験中、Python で書かれたコードを用いて運動角度データのリアルタイム記録を実現し、これらのデータを CSV ファイルとして保存した。この方法による、データのトレーサビリティが確保されただけでなく、その後の解析や処理が非常に容易になった。リアルタイムに CSV ファイルとして記録することで、各実験者の動作角度データを正確に記録することができた。この CSV ファイルは、その後の解析や処理を容易にするだけでなく、実験データのバックアップとしても機能し、データの完全性と安全性を保証している。

各実験のデータは自動的に標準的なアクションデータと比較され、以下のメトリクスを生成するようにプログラムされている：

- 角度範囲超過統計：腰と膝の角度範囲を超過した回数を記録する。
- 累積エラー時間： 角度が範囲外になった累積時間（秒）を計算。
- Angular Errors and Statistics（角度エラーと統計）：各実験の腰角度と膝角度のエラーデータを作成する。

このシステムは、実験者の動きの角度データをリアルタイムで毎フレーム取得し、以下の指標に関する統計データを提供する：

- 角度誤差と統計：各実験の腰と膝の角度誤差データを生成。
- 腰の誤差の累積時間、左膝の誤差の累積時間、右膝の誤差の累積時間
- 腰の角度誤差、膝の角度誤差（左右）
- 平均二乗誤差（腰）、標準偏差誤差（腰）
- レポートの自動作成

データは前処理され、コードを用いて計算され、以下のような標準化されたレポートが作成される：

角度範囲を超えた回数と累積エラー時間。

変化率：標準データを比較し、エラーの種類と累積時間ごとの変化率を算出する：

ウエストの累積時間変化(%）、左膝の累積時間変化(%）、右膝の累積時間変化(%）。

ウエスト範囲外変化率(%）、左膝範囲外変化率(%）、右膝範囲外変化率(%）

ウエスト角度誤差変化率(%）、左膝角度誤差変化率(%）、右膝角度誤差変化率(%）。分類結果：「高（80%～100%）」、「中（50%～80%）」、「低（20%～50%）」、「低（0%～20%）」の基準に従って、各学習モードのパフォーマンスを分類し、まとめた。「低（0%～20%）」で各学習モードの成績を分類し、まとめた。

3.11 データ分析の手法

3.11.1 データ可視化する

Python の Matplotlib や Seaborn などのライブラリを使用して、実験結果を折れ線グラフや棒グラフの形で表示することで、学習モードの違いによる効果の違いを視覚化することができる。この可視化手法は、データの傾向を明確に

示すだけでなく、実験結果をより深く理解し、分析するのに役立つ。

具体的には、折れ線グラフは、異なる学習モード下での実験者の角度誤差の変化を示したり、異なる時点のデータを比較して学習効果の傾向を観察したりするのに用いることができる。また、棒グラフは、異なる学習モード下での異なる実験者の平均誤差値を比較するために用いることができる、どの学習モードがより効果的であるかを可視化することができる。

こうすることで、動画学習と VR 学習の運動コントロールの効果の違いをより直感的に把握することができる。例えば、折れ線グラフであれば、映像学習と VR 学習後の実験者の角度誤差の傾向を示すことができる、棒グラフであれば、2つの学習モード下での平均誤差値の比較を示すことができる。これらのグラフは、実験結果の理解を深めるだけでなく、さらなる研究の強力なサポートとなる。

3.11.2 モデル比較

本研究では、4つの異なる学習モード（非ガイド、ビデオ学習、VR 動的骨格表示、復習）が腰椎と膝関節の動きの正常性に及ぼす影響を比較した。詳細なデータ解析と可視化チャートによる、各学習モードが動作の正常性に及ぼす影響の違いを明確に見ることができた。

まず、何も指導を受けずに動作を練習する無指導モードでは、腰関節と膝関節の動作の正常性が悪く、エラー数が多く、累積エラー時間が長くなった。これは、指導がないために実験者が自己修正することが難しく、動作の正確性や安定性が低いことを示している。

次に、ビデオ学習モードでは、実験者はティーチングビデオを見て動作を学習した。データ解析の結果、ビデオ学習により動作の仕様が大幅に改善され、腰と膝関節の角度誤差が減少した。しかし、リアルタイムのフィードバックがないため、実験者は動作中に時間内に修正できない誤差が残る可能性がある。第三に、VR 動的骨格表示モードでは、実験者は VR 技術を通じて動作を学習し、教示骨格モデルを観察し、自分の骨格表示をリアルタイムで比較した。データ解析の結果、VR 学習は動作の正確性と安定性を著しく向上させ、腰関節と膝関節の角度誤差が有意に減少した。実験者はリアルタイムのフィードバックによってエラーを時間内に修正することができる、間違った動きの蓄積と固着を避けることができた。

最後に、復習モードでは、実験者がこれまでの学習モードでのトレーニング後に復習を行った。データ分析の結果、復習により動作の正常性がさらに定着し、腰と膝関節の角度誤差がさらに減少し、動作の正確性と安定性が著しく向上した。

自動生成された変化率レポートと学習モードの分類を用いて、動作の正規化に対する各学習モードの寄与を定量化することができた。その結果、VR 技術は動作学習において最も効果的であり、動作の正確さと安定性を大幅に向上させることができた。対照的に、ガイドなし学習モードとビデオ学習モードは比較的效果が低かったが、それでもある程度は動作の仕様を改善することができた。

3.11.3 データと事後アンケート併せて分析

本研究では、実験者の客観的な角度変化データだけでなく、アンケートによる主観的な感情も収集した。主観的なアンケートデータと客観的な角度変化データを組み合わせることで、実験者の主観的な感覚と実際の動作改善との整合性をより総合的に分析することができる。

まず、主観的なアンケートデータは、異なる学習モードにおける実験者の経験や感情を反映することができる。例えば、ビデオ学習と VR 学習では、実験者の効果に対する評価が異なる可能性がある。これらの主観的データを分析することで、異なる学習モードに対する実験者の好みや満足度を理解することができる。

第二に、客観的な視点変化データから、異なる学習モードにおける実験者の実際の動作改善を知ることができる。異なる時点のデータを比較することで、ビデオ学習と VR 学習後の実験者の角度誤差の変化の傾向を観察することができる。これらのデータは、異なる学習モードが運動の正常性に及ぼす影響を定量化するのに役立つ。

主観的なアンケートデータと客観的な角度変化データを組み合わせることで、実験者の主観的な認識と実際の動作改善との整合性を分析することができる。例えば、主観的なアンケートで実験者が VR 学習に高い満足度を示す、客観的なデータでも VR 学習が動作の正確性と安定性を大幅に向上させることが確認できれば、VR 学習は動作の規則性向上に高い効果を発揮すると結論づけることができる。

さらに、このような複合分析は、潜在的な問題や改善の方向性を特定するのも役立つ。例えば、主観的なアンケートで実験者がある学習モードに対する満足度が低いと回答している一方で、客観的なデータではその学習モードが動作の改善に大きく影響している場合、実験者の満足度が低い理由をさらに探す、改善を目標とすることができる。

3.12 計算公式

3.12.1 角度計算

$$\theta = \arccos \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|} \right) \quad (\text{図 3.12.1})$$

股関節と膝関節の角度変化は、ドット積の角度式を用いて計算される。この計算により、動作の精度を数値的に分析することができる。

3.12.2 標準偏差の公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (\text{図 3.12.2})$$

標準偏差は、運動データのばらつきを評価するために用いられる。この評価により、ビデオ学習や VR 学習などの学習様式による行動の安定性の違いが定量化される。

3.12.3 平均二乗誤差 (MSE)

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_{\text{実験},i} - \theta_{\text{標準},i})^2 \quad (\text{図 3.12.3})$$

図 3.12.3：実験者の動きの正確さと安定性を数値化する。

平均二乗誤差（MSE）を用いて、参加者の行動が標準的な行動からどの程度逸脱しているかを数値で評価した。これにより、精度を向上させる VR 学習の効果を定量化することができた。

3.12.4 腰と膝の角度の誤差の公式

$$\Delta\theta = |\theta_{\text{実験}} - \theta_{\text{標準}}| \quad (\text{図 3.12.4})$$

股関節と膝関節の角度誤差を計算式で算出し、各フレームの動作精度をリアルタイムで評価する。

3.12.5 データの変化率の計算式

$$\Delta P = \frac{X_{\text{後}} - X_{\text{前}}}{X_{\text{前}}} \times 100\% \quad (\text{図 3.12.5})$$

図 3.12.5：異なる実験アプローチの効果は、変化率の公式を用いて定量化された。

異なる学習モード間における動きの改善効果を定量化する。

第4章 実験・評価

4.1 研究結果

実験者	腰角度の誤差	膝角度の誤差 (左)	膝角度の誤差 (右)
1	-36.33	+23.33	-17.56
2	-29.17	+4.47	-21.18
3	-29.25	+4.5	-21.14
4	-12.94	-3.69	-2.3
5	-1.01	+4.58	-1.13
6	+14.47	+13.47	+14.88
7	-2.46	+2.34	+1.68
8	+3.29	+2.48	-32.42
9	-39.91	+21.86	+12.99
10	+7.41	-6.66	+0.78
11	+25.51	+11.04	-4.76
12	-8.64	+10.43	+0.81

表 4.1: 各実験者第四回実験最後の練習効果, VR 学習と比較。単位%

この表は、動作を学習した後の各実験者の効果を表示したもので、腰の角度の変化の差、左膝の角度の変化の差、あちら膝の角度の変化の差が含まれている。+の値は誤差の増加を表す、-の値は誤差の減少を表す。

実験者の67%（8名）は、VRによる運動学習後、腰部角度コントロールの誤差が改善した。これは、VRによる運動学習が、ほとんどのケースで腰部角度コントロールにプラスの効果をもたらしたことを示している。

4.1.1 腰椎角度コントロール

実験者の33%（4人）は腰部角度コントロールの誤差が悪化したことから、VRによる運動学習はすべての人に有効ではなく、個人差やその他の影響因子がある可能性が示唆された。

4.1.2 左膝角度コントロール

実験者の83%（10人）が左膝角度コントロール時にエラー状態を悪化させたことから、VR運動学習は左膝角度コントロールには有効ではなく、訓練方法のさらなる最適化や訓練内容の調整が必要であることが示唆された。実験者の17%（2人）が左膝角度コントロール時にエラー状態を改善したことから、VR運動学習は特定の状況下において、左膝角度コントロールに対して依然として一定のプラスの効果があることが示唆された。

4.1.3 右膝の角度コントロール

右膝角度コントロール：実験者の58%（7人）が右膝角度コントロール時に生じるエラー状態の改善を経験している、VR運動学習が右膝角度コントロールにプラスの効果をもたらすことが示唆された。

実験者の42%（5人）が右膝角度コントロール時に生じるエラー状態の悪化を経験したことから、VR運動学習が右膝角度コントロールに及ぼす効果には不確実性がある、さらなる研究と最適化が必要であることが示唆された。

全体として、VR運動学習は腰と右膝の角度コントロールには良い影響を与

えたが、左膝の角度コントロールには悪い影響を与えた。

4.2 第三回実験結果

実験者	腰角度の誤差	膝角度の誤差 (左)	膝角度の誤差 (右)
1	+70.96	-57.99	-63.62
2	-41.21	-9.05	-19.34
3	-41.28	-8.98	-19.28
4	-4.03	-3.12	-2.46
5	-15.15	-8.42	-8.44
6	+11.19	+24.18	-18.71
7	-3.71	+1.20	-3.04
8	-8.69	+7.20	11.62
9	-30.83	+20.73	12.10
10	+14.56	+23.58	-15.63
11	-22.64	+0.48	-13.78
12	-12.63	+13.58	-2.08

表 4.2: 第 3 回実験における各実験者の角度誤差データの比較 比較対象はビデオ学習□ 学習単位 %

実験者の75%（9人）が、ビデオによる運動学習と比較して、VRによる運動学習後に腰部角度コントロールの誤差の改善を示したことから、VRによる運動学習は、骨格の視覚化という文脈において、腰部角度コントロールにプラスの効果があることが示唆された。

実験者の25%（3人）が腰部角度コントロールの誤差に変化を示したことから、おそらく個人差やその他の影響要因による、VR学習が最も効率的でない場合があることが示唆された。

実験者の42%（5人）が、左膝の角度コントロールで生じた誤差の条件が良い方向に変化したことから、VR運動学習が左膝の角度コントロールに依然として何らかの良い影響を与えることが示唆された。

一方、58%（7人）の実験者は、左膝の角度コントロール時にエラー状態が悪化している、VR運動学習は左膝の角度コントロールに効果がなく、訓練方法のさらなる最適化や訓練内容の調整が必要であることが示唆された。

右膝の角度コントロールでは、実験者の83%（10人）がエラー状態を改善しており、VR運動学習が右膝の角度コントロールに良い影響を与えたことが示された。

実験者の17%（2人）が右膝角度コントロール時のエラー状態を悪化させたことから、VR運動学習が右膝角度コントロールに及ぼす効果には不確実性があり、さらなる研究と最適化が必要かもしれない。

4.3 第二回

実験者	腰角度の誤差	膝角度の誤差 (左)	膝角度の誤差 (右)
1	-5.58	+5.00	+0.71
2	-13.64	+6.76	-0.49
3	-13.58	6.83	-0.49
4	-10.44	0.87	2.31

5	10.45	5.75	11.04
6	-4.52	28.05	27.87
7	-19.94	4.35	-0.99
8	40.4	69.72	88.39
9	-33.10	15.47	0.56
10	-1.87	-21.07	35.54
11	-14.24	-3.2	-5.32
12	-4.53	2.94	-1.17

表 4.3: 各実験者の 2 回目の実験ビデオ学習後の角度誤差データの比較 本質的印象単位 %.

実験者の 83% (10 名) は、腰の角度をコントロールする際に生じるエラー状態の改善を示した。これは、簡単な理解と学習過程を経て、運動動作の標準を主観的に認識したことを示している。

17% (2 名) は、学習後も腰のコントロールが不十分であった。これは、個人差の影響か、学習期間が短かったためと考えられる。

膝のコントロールが良くなった参加者は 17% であったが、残りの 83% は左膝の角度のコントロールが良くなかった。誤差の値は大きくないものがほとんどであったが、やはりビデオだけの学習では学習効率は高くないことがわかる。また、右膝のコントロールは 42% の被験者で改善されたが有意な改善は見られず、58% の被験者で改善されなかったことから、映像のみによる動作の学習は効率が悪く、映像から伝わるすべての動作を理解できないことがほとんどであることが明らかになった。

4.4 実験者表現優れたデータ例

実験回数	腰のエラー時間 (秒)	左膝のエラー時間 (秒)	右膝のエラー時間 (秒)	腰角度標準範囲超える回数	左膝角度標準範囲超える回数	右膝角度標準範囲超える回数
1	39.93	39.93	39.93	1132	1198	1198
2	31.23	31.23	31.20	708	973	918
3	27.53	29.77	29.60	629	767	743
4	28.97	29.03	28.73	632	871	753

実験回数	腰部の積算時間変化(%)	左膝の積算時間変化 (%)	右膝の積算時間変化 (%)	腰部の超える範囲変化 (%)	左膝の超える範囲変化 (%)	右膝の超える範囲変化 (%)
2	-21.8	-21.8	-21.9	-10.2	-20.0	-6.7
3	-31.1	-25.4	-25.9	-25	-28	-16.7
4	-27.5	-27.5	-28.1	-5	-12	-10
実験回数	腰部角度誤	左膝角度誤	右膝角度誤	均二乗誤差	標準偏差誤	

	差	差	差	(腰部)	差 (腰部)
1	94.72	121.24	98.86	8972.19	17.36
2	81.85	129.52	98.38	6699.7	15.89
3	55.7	110.35	79.78	3102.36	24.98
4	67.15	126.69	77.97	4508.46	23.25

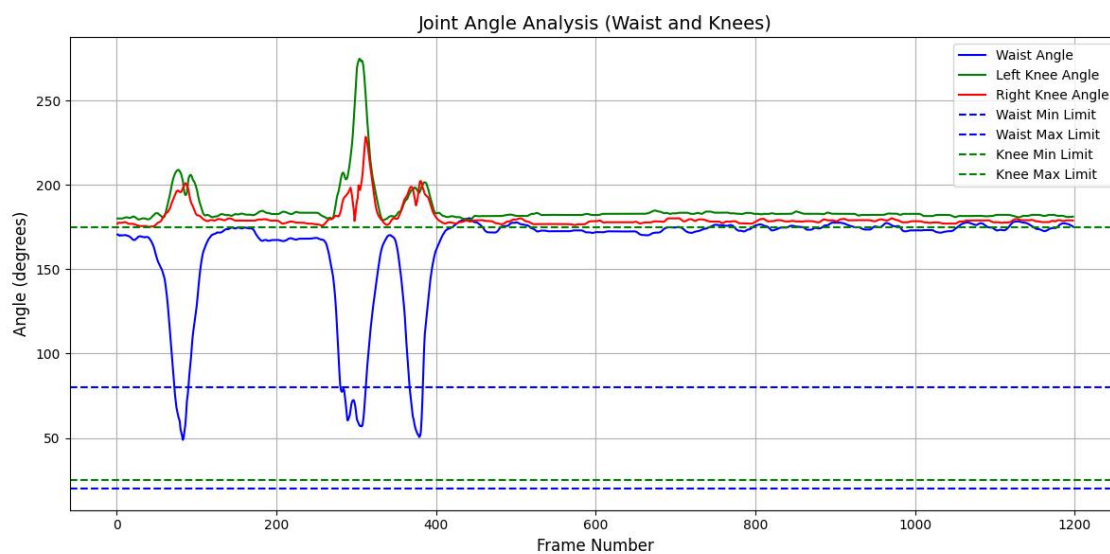
実験回数	腰部角度誤 差 変 化 (%)	左膝角度誤 差 変 化 (%)	右膝角度誤 差 変 化 (%)	均二乗誤差 変化 (%)	標準差誤差 変化 (%)
2	-13.58	6.83	-0.49	-25.32	-8.49
3	-41.28	-8.98	-19.28	-65.44	43.85
4	-29.25	4.5	-21.14	-49.77	33.92

実験回数	実験方法	腰部エラー 回数	腰部積算誤 差時間	膝エラー回 数	膝積算誤差 時間
第一回 (自 分のイメー ジ)	指導なし	高い	高い	中	中

第二回（ビデオ学習）	ビデオ学習	中	中	中	低い
第三回（VR 骨格モデル）	骨格モデル +リアルタイムフィードバック	中	中	中	中
第四次（復習）	学習を通じて新たなイメージを立て	中	低い	低い	低い

表 4.4: 実験者四回実験のデータと標準データを比較した結果

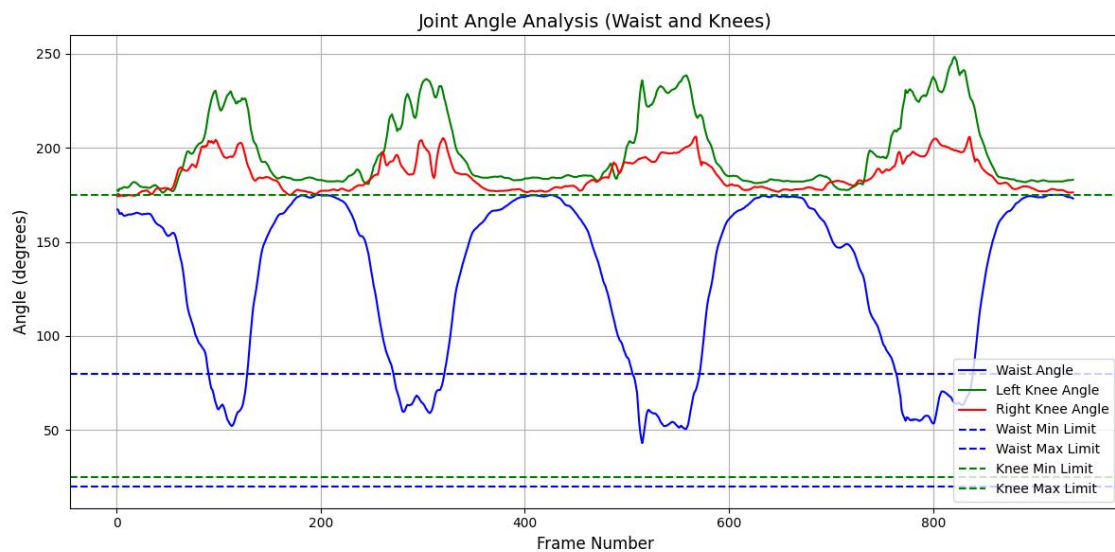
4.4.1 第一回データの変化図



(図 4.4.1：第一回実験)

画像から明らかなように、左膝の角度と右膝の角度のばらつきは、まったく基準値内に収まっていない。第1試技の成績が悪かったのは、何らかの指示がなかったためである。エラーの回数と累積エラー時間は、腰関節と膝関節の両方で長く、参加者は動きの正常性に大きな問題を抱えていたことが示唆された。即座のフィードバックがなければ、参加者はエラーを自己修正することが難しく、全体として満足のいく結果が得られなかった可能性がある。

4.4.2 第二回データの変化図



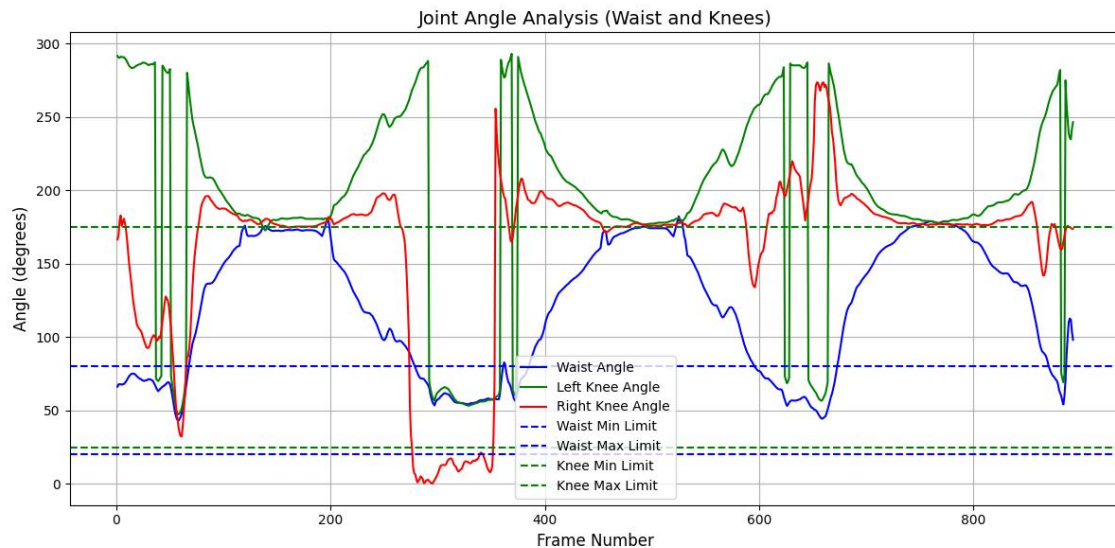
(図 4.4.2：第二回実験)

2回目の実験のデータを見ると、全体的な誤差時間は短くなったものの、膝の角度はまだ基準値内に収まっていない。しかし、データから生成された画像からわかるように、角度の変化の大きさは滑らかになっている。このことは、ビデオによる学習後、実験者が動きを最初に理解し、意識的に動きをコントロールしようと努力したことを示唆している。このことは、ビデオによる動作学習が有効であることを証明しているが、標準値を達成するためには、さらなる練習と調整が必要である。

具体的には、ビデオ学習後、実験者は動作の正しい姿勢をよりよく理解し、模倣することができるようになり、動作における大幅なミスが減少した。膝の角度はまだ標準値には達していないが、このような滑らかな変化の傾向は、実験者が徐々に動作をマスターしていることを示している。今後のトレーニングでは、この基礎の上にさらに最適化・強化することで、より高い動作精度

と安定性を実現することができる。

4.4.3 第三回データの変化図



(図 4.4.3：第三回実験)

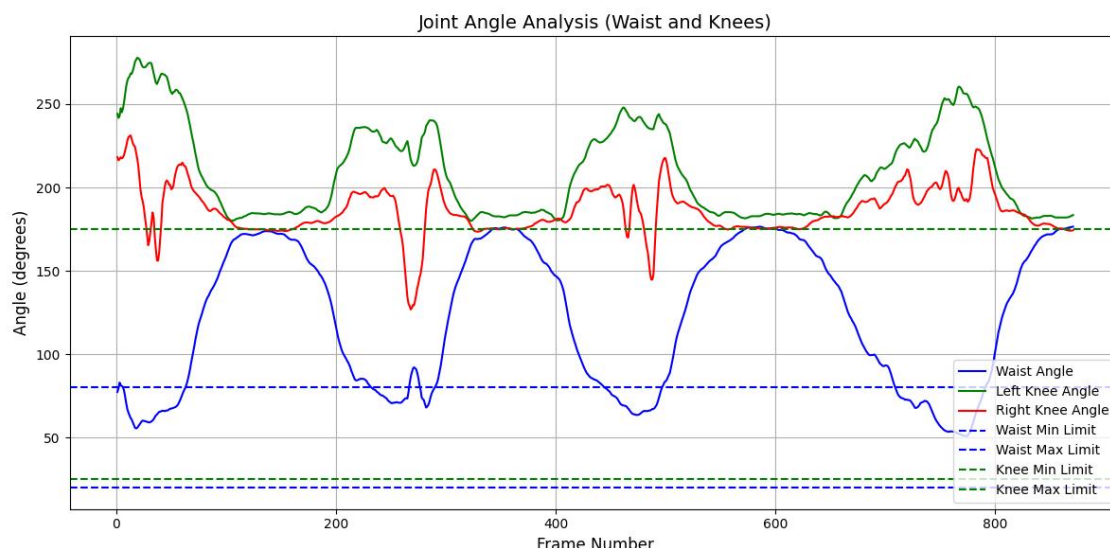
3 回目の実験データでは、VR トレーニング機能を取り入れたことで、実験者の動作の角度制御が大幅に改善された。角度変化が安定するだけでなく、角度解析で示されたように、標準値の領域内の角度変化の数が大幅に増加した。このことから、VR だけでなく、リアルタイムフィードバックによるエラー報告を併用した動作学習は、映像のみによる学習と比較して、VR による動作学習が大幅に効率的である、有意に優れていることが示唆された。

具体的には、実験者は VR トレーニング中にリアルタイムフィードバックを得ることができる、動作のエラーを時間内に修正することができたため、動作の正確性と安定性が大幅に向上した。VR トレーニングを通じて、実験者は正しい姿勢をよりよく理解し、習得することができただけでなく、トレーニングの過程で自分の動きを継続的に調整し、最適化することができた。このリアルタイムのフィードバック・メカニズムにより、実験者はエラーを素早く見つけて修正することができる、間違った動作の蓄積と固着を避けることができる。また、VR トレーニングは、より没入感のある学習体験を提供するため、実験者はより集中して動作の学習や練習を行うことができる。このような没入感のある学習環境は、実験者の学習効果とトレーニング効率を向上させ、短時間でより良いトレーニング結果を得ることに貢献する。

全体として、VR トレーニング機能とリアルタイムフィードバックによるエラ

一報告機構を組み合わせた動作学習法は、実験者の動作の正確性と安定性を大幅に向上させ、動作学習における効率性と優位性を証明している。

4.4.4 第四回データの変化図



(図 4.4.4：第四回実験)

4 回目の実験測定データでは、VR 可視化学習ほどの効果はないものの、具体的な印象のない 1 回目の実験データに比べれば大きく改善されている。可視化チャートから、膝の角度はまだ標準値内に収まっていないものがあるものの、標準値の範囲内でコントロールできている、チャートの変化の大きさから、角度が変わっても急激な増減はなくなっている。これは、実験者が運動のリズムを徐々に把握し、運動を行う過程で意識的に標準的な運動を行うようにコントロールしていることを示している。4 回のデータ記録と 2 回のビデオ学習と VR 学習の学習効果比較を通じて、単数データと可視化されたグラフデータの両方から、VR 学習で、指導の骨格モデル表示を観察し、自分の骨格表示と比較し、リアルタイムで動作振幅の変化を確認して学習し、その過程で音声プロンプトシステムを追加することで、その学習効率はビデオ学習よりもはるかに高いという結論が得られた。ビデオ学習よりもはるかに効率的である。

具体的には、VR 学習は、より没入感のある学習体験を提供し、実験者がより運動の学習と練習に集中できるようにするだけでなく、リアルタイムのフィードバック機構により、実験者が迅速に誤りを発見して修正することができる、誤った運動の蓄積と定着を避けることができる。VR トレーニングでは、実験者はリアルタイムのフィードバックを得ることができる、動作のエラーをタイ

ムリーに修正できるため、動作の正確性と安定性が大幅に向上する。VRトレーニングを通じて、実験者は正しい動作姿勢をよりよく理解し、習得できるだけでなく、トレーニングの過程で動作を継続的に調整し、最適化することができる。

一方で実験者が数人では、得られるデータはそれほど良いものではない

4.5 あんまり顕著ではないデータの例

実験回数	腰のエラ 一 時 間 (秒)	左膝エラ 一 時 間 (秒)	右膝エラ 一 時 間 (秒)	腰角度標 準範囲超 える回数	左膝腰角 度標準範 囲超える 回数	右膝腰角 度標準範 囲超える 回数
1	29.63	29.63	29.63	768	881	843
2	35.10	35.10	35.10	832	1049	1013
3	35.17	31.57	35.17	858	998	728
4	31.17	31.20	30.63	741	931	700
実験回数	腰部の積 算時間変 化(%)	左膝の積 算時間変 化(%)	右膝の積 算時間変 化(%)	腰部の超 える範囲 変化 (%)	左膝の超 える範囲 変化 (%)	右膝の超 える範囲 変化 (%)
2	18.5	18.5	18.5	8.33	19.1	20.1
3	18.6	15.6	-12.9	11.7	-4.9	-28.2
4	5.8	5.7	3.5	-3.4	-11.2	-3.9

実験回数	腰部角度誤 差	左膝角度誤 差	右膝角度誤 差	均二乗誤差 変化（腰 部）	標準偏差誤 差（腰部）
1	88.11	123.44	104.44	7763.24	25.10
2	70.54	128.80	103.41	4976.03	28.80
3	68.10	130.30	99.45	4638.01	27.78
4	67.56	133.61	101.12	4564.32	26.92

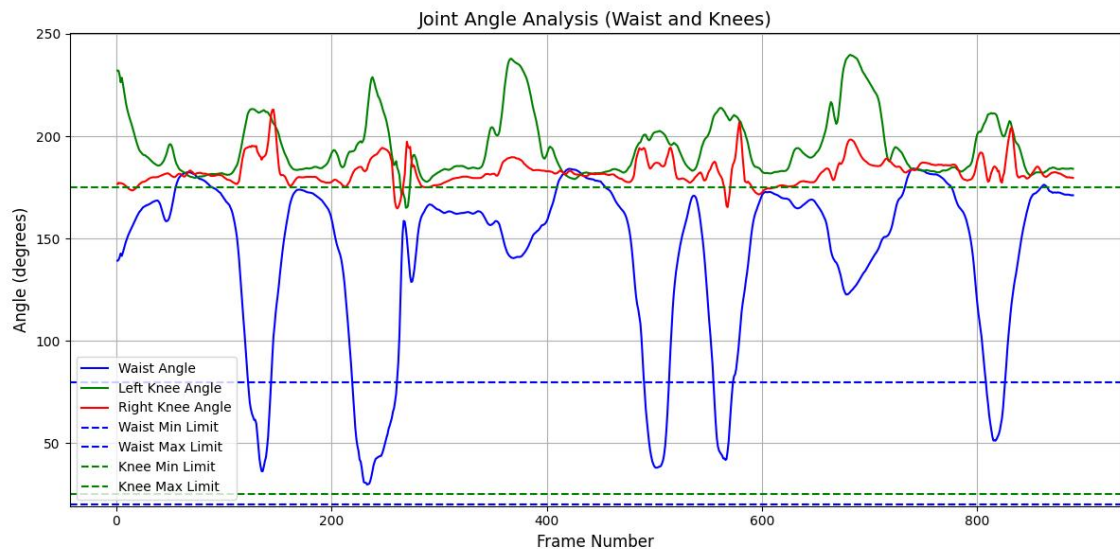
実験回数	腰部角度誤 差 変 化 (%)	左膝角度誤 差 変 化 (%)	右膝角度誤 差 変 化 (%)	均二乗誤差 変化 (%)	標準偏差誤 差(%)
2	-19.94	4.35	-0.99	-35.89	14.08
3	-3.71	1.20	-3.04	-6.79	-3.53
4	-2.46	2.34	1.68	-2.73	-3.14

実験回数	実験方法	腰部エラー	腰部積算誤	膝エラー回	膝積算誤差
------	------	-------	-------	-------	-------

		回数	差時間	数	時間
第一回（自分のイメージ）	指導なし	高い	高い	高い	高い
第二回（ビデオ学習）	ビデオ学習	高い	高い	高い	高い
第三回（VR 骨格モデル）	骨格モデル +リアルタイムフィードバック	中	中	中	中
第四回（復習）	学習を通じて新たなイメージを立て	中	中	中	中

表 4.5:顕著ではない実験者の四回実験のデータと標準データを比較した結果

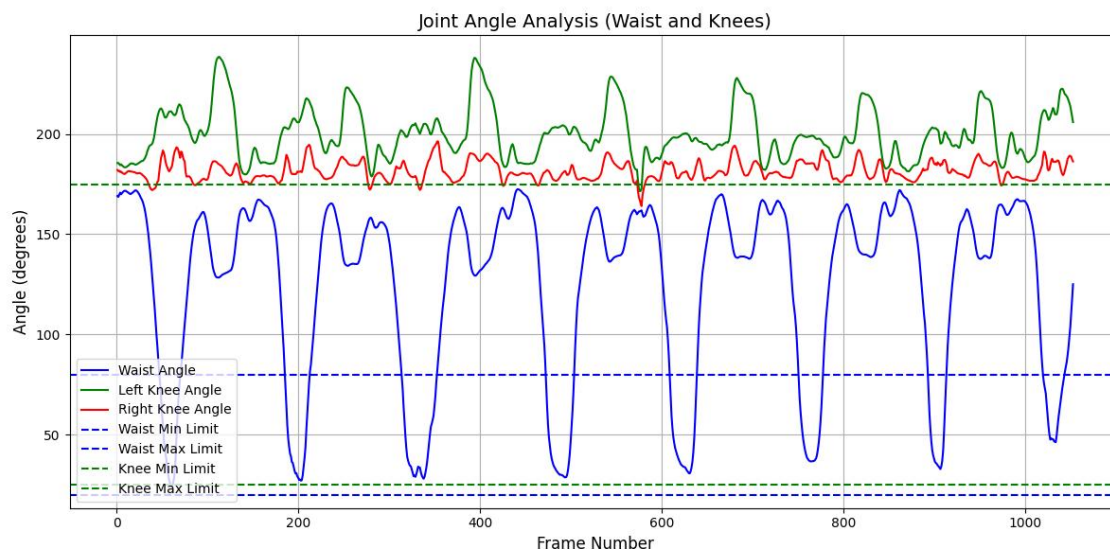
4.5.1 第一回データの変化図



(図 4.5.1：第一回実験)

左膝の角度と右膝の角度の変動は、基本的に基準値内に収まっていない。しかし、実験者の当初の印象からすると、スクワット中の自身の腰の角度の変動が基準値内に収まるようにコントロールすることは可能であったが、何らかの指導がなかったため、初回試行のパフォーマンスは全体的に悪かった。このことは、参加者が動作の正常性により大きな問題を抱えていたことを示している。即座のフィードバックがなければ、参加者がエラーを自己修正することは困難であり、それゆえ全体的な結果は満足いくものではないかもしれない。

4.5.2 第二回データの変化図



(図 4.5.2：第二回実験)

2 回目の実験データを見ると、全体的な誤差時間は減少していないものの、腰部角度誤差は 88.11° から 70.54° に減少 (-19.94%)、右膝角度誤差も 104.44° から 103.41° へ改善 (-0.99%) している。一方で、左膝角度誤差は 123.44° から 128.80° へと増加 (+4.35%) しており、膝部の動作にはさらなる調整が必要であることが分かった。

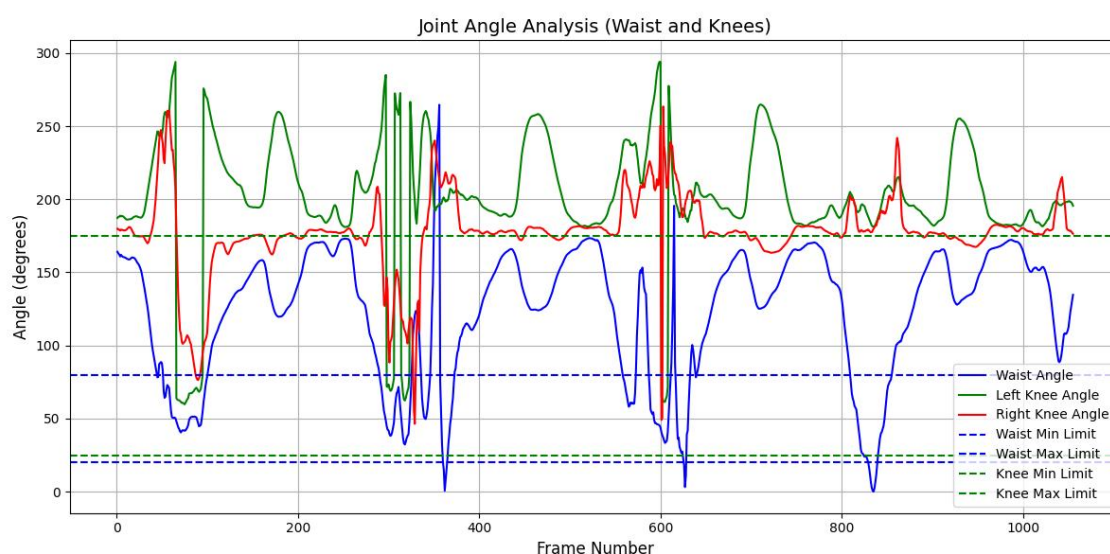
また、腰部の均二乗誤差が 7763.24 から 4976.03 へと大幅に低下 (-35.89%) している点から、映像学習後に動作精度が一定程度改善したことが示唆される。ただし、腰部角度誤差の標準偏差が 25.10 から 28.80 に増加しており、実験者が動作を理解し制御を意識していたものの、動作の安定性には引き続き課題が残ることが確認された。

具体的には、映像学習を通じて実験者が正しい動作の姿勢を模倣する能力を身につけ、大幅な角度誤差の減少につながったと考えられる。しかし、膝の角度はまだ標準値に達していないため、さらなる練習と調整が必要である。このような結果から、映像学習は動作の改善に効果的であるものの、最適な動作精度と安定性を実現するためには、今後のトレーニングでさらに基礎を強化することが重要であるといえる。

さらに、図 4.5.1 と図 4.5.2 を比較すると、角度の曲線変化がより安定していることが明らかである。図中の緑色の実線は左膝の角度、赤色の実線は右膝の角度、青色の実線は腰部の角度を示している。図 4.5.1 では、腰部角度と膝角度の

変化頻度が一定ではなく、動作を繰り返す中で激しい変化と平穏な変化が混在しており、その変化幅に規則性が見られなかった。一方、図4.5.2では、映像学習後のデータにおいて膝角度と腰部角度の変化がより規則的かつ安定していることが確認できた。このことから、映像学習が動作の安定性向上に寄与していることが示唆される。

4.5.3 第三回データの変化図



(図 4.5.3：第三回実験)

今回の実験データでは、VR トレーニング機能を取り入れたことで、実験者の動作の角度制御が大幅に向上した。具体的には、角度変化の傾向グラフを分析することで、標準値領域内の角度変化頻度が大幅に増加していることが確認された。

上側と下側の緑色の虚線は標準膝角度の最大値と最小値を示しており、青色の虚線は腰部標準角度の最大値と最小値を示している。この範囲は、それぞれの動作における目標角度範囲として設定されており、実験者の動作がこの範囲内に収まるかどうかを評価する基準として用いられた。図 4.5.1 および図 4.5.2 と比較すると、図 4.5.3 では運動中の角度変化が標準範囲内に収まる頻度が大幅に増加していることが明らかである。この『頻度』は、動作中の角度が基準値範囲内に入った回数として定義しており、動作の精度を定量的に評価する指標である。また、腰部と膝部の角度誤差についても、実験回数を重ねるごとに改善が見られた。具体的には、腰部角度誤差は 1 回目の 88.11° から 2 回目で 70.54° (-19.94%)、さらに 3 回目では 68.10° (-22.7%) と、訓練を通じて

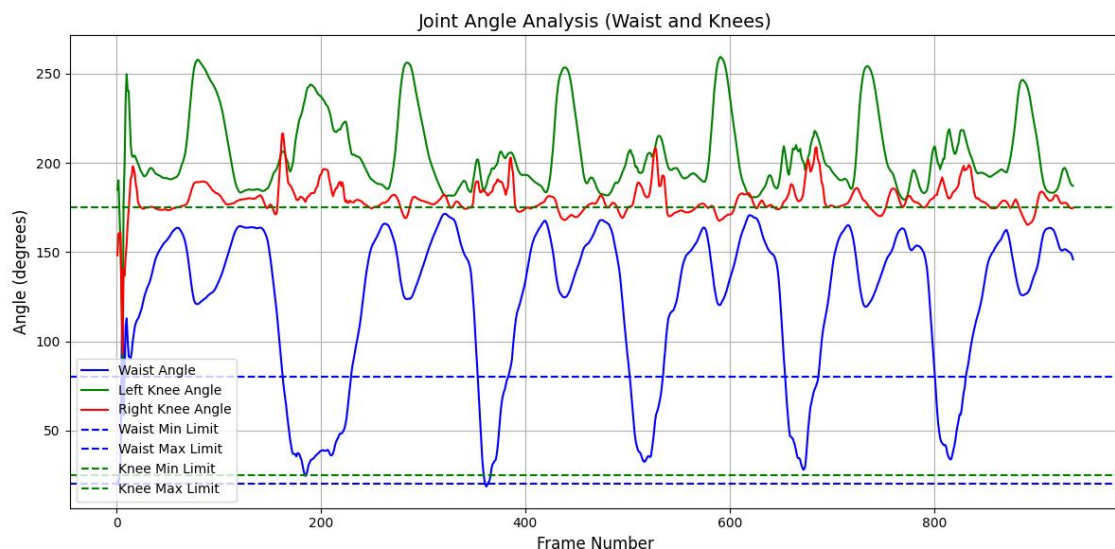
段階的に減少した。右膝角度誤差も 104.44° から 103.41° 、さらに 99.45° と改善が進み、動作精度が向上していることが確認された。一方、左膝角度誤差は 123.44° から 128.80° 、さらに 130.30° へと増加しており、左膝の動作調整には引き続き課題が残ることが示唆される。

さらに、腰部の均二乗誤差は 1 回目の 7763.24 から 2 回目で 4976.03 (-35.89%)、3 回目では 4638.01 (-40.28%) と大幅に低下しており、動作の全体的な誤差が減少していることが明らかである。一方で、標準偏差誤差は 25.10 から 28.80 に増加し、3 回目では 27.78 に若干改善したものの、動作の安定性向上にさらなるトレーニングが必要であることがわかる。

この結果は、VR トレーニングを通じて実験者が動作をより正確に理解し、標準角度範囲を維持する能力が向上したことを示唆している。また、VR トレーニングでは、実験者は自分の骨格モデルの変化と比較しながら、より直感的に教示骨格モデルを観察することができ、リアルタイムフィードバックを得ることで動作のエラーをその場で修正することができるため、動作の精度と安定性が大幅に向上した。

VR トレーニングを通じて、実験者は正しい姿勢をよりよく理解し習得するだけでなく、トレーニングの過程で自分の動きを継続的に調整し最適化することができる。このリアルタイムのフィードバック・メカニズムにより、実験者はエラーを素早く発見して修正することができ、間違った動作の蓄積と固着を避けることができる。さらに、VR トレーニングはより没入感のある学習体験を提供するため、実験者は動きの学習と練習により集中することができる。このような没入感のある学習環境は、実験者の学習効果やトレーニング効率を向上させ、より短期間でより良いトレーニング結果を得ることに貢献する。全体として、VR 学習機能とリアルタイムフィードバック誤差報告機構を組み合わせた動作学習法は、実験者の動作の精度と安定性を大幅に向上させ、動作学習の効率性と優位性を証明した。

4.5.4 第四回データの変化図



(図 4.5.4：第四回実験)

最後の実験で測定されたデータを見ると、ビデオ学習と VR 学習が実験者の動作学習に与えた影響は限定的で、大幅な改善は見られなかったものの、学習が行われなかった 1 回目のデータと比較していくつかのポジティブな変化が確認された。

具体的には、腰部角度誤差は 1 回目の 88.11° から 4 回目の 67.56° (-23.34%) まで減少しており、右膝角度誤差も 104.44° から 101.12° (-3.18%) へ改善が見られた。一方で、左膝角度誤差は 123.44° から 133.61° ($+8.25\%$) へ増加し、左膝の動作制御においては依然として課題が残ることが示唆される。

また、腰部の均二乗誤差は 1 回目の 7763.24 から 4 回目の 4564.32 (-41.2%) へと大幅に低下しており、動作中の角度制御精度が段階的に向上していることが分かる。さらに、標準偏差誤差は 1 回目の 25.10 から 4 回目の 26.92 に増加しており、動作精度の改善が進む一方で、動作の安定性には引き続き課題があることが確認された。

これらの結果から、ビデオ学習および VR 学習が動作学習に与える効果は限定的であるが、学習が行われなかった初回データと比較すると、角度制御精度や全体的な動作精度の向上に一定のポジティブな変化が見られた。また、実験を重ねることで動作制御がより安定する傾向があるものの、特に左膝における課題の改善にはさらなる取り組みが必要である。

ビデオ学習と VR 学習によって、角度制御の精度は大きく向上しなかったものの、実験者の動作の安定性が一定程度向上したことが確認された。本研究では、動作の安定性を『運動中の角度変化の標準偏差』として定義し、この値が低いほど安定性が高いことを示す指標とした。

実験データを比較すると、腰部角度の標準偏差は1回目の25.10から2回目に28.80と一時的に増加したが、3回目では27.78、4回目には26.92と徐々に減少しており、運動中の角度変化が次第に規則的になったことが分かる。また、腰部の均二乗誤差は1回目の7763.24から4回目の4564.32（-41.2%）まで大幅に低下しており、動作精度の向上を裏付ける結果となった。

さらに、運動中の角度変化傾向をグラフで分析すると、図4.5.1と図4.5.3を比較した際、標準値領域内に収まる頻度が大幅に増加していることが確認された。この結果は、実験者が運動中の動作のリズムを徐々に習得し、標準的な動作をより意識的にコントロールできるようになったことを示している。

この安定性の向上は運動学習にとって重要な改善である、実験者が徐々に新しい学習方法に適応し、習得していることを示している。今後の研究では、角度制御の精度を向上させながら、動きの安定性を維持し続けることを目的として、ビデオ学習や VR 学習の内容や方法をさらに最適化することができるだろう。

分析対象となる2つの実験者グループのデータを比較すると、2人目の実験者のデータは、角度制御に関しては期待通りの向上は見られなかったものの、学習効果の最終的なデータから共通する点は、動作の理解が向上し、全体的な動作の変化が安定したことである。この点は、角度制御の精度の向上は限定的であったものの、映像学習や VR 学習を通じて、実験者の動作の理解度や習得度が大きく向上し、動作全体の安定性が向上したことを証明できる。

2つのデータセットの映像学習効果を比較すると、両者に共通しているのは、映像学習によって運動過程が安定したことである。このことは、各個人の受容能力が異なるにもかかわらず、映像学習を通じて、実験者は動作に対する新たな理解を深め、意識的に動作をコントロールすることで、より標準化された動作ができるようになったことを示唆している。

具体的には、ビデオ学習は、実験者が正しい動作姿勢をよりよく理解し、模倣することを可能にする視覚的な参照を提供した。角度制御の改善には個人差があるかもしれないが、全体的な動作の安定性は著しく改善された。この

安定性の向上は、動作学習にとって重要な進歩であり、実験者が徐々に新しい学習方法に適応し、習得していることを示している。

そして VR 学習に共通する点は、VR トレーニング機能を取り入れたことで、実験者の動作の角度制御が大幅に向上したことである。標準値領域内での角度変化数が大幅に増加したのだ。

今回の実験データでは、VR とリアルタイムフィードバックによるエラー報知を組み合わせた動作学習が、映像のみによる学習と比較して学習効率の向上に寄与する可能性が示唆された。特に、第一組データ（優れたデータ）では、第三回目の VR 学習が第二回目の映像学習と比較して、各項目において数値が大幅に減少していることが確認された。

具体的に、第一組データでは、腰部角度誤差が映像学習の 81.85° から VR 学習の 55.70° へと 31.96%減少し、左膝角度誤差も 129.52° から 110.35° へと 14.81%改善した。また、右膝角度誤差も 98.38° から 79.78° へと 18.89%減少し、均二乗誤差においては 6699.70 から 3102.36 へと 53.69%という大幅な低下が確認された。この結果は、VR 学習が映像学習と比較して動作精度を高める可能性を示唆している。一方で、標準偏差は映像学習の 15.89 から VR 学習の 24.98 へと 57.19%増加しており、動作の安定性には一定の課題が残ると考えられる。

一方、第二組データ（結果が顕著ではないデータ）では、VR 学習の効果が限定的であるが、一部の指標において改善が確認された。腰部角度誤差は映像学習の 70.54° から VR 学習の 68.10° へと 3.46%軽減し、右膝角度誤差も 103.41° から 99.45° へと 3.83%改善した。また、腰部の均二乗誤差は 4976.03 から 4638.01 へと 6.80%減少しており、動作精度がわずかに向上していることが分かる。ただし、左膝角度誤差については 128.80° から 130.30° へと 1.16%増加しており、この点についてはさらなる調整が求められる。また、標準偏差は映像学習の 28.80 から VR 学習の 27.78 へと 3.54%減少しており、動作安定性の改善傾向が見られる。

以上の図例から分析すると、VR 学習の効率はビデオ学習よりも高いことが明らかになった。本研究の第 3 回実験で使用した VR 動作学習モデルは、第 2 回実験のビデオ学習モデルと同一であり、単にビデオの動作データを骨格モデルに変換して観察しやすくしたものである。

図 4.4.2 および図 4.4.3（第 2 回実験と第 3 回実験の被験者データ）、図 4.5.2 および図 4.5.3 を比較することで、VR 学習が運動精度の向上に寄与していることが明確に確認できる。それぞれの線の意味は以下の通りである：

緑の実線：左膝の角度変化

赤の実線：右膝の角度変化

青の実線：腰の角度変化

緑の点線：膝の角度変化の標準最大値と最小値

青の点線：腰の角度変化の標準最大値と最小値

これらのデータを比較すると、VR 学習では、膝および腰の角度変化が標準値の範囲内に収まる回数が明らかに増加していることが確認できる。このことから、VR 学習は、動作の正確性と安定性を向上させるだけでなく、ビデオ学習よりも標準動作の適応を促進する効果があることが証明された。

以上の結果を総合すると、第一組データでは VR 学習の優位性がより顕著に表れており、特に動作精度や誤差の低減において大きな改善が確認された。一方で、第二組データでは VR 学習の効果が限定的であったが、それでも一部の指標で映像学習を上回る改善傾向が見られた。両データセットを通じて、VR 学習が映像学習と比較して動作精度の向上に寄与する可能性が示唆されたが、安定性や特定の指標に関しては引き続き検討が必要である。

実験前後のアンケートデータによると、普段運動トレーニングをしていない実験者は 23%であったが、運動習慣を維持している実験者は 77%であった。運動習慣のある実験者のうち、50%は運動頻度が低く、残りの 50%は運動頻度が高い。さらに調べたところ、運動習慣のある実験者のうち、60%が無酸素運動、70%が有酸素運動中心の実験者であった。その中で、無酸素運動と有酸素運動の両方をトレーニングしている人の割合は 30%であった。

この事前調査の結果、実験者が普段受けているスポーツやプログラムの種類には大きなばらつきがあることがわかった。このばらつきは、運動習慣やトレーニング強度の異なる実験者を対象としているため、データ出力の正確性を確保するのに役立ち、その結果、より代表的で一般化可能な結果を得ることができる。

このデータがあれば、実験者の背景や運動習慣をよりよく理解することができ、実験結果を分析する際にこれらの要因の影響を考慮することができる。これは、実験データの信憑性を高めるだけでなく、その後の研究の貴重な参考

資料にもなる。

実験者の中で、VR を頻繁に体験している者は 15%、VR とまったく接点のない者は 15%、残りの 70% は VR の使用経験はあるが頻繁には体験していない。この調査の結果、スポーツトレーニングや学習における VR 機器の効果は、実験者の VR 使用経験に大きく依存しないことが示された。つまり、VR を頻繁に使用していない人や初心者でも、VR を活用したスポーツ学習を正常に行うことができるため、VR スポーツ学習は人口の大多数にとって効果的であるといえる。

実験後の事後調査を通じて、実験者のビデオ学習と VR 学習の体験と満足度評価を収集した。これは主に、VR 学習に関する実験者の全体的な経験、運動学習のさまざまな方法に関する実験者の満足度評価、学習プロセスの利点と欠点に関する実験者のコメントと提案に分かれている。学習プロセスで実験者が遭遇した課題、実験者自身による学習効果に対する主観的評価の 4 つのパートに分かれている。

アンケートの結果と合わせると、実験者の 85% が、VR 学習は、より没入的であるだけでなく、インタラクティブな学習体験を提供し、標準モデルに適応しながら自分自身を観察することができ、自分自身の動きを改善し、動きそのものをよりよく理解できるようになる、動きを習得することができたと回答した。しかし、さらに 15% の実験者は、VR 学習は動きを向上させ、実際の運動と同様に肉体的に疲れるものの、VR ヘッドセット装置を長時間装着することで疲労感が深まったと報告している。このことから、VR 学習は動作の正確性と安定性を向上させるという点では大きなメリットがあるものの、デバイスを使用する際の快適性という点ではさらなる最適化が必要であることが示唆された。この調査から、VR 学習は、実験者が動きをよりよく理解し、習得するのに役立つ没入的でインタラクティブな学習体験を提供する点で優れていると結論づけることができる。しかし、実験者が長時間の使用中に過度の疲労を感じないようにするためには、装置の快適性の問題に注意を払う必要がある。今後の研究では、実験者の全体的な学習体験と効果を高めるために、VR 機器の設計と使用を改善する方法を探ることができるだろう。

また、実験者の満足度フィードバックのうち、「非常に満足」が 69%、「やや不満」が 23%、「満足でも不満でもない」が 8% であった。これらのフィードバックから、実験者の大多数は VR 学習に対して肯定的な姿勢を持っていた

ものの、その効果に難色を示す実験者もいたことがわかる。これは、個人差や学習習慣、機器の使い心地などの要因が関係していると考えられる。この点について、実験者の8%に2回目のインタビューを行い、その評価の理由を探ったところ、実験者はVRによる学習はビデオよりも直感的で、姿勢が標準化される傾向があると明確に感じたというが、本人曰く、動きを理解するためには実験器具の重量を増やした方が良いという意見もあった。実験者は、プログラムの効果については肯定的で、実験のデザインについてはあまり満足していない。このインタビューは、一般的なフィードバックが実験者の個人差によるものであることを裏付けている。

事後のアンケートを通じて、実験参加者は以下の3つの主な利点を確認した。
没入型学習：実験者は、VR学習がより没入的でインタラクティブな学習体験を提供し、動きの要点をよりよく理解し、習得することを可能にしたと述べた。実験者は、標準モデルと比較して自分の動きを観察することで、自分の姿勢を時間内に調整し、動きの正確さと安定性を向上させることができると考えていた。

リアルタイムフィードバック機能：VR学習におけるリアルタイムフィードバック機能は、一般的に非常に有用であると実験者は考えていた。自分の動作が規定範囲から外れると、システムが音で注意を促し、間違いを時間内に修正するのに役立った。このリアルタイムフィードバックの仕組みは、学習効果を大幅に向上させた。

より直感的な視覚ガイダンス：実験者たちは、VR学習が直感的な視覚ガイダンスを提供し、標準的な動作をよりよく模倣して学習することを可能にしたと述べている。VR指導を通じて、彼らは動きの詳細や要点をより明確に理解することができた。

同時に、実験者たちは、不十分な点は主に以下の点に分けられると考えている。

機器の快適性：一部の実験者は、VRヘッドセット機器を長時間装着すると疲労感が深まり、学習体験に影響を及ぼすと振り返った。実験者は、長時間の使用による不快感を軽減するために、VR機器の設計を改善し、装着感を向上させることを提案した。

実験デザインの改善：一部の実験者は、ビデオ学習やVR学習のコンテンツは比較的均質であり、多様性や挑戦性に欠けていると考えている。彼らは、学

習の楽しさと効果を向上させるために、より多くの説明ビデオやエクササイズコンテンツを追加することを提案した。また、実験に選択された動作は筋力トレーニングであるが、実験中に体重の負荷はなく、実験開始前にアンケートを通じて、実験者に応じた安全な重さを適切に増やすことで、利用者の運動動作の習得をよりよく助けることができると考える実験者もいるという。

また、VR を学習に利用する際に、自分のモデルと標準モデルとの距離を調整することで、座標の変化をより敏感にし、標準動作を全方位で観察することができ、学習に便利であるという提案もある。

データ図の要約と分析

データ図を具体的に分析すると、激しい変動が見られる部分は動作中の状態を示しており、下蹲の状態も確認できる。また、虚線は各色に対応する標準値の範囲を示している。

第一回の実験では、角度の変化に多くの誤差が見られ、不規則なパターンとなっていた。しかし、第二回の実験では、動画学習を経たことで変化のパターンが一定になり、学習効果が現れている。依然として標準値を超える角度は多く見られるが、第一回と比較すると明らかに改善されている。

さらに、第三回の実験では、実験者が標準角度範囲内に収まる回数が顕著に増加し、動画学習と比較してVR学習の効果がより明確に表れている。VRを用いた学習が、動作の正確性を高めるのにより効果的であることが示唆される。

この結果が単なる学習の積み重ねによるものではないことを証明するために、第三回の実験終了後1分以内に第四回の実験を実施した。その結果、第三回ほどの効果は見られず、第二回の動画学習と同程度の水準であった。しかし、第一回の実験と比べると、明らかに改善されていた。

以上の結果から、第三回の実験での顕著な向上は、単なる学習回数の影響ではなく、VRによる動作学習の効率が動画学習を上回っていることによるものであると考えられる。したがって、本研究では、動作学習においてVR学習の方が動画学習よりも高い学習効率を持つことが明らかになった。

4.6 討論

本研究では、VRアクション学習がユーザーの動作習得を効果的に支援し、学習効率を大幅に向上させる可能性が示唆された。本研究で使ったリアルタイムサウンドフィードバックシステムは、学習者が動作中にリアルタイムで音声

によるフィードバックを受け取ることで、自身の動作角度やフォームの修正点を即座に認識できる仕組みである。このフィードバックは、システムが学習者の骨格モデルや動作データを基に解析した結果に基づいて提供されるため、学習者はトレーニング中に正しい動作への調整を効率的に行うことが可能となる。

このリアルタイムフィードバック機能により、学習者は教育ビデオを用いた学習と比較して、自身の動作角度の補正においてより高い効果を得ることが確認された。特に、音声による即時性のある指摘が学習者の理解を深め、動作精度を向上させる結果につながった。主な効果は、自分の動きの角度の補正にあり、教育ビデオによる学習に比べて非常に効果的である。疲労度は人の運動効果に影響を与えることが明らかになっているが、疲労要素は個人差や心理的要因など複数の要素から構成されている[19]。本研究では、複数の実験データの中に改善幅が明確でない結果も一部存在したが、それらは疲労度が影響を及ぼした可能性があると考えられる。特に、トレーニングを繰り返すことで生じた身体的疲労や集中力の低下が、実験者のパフォーマンスに影響を与え、一部の結果において明確な改善が確認されなかった原因である可能性がある。Blanco AD らは、VR 技術が楽器学習における指導に果たす役割について研究を行い、リアルタイムフィードバックの条件下で使用者の能力が向上し、動作捕捉および VR 技術を活用した演奏の安定性が大きく進歩していることを指摘している[20]。この研究は、VR 技術を通じてリアルタイムに動作フィードバックを提供することが、楽器学習における動作精度や安定性を向上させることを示しており、今回の研究テーマである動作学習における VR の応用可能性について重要な示唆を与える。特に、リアルタイムフィードバックがユーザーの動作補正や精度向上に果たす役割は、楽器演奏とスポーツ動作学習の双方で共通する要素であり、本研究においても重要なポイントとなる。その結果、動作捕捉および VR 技術の結合は、運動分野だけでなく、芸術などの学習分野にも有効であることが明らかとなった。

4.6.1 研究の意義

学習効率の向上：VR 学習は没入的でインタラクティブな学習体験を提供し、実験者がより動作の学習と練習に集中できるようにする。リアルタイムのフィードバック機構により、実験者は間違いを素早く見つけて修正することがで

き、間違った動作の蓄積と固着を避けることができるため、学習効率が大幅に向上する。

多様な学習モード：VR 学習は多様な学習モードを提供し、実験者は自分の動作と標準モデルとの比較を観察することで、姿勢を調整し、動作の正確性と安定性を向上させることができる。この多様な学習方法は、学習の楽しさを向上させるだけでなく、実験者の動作の理解と習得を高める。

リアルタイムフィードバックシステム：リアルタイム音声フィードバックシステムは、VR 学習において重要な役割を果たす。実験者の動作が規定範囲から外れると、システムが注意喚起の音を発信し、実験者が時間内にエラーを修正できるようにする。このリアルタイムフィードバック機構により、学習効果が大幅に向上し、実験者は自分の動作角度をより正確に修正することができる。

驚くべき学習効果：指導ビデオによる学習と比較して、VR 学習は動作学習においてより効果的である。実験結果によると、VR 学習は動作の正確性と安定性を大幅に向上させることができ、実験者の動作中の全体的なコントロールがより安定する。

これらの結果から、動作学習における VR 学習の効率性・優位性は、今後の動作訓練・教育に新たな可能性をもたらすと結論づけることができる。従来の文献によると、ほとんどの VR 運動研究は単一の運動動作または特定のシーン【1, 6】に集中しており、他の分野の運動効果を探索していないことが明らかになっている。本研究はクリーンエクササイズ動作を基礎として、多分野の運動学習における VR の効果を評価するために用いられる。

4.7 革新性

従来の文献によると、ほとんどの VR 運動研究は単一の運動動作または特定のシーン[5, 9]に集中しており、他の分野の運動効果を探索していないことが明らかになっている。本研究はクリーンエクササイズ動作を基礎として、多分野の運動学習における VR の効果を評価するために用いられる。

いくつかの研究では、運動解析の機能を採用して運動エラーを検出し、自己分析を行うことが可能である、リアルタイムのフィードバック機能[8]を提供することはできませんでした。また、[6]は、インタラクション型 VR システムを開発するには、現在実現していません。本研究は VR 運動学習システムにリア

リアルタイムフィードバック機能を加え、自身の骨格モデルを観測すると同時に、動作が標準かどうかを音声で提示し、使用者が自分の仕事をタイムリーに調整するのを支援する。同時に、異なる動きに基づいて標準的な動きビデオ生成モデルを導入して学習することができる。このように学習効率を高めると同時に運動学習の多様性も増加し、使用者をより自由に学習させる運動動作は1つの内容に限定されない。

既存の研究では、VRはオープンスキル運動に大きな潜在力[8]を持っているが、その結果、複雑な運動に対する深い研究設計が不足していることが分かった。本研究はより複雑な運動を結合し、対応するVRシーンを作成し、シミュレーション現実訓練シーンにおけるVRの応用能力を探索する。

既存の研究と比較して、本研究の革新型は主に以下のいくつかの方面に現れている：

- 1.異なる運動領域での適用性、1人の専門家の運動ビデオを通じて正確にその運動データを捕捉して生成し、学習のためにモデル骨格を運動することができる。
- 2.学習システムにリアルタイムエラー訂正の提示機能を追加し、標準データの最大変化及び最小変化値を読み取りながらエラー提示システムを生成し、使用しながらリアルタイムで自身の動作エラーを監視及び訂正することができる。
- 3.デバイスの普及性の面でも革新が行われ、本研究は標準的なスポーツビデオモデルを導入し、VRヘッドディスプレイデバイスを装着するだけで学習機能を実現して学習することができ、学習コストを大幅に削減し、広範囲の応用に容易になる。

第5章 おわりに

5.1 研究成果

VR 技術は運動学習において非常に実用性を示唆する。VR 技術を活用し動作を学ぶ、スポーツ領域で大きなポテンシャルと可能性がある、同時に研究結果を通じて、VR の臨場感またインタラクション学習体験ことは利用者により集中でき学習効率を高まることができる。、さらに VR の環境で多様な学習モードを実現でき、自身の動作を確認しながら標準フォームと比較する、エラー提示機能を導入後、随時姿勢を調整でき、自身動作の正しさと安定性も高まる、これにより、動作理解を深めだけではなく習得効率また学習の楽しさも向上させる。他の運動学習研究と比較すると、本研究で提供された VR システムは、効率的に動作の正確性と安定性を向上させるという点だけでなく、学習プロセスにおけるユーザーの全体的な制御を安定させるという点でも、従来の指導ビデオ学習よりも効果的であることがわかる。

5.2 これからの展望

本研究では、モーションキャプチャーと VR 技術を組み合わせることで、運動学習に非常に効果を示すことを明らかにした。これにより、運動教育、トレーニング、リハビリテーションなどの分野において、新たな方向性と可能性を提供するものである。特に、VR 技術はより広い領域に応用できる可能性があることが証明された。

また、既存研究 (Westcott, 2012 [10]; Padilla Colon et al., 2014 [11]; Mann et al., 2012 [12]; Lai et al., 2014 [13]) によると、運動は身体的・精神的健康に幅広い利点をもたらすことが明らかになっている。

具体的には、筋力トレーニングは 筋肉量の増加、基礎代謝の向上、脂肪の減

少に寄与するだけでなく、腰痛や関節痛の改善、運動能力や歩行速度の向上、さらには2型糖尿病の予防や心血管の健康促進にも貢献することが報告されている (Westcott, 2012 [10])。また、高齢者に対する研究 (Lai et al., 2014 [13]) では、筋力トレーニングが転倒リスクを低減し、QOLを向上させることが示されている。一方で、運動の効果は「姿勢の正確性」にも影響を受ける可能性があり、正しいフォームでトレーニングを行うことが、より効果的な健康増進につながると考えられる。

本研究では、VR学習を活用することで、学習者の動作精度と学習効率の向上を目指した。その結果、VRを用いたトレーニングにより、標準的な動作姿勢への適応度が向上し、従来のビデオ学習よりも高い運動学習効果が得られることが示唆された。しかし、運動効果は動作の正確性とも密接に関連していると考えられるため、VR技術を活用することで、適切なフォームを維持しながらトレーニングを行うことが、健康増進にどのような影響を与えるのかを検討する必要がある。

今後の展望として、「正しい姿勢で運動を行うことで、健康効果をさらに向上させることができるか」という観点から、VRを活用した動作補正技術のさらなる開発が求められる。例えば、リアルタイムで姿勢を修正するAIフィードバックシステムや、個別の身体特性に適応したカスタマイズトレーニングプログラムを導入することで、より精密な運動学習支援が可能になると考えられる。

また、本研究では筋力トレーニングにおけるVR学習の効果を検証したが、今後は有酸素運動 (Mann et al., 2012 [12]) やリハビリテーションへの応用についても検討する余地がある。これにより、より幅広い年齢層や健康状態のユーザーに対して、VRを活用した運動学習システムが提供できる可能性がある。

参考文献

- [1] Michalski SC, Szpak A, Saredakis D, Ross TJ, Billinghamurst M, Loetscher T. Getting your game on: Using virtual reality to improve real table tennis skills. PLoS One. 2019 Sep 10;14(9):e0222351. doi: 10.1371/journal.pone.0222351. PMID: 31504070; PMCID: PMC6736297.

- [2] Shin Y, Lim J, Kim Y, Seo DG, Ihm J. Effects of virtual body-representation on motor skill learning. *Sci Rep.* 2022 Sep 10;12(1):15283. doi: 10.1038/s41598-022-19514-9. PMID: 36088480; PMCID: PMC9464243.
- [3] Bernstorff MA, Schumann N, Finke A, Schildhauer TA, Königshausen M. Popular Gym Fitness Sport: An Analysis of 1387 Recreational Athletes Regarding Prone to Pain Exercises and the Corresponding Localisations. *Sports (Basel).* 2023 Dec 29;12(1):12. doi: 10.3390/sports12010012. PMID: 38251286; PMCID: PMC10821116.
- [4] Richlan F, Weiß M, Kastner P, Braid J. Virtual training, real effects: a narrative review on sports performance enhancement through interventions in virtual reality. *Front Psychol.* 2023 Oct 19;14:1240790. doi: 10.3389/fpsyg.2023.1240790. PMID: 37928573; PMCID: PMC10622803.
- [5] Prasertsakul T, Kaimuk P, Chinjenpradit W, Limroongreungrat W, Charoensuk W. The effect of virtual reality-based balance training on motor learning and postural control in healthy adults: a randomized preliminary study. *Biomed Eng Online.* 2018 Sep 18;17(1):124. doi: 10.1186/s12938-018-0550-0. PMID: 30227884; PMCID: PMC6145375.
- [6] Akbaş A, Marszałek W, Kamieniarz A, Polechoński J, Słomka KJ, Juras G. Application of Virtual Reality in Competitive Athletes - A Review. *J Hum Kinet.* 2019 Oct 18;69:5-16. doi: 10.2478/hukin-2019-0023. PMID: 31666884; PMCID: PMC6815076.
- [7] Haar S, Sundar G, Faisal AA. Embodied virtual reality for the study of real-world motor learning. *PLoS One.* 2021 Jan 27;16(1):e0245717. doi: 10.1371/journal.pone.0245717. PMID: 33503022; PMCID: PMC7840008.
- [8] Sielużycki C, Maśliński J, Kaczmarczyk P, Kubacki R, Cieśliński WB, Witkowski K. Can Kinect aid motor learning in sportsmen? A study for three standing techniques in judo. *PLoS One.* 2019 Feb 6;14(2):e0210260. doi: 10.1371/journal.pone.0210260. PMID: 30726211; PMCID: PMC6364886.
- [9] Kim A, Schweighofer N, Finley JM. Locomotor skill acquisition in virtual reality shows sustained transfer to the real world. *J Neuroeng Rehabil.* 2019 Sep 14;16(1):113. doi: 10.1186/s12984-019-0584-y. PMID: 31521167; PMCID: PMC6744642.
- [10] Westcott, Wayne L. PhD. Resistance Training is Medicine: Effects of Strength Training on Health. *Current Sports Medicine Reports* 11(4):p 209-216, July/August 2012. | DOI: 10.1249/JSR.0b013e31825dabb8
- [11] Padilla Colon CJ, Sanchez Collado P, Cuevas MJ. Beneficios del entrenamiento de fuerza para la prevención y tratamiento de la sarcopenia [Benefits of strength training for the prevention and treatment of sarcopenia]. *Nutr Hosp.* 2014 May 1;29(5):979-88. Spanish. doi: 10.3305/nh.2014.29.5.7313.

PMID: 24951975.

- [12] Mann S, Beedie C, Jimenez A. Differential effects of aerobic exercise, resistance training and combined exercise modalities on cholesterol and the lipid profile: review, synthesis and recommendations. *Sports Med.* 2014 Feb;44(2):211-21. doi: 10.1007/s40279-013-0110-5. PMID: 24174305; PMCID: PMC3906547.
- [13] Lai X, Bo L, Zhu H, Chen B, Wu Z, Du H, Huo X. Effects of lower limb resistance exercise on muscle strength, physical fitness, and metabolism in pre-frail elderly patients: a randomized controlled trial. *BMC Geriatr.* 2021 Jul 30;21(1):447. doi: 10.1186/s12877-021-02386-5. PMID: 34330211; PMCID: PMC8323206.
- [14] Gimigliano F, Resmini G, Moretti A, Aulicino M, Gargiulo F, Gimigliano A, Liguori S, Paoletta M, Iolascon G. Epidemiology of Musculoskeletal Injuries in Adult Athletes: A Scoping Review. *Medicina (Kaunas).* 2021 Oct 17;57(10):1118. doi: 10.3390/medicina57101118. PMID: 34684155; PMCID: PMC8539527.
- [15] Aasa U, Svartholm I, Andersson F, Berglund L. Injuries among weightlifters and powerlifters: a systematic review. *Br J Sports Med.* 2017 Feb;51(4):211-219. doi: 10.1136/bjsports-2016-096037. Epub 2016 Oct 4. PMID: 27707741.
- [16] Keogh JW, Winwood PW. The Epidemiology of Injuries Across the Weight-Training Sports. *Sports Med.* 2017 Mar;47(3):479-501. doi: 10.1007/s40279-016-0575-0. PMID: 27328853.
- [17] Lastra-Rodríguez L, Llamas-Ramos I, Rodríguez-Pérez V, Llamas-Ramos R, López-Rodríguez AF. Musculoskeletal Injuries and Risk Factors in Spanish CrossFit® Practitioners. *Healthcare (Basel).* 2023 May 7;11(9):1346. doi: 10.3390/healthcare11091346. PMID: 37174888; PMCID: PMC10178070.
- [18] Bernstorff MA, Schumann N, Finke A, Schildhauer TA, Königshausen M. Popular Gym Fitness Sport: An Analysis of 1387 Recreational Athletes Regarding Prone to Pain Exercises and the Corresponding Localisations. *Sports (Basel).* 2023 Dec 29;12(1):12. doi: 10.3390/sports12010012. PMID: 38251286; PMCID: PMC10821116.
- [19] Behrens M, Gube M, Chaabene H, Prieske O, Zenon A, Broscheid KC, Schega L, Husmann F, Weippert M. Fatigue and Human Performance: An Updated Framework. *Sports Med.* 2023 Jan;53(1):7-31. doi: 10.1007/s40279-022-01748-2. Epub 2022 Oct 18. PMID: 36258141; PMCID: PMC9807493.
- [20] Blanco AD, Tassani S, Ramirez R. Real-Time Sound and Motion Feedback for Violin Bow Technique Learning: A Controlled, Randomized Trial. *Front*

Psychol. 2021 Apr 26;12:648479. doi: 10.3389/fpsyg.2021.648479. PMID: 33981275; PMCID: PMC8107276.