

3D ダンスフォーメーションシミュレータの提案とユーザ評価

國井 加奈子^{1,a)} 中島 達夫^{1,b)}

概要：ダンスパフォーマンスの制作では、振付だけでなく、フォーメーション、対称性、連鎖、照明、カメラワーク、衣装といった多岐にわたる要素を決定する必要がある、制作プロセスの効率化が大きな課題となっている。本研究ではこれらの課題を解決するために、三次元骨格推定技術を取り入れたダンスシミュレーションアプリケーションを提案し、ダンス制作過程の効率化を図るとともに制作に関わる人々がより創造的な演出に専念できる環境を提供することを目指す。アプリケーションの使用によりダンス制作の効率化に大きな効果をもたらす可能性が高く、技術的な進化が創造性の向上にも寄与する可能性があることが明らかになった。

1. はじめに

1.1 背景

近年、コンピュータサイエンスの分野では、機械学習やシミュレーション技術の応用が急速に進展しており、これらの技術が創作活動に与える可能性は非常に大きいと考えられる。これらの技術を活用することで、従来の課題を解決し、制作プロセスの効率化を図ることが期待されている。

特に舞台芸術やエンターテインメント産業では、技術の進歩によって表現の多様性が広がり、制作に携わる人々が創造性を発揮する場面が増加している。一方で、ダンスパフォーマンスの制作では、振付に加えてフォーメーション、対称性、連鎖、照明、カメラワーク、衣装など、多岐にわたる要素を総合的に決定する必要がある、その負担は非常に大きい。また、構想した振付やフォーメーションを現実的に確認するためには、ダンサーを集めてスタジオでリハーサルを行う必要があり、コストや時間の制約が制作プロセスの頻繁な確認や修正を困難にしている。このように、制作プロセスの効率化は大きな課題であるにもかかわらず、この分野における研究や技術開発は十分に進んでいないのが現状である。

本研究では、これらの課題を解決するために、三次元骨格推定技術を活用したダンスシミュレーションアプリケーションを提案する。このアプリケーションにより、制作過程を効率化し、関係者がより創造的な演出に専念できる環

境を提供することを目指す。

1.2 研究目的

本研究の目的は、振付やフォーメーション、対称性、照明、カメラワークなどの効率的な確認・修正を支援する 3D ダンスシミュレーションアプリケーションの効果を評価することである。具体的には、ダンス経験者が 3D ダンスシミュレーションを体験し、その信頼性や利便性、将来性を調査する。これにより 3D シミュレーション技術が与える、制作プロセス全体における負担軽減の可能性を分析する。

2. 関連研究

運動分析や指導支援システムに骨格推定技術を活用した研究はいくつかある。このアプローチを採用した研究の一例として、テニスサーブ練習用の VR システム [1] が挙げられる。この研究では単一視点映像から深層学習を用いて三次元骨格推定を行い、プロアスリートのテニスサーブの動作を解析する。さらにモーションキャプチャセンサーでユーザ自身の動きを取得し、理想的なプロアスリートの動きとの差異をフィードバックする仕組みが実装されている。ユーザは VR 内で自身の動作を確認するとともに、プロアスリートのモーションを多視点から観察可能であり、これにより動作の理解を深めるとともに効率的な練習をサポートすることが期待されている。既存のスクリーン動画による練習法と比較した実験では、VR システムが練習の楽しさを向上させることが確認されたものの、スキル習得の速度や正確性においては統計的有意差が見られなかった。この結果から、骨格推定技術と VR を組み合わせることで、

¹ 早稲田大学

^{a)} kunii@dcl.cs.waseda.ac.jp

^{b)} tatsuo@dcl.cs.waseda.ac.jp

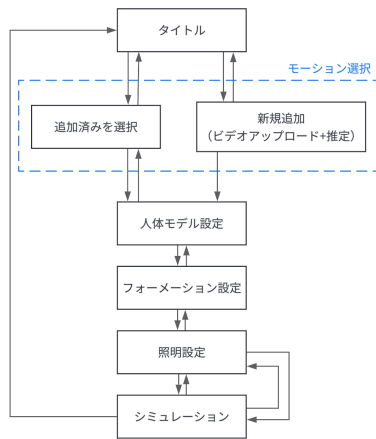


図 1 アプリケーション遷移

ユーザ体験の質を高める可能性が示唆される一方、さらなる技術的な改良が求められていることも明らかになっている。

3. 設計, 実装

3.1 システムの概要

本研究では評価用の 3D ダンスフォーメーションシステムを提案した。システムはシミュレーションを行う iPhone 向けのアプリケーションと骨格推定を行うサーバーからなる。

3.2 アプリケーションの概要

このアプリケーションは、複数の人体モデルを任意の位置に設定しダンスモーションを再現することで、ダンスフォーメーションを 3D シミュレーションできる。

開発には Unity を使用し、エディタバージョンは 2021.3.25f1 を採用した。iOS 向けにビルドし、Xcode を用いて iPhone での動作を実現した。開発中は、iPhone XR や iPhone 13 などの実機、ならびに iPhone SE や iPhone 8 のシミュレータを用いて検証を行った。Apple Developer サービスを活用し、TestFlight を通じて外部テスター向けにパブリックリンクを作成することで、アプリケーションを任意の iPhone に配布可能とした。

3.3 アプリケーションの設計

アプリケーションは図 1 のように構成され、モーション選択、人体モデル設定、フォーメーション設定、照明設定と画面を遷移しながらシミュレーション設定を行う。各画面では基本的に前後の画面に遷移することが可能で、設定はタイトル画面に戻らない限り保持される。これにより修正や調整が容易にできるようになっている。

3.3.1 モーション選択

いくつかのダンス動画を推定し、そのダンスモーションを表 1 に示したサンプルとして使用できるようにした。推

表 1 サンプルモーション

	種別	長さ [s]
Hula	Youtube	10
Jazz	Youtube	29
Hip	Youtube	11
HipAndPunking	Library	11
Mikoniko	Library	18
Here I am	Youtube	23

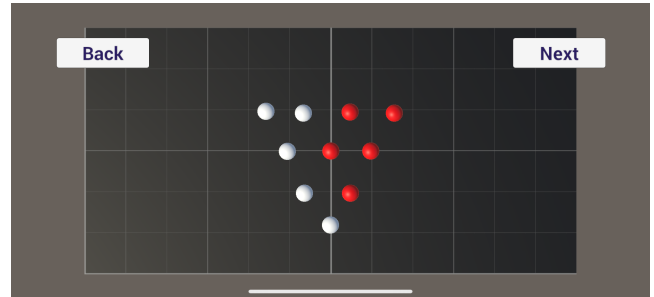


図 2 フォーメーション設定

表 2 照明設定

照明名	色	数	位置	大きさ	形状
Front	○	×	×	×	×
Horizon	○	×	×	×	×
Dyed	○	×	×	×	×
Search	○	×	×	×	○
Floor	○	○	○	○	×
Suspension	○	○	○	○	×
Pinspot	○	○	○	○	×

定結果は動画としても抽出されるため、評価参加者に推定の精度を確認するために視聴してもらった。

またはユーザは Youtube のダンス動画の URL と区間(秒数) かローカルライブラリから撮影したダンス動画を直接アップロードすることで骨格推定を行うこともできる。推定中は進行状況がアプリケーション上に表示される。

3.3.2 人体モデル設定

人体モデルは 20 体まで設置できる。照明の設定によって見えにくくなるのを防ぐため、人体モデルの色を変更できる。これは衣装の色として考えることも可能である。

3.3.3 フォーメーション設定

図 2 のようにドラッグでフォーメーションを設定することができる。タップするとオブジェクトの色が変わり、回転のモーションに設定することができる。

3.3.4 照明設定

照明の設定は表 2 で示すように設定できる。Search の形状の種類には直線状、交差状、放射状がある。サスペンションライトとピンスポットライトが選択された場合、図 3 のように位置と大きさを設定できる。

3.3.5 シミュレーション

設定したモーション、フォーメーション、照明で図 4 のようにシミュレーションができる。さらにここではカメラ

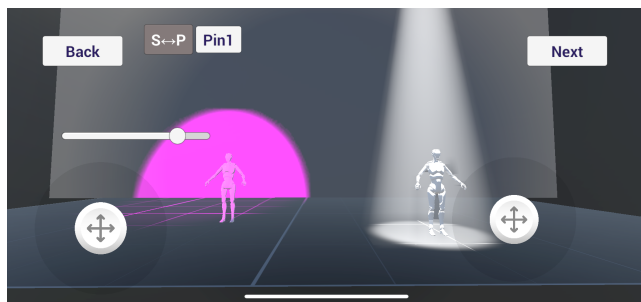


図 3 照明設定

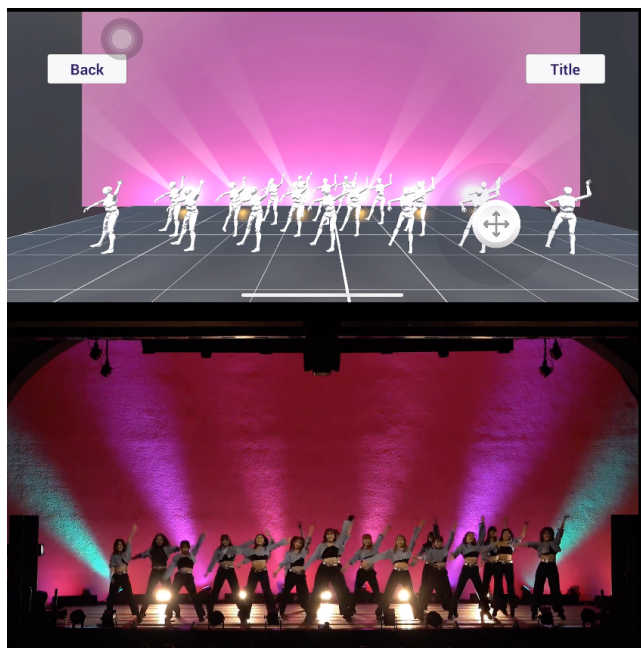


図 4 シミュレーションと実際の舞台の比較

ワークを設定することができ、ドラッグで位置、ピンチでズーム、ジョイスティックで角度を調整することができる。

人体モデルでのモーション再現にはテニスサーブ練習システム [1] を使用し、関節位置の描画を行った。これには関節の回転角を計算できる BioIK[2] を使用している。

3.4 サーバーの概要

サーバーはアプリケーションからリクエストを受けて、ダンス動画を分析し、三次元のダンスモーション情報をレスポンスとして返す。本システムの分析処理には、2020 年モデルの MacBook Air を使用した。Apple M1 チップ（8 コア CPU, 7 コア GPU）を搭載し、8GB の統合メモリを備えている。

3.5 サーバーの設計

3.5.1 サーバーの入力と出力

サーバーはアプリケーションから Youtube の URL と区間（秒数）を受け取るか、ローカルライブラリから直接動画を受け取る。どちらも動画が単一視点で撮影されており、長さが 20 秒以下である必要がある。Youtube の場合は受

け取った URL から動画を取得し推定に使用する。推定中はログをアプリケーションに返し、進行状況を伝える。推定が終了したら、生成した骨格データを json ファイルとしてアプリケーションに返す。

3.5.2 三次元骨格推定機械学習モデルと平滑化フィルタ

ここではアスリートモーション予測システム [1] を使用した。これは三次元骨格推定の機械学習モデル [3] と平滑化フィルタ [4] で構成されており、単一視点で撮影された動画を分析し 17 点の骨格関節の座標を Json 形式のファイルで出力する。骨格推定には StridedTransformer[5] を利用している。

4. 調査と評価

4.1 評価の概要

本評価の目的は、ダンス経験者が制作経験においてどのようなバックグラウンドを持ち、どのような負担や課題を感じているのかを明らかにすること、そして 3D ダンスシミュレーションを使用することでその負担がどの程度軽減できる可能性があるかを検証することである。

これらを明らかにするために以下のようなタスクを用意し、調査と評価を行った。

- ダンス経験に関するアンケート
- ダンス制作経験に関するアンケート
- アプリケーションの使用（事前に説明とデモ動画の視聴）
- アプリケーションに関するアンケート

4.2 参加者

参加者は 21-23 歳の 20 名の女子大学生で、全員がダンスサークルに所属しており、ダンス経験は 3 年以上である。また全員が 15 人以上が参加するダンスステージの制作経験がある。

4.3 評価手順

4.3.1 ダンス経験に関する調査

参加者がダンサーとして制作者に振り付けを教わる際に経験した苦労やエピソードについて答えてもらった。

4.3.2 ダンス制作経験に関する調査

参加者が以下のような状況において経験した苦労やエピソードについて答えてもらった。

- 振り付けを考える際
- フォーメーションを考える際
- 振り付けを教える際
- 照明カメラワークを考える際

4.3.3 アプリケーション評価

参加者が骨格推定の精度やシミュレーションの利便性に対してどう感じたか答えてもらった。またアプリケーションに対する好奇心や良い点と改善が必要な点についても回

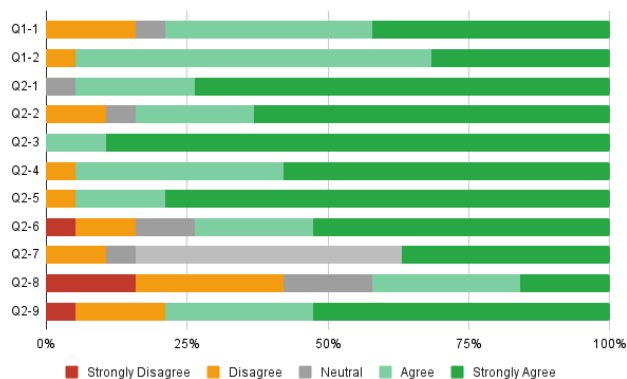


図 5 ダンス経験、制作経験に関する調査結果

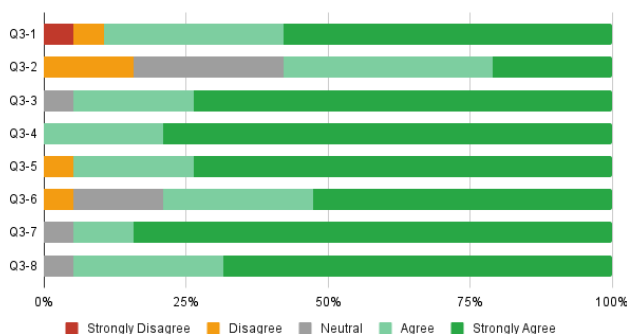


図 6 アプリケーション評価

答してもらった。

5. 結果

5.1 ダンス経験、制作経験に関する調査の結果

ダンス経験、制作経験に関する調査の結果を図 5 に示す。

5.2 アプリケーション評価の結果

アプリケーション評価の結果を図 6 に示す。

6. 考察

6.1 評価結果

6.1.1 ダンス経験に関する調査

図 5 に示した Q1-1, Q1-2 の評価結果より、振り付けを覚える際に苦労したことがある参加者は 78.9%, 対称性のある振り付けで混乱したり時間がかかってしまったりしたことがある参加者は 94.7% であることから、振り付けを覚える際に多くの参加者が難しさを感じていることがわかる。特に対称性のある振り付けは混乱や時間のかかる原因となっている。コメントで挙げられた「左右対称にするための振り付け変更」や「振り付けを覚える際に、見本となる制作者と反対の動きをする必要がある」点が、ダンサーの負担を増大させていると推測される。本アプリケーションでは、簡単に反転 3D モデルを確認できるため、ダンスを覚える側の負担を軽減する効果が期待できる。

6.1.2 ダンス制作経験に関する調査

図 5 に示した Q2-1 の評価結果より、振り付けを考える際に苦労したことがある参加者は 94.7% であることから、振り付けを考える際に多くの参加者が頭を悩ませていることが明らかになった。特に、SNS を参考にして振り付けを考えるケースが多いことから、振り付けのアイデアを得るための手段として既存のダンス映像が重要な役割を果たしていると考えられる。本システムでは、YouTube の URL から動画のダンサーの骨格を推定する機能が提供されるため、振り付け制作を支援する強力なツールとして活用される可能性がある。

図 5 に示した Q2-2, Q2-3 の評価結果より、フォーメーションを考える際に、苦労したことがある参加者は 84.3%, 複数人が踊ってる姿を客観的に確認したいと思ったことがある参加者は 100% であることから、フォーメーションを考える際に多くの制作者が困難に直面しており、特に客観的に確認する手段の必要性が高いことが分かった。コメントに見られる「距離」「ぶつかるかどうか」などは、フォーメーションの適切さを検証する際の重要なポイントである。制作者は、ダンサーにフォーメーション変更を何度も依頼し負担を与えることに抵抗を感じているため、フォーメーションの試行錯誤を効率化するツールの需要が高い。本アプリケーションでは 3D 人体モデルを使用したシミュレーションが可能であるため、フォーメーション移動時の干渉や実現可能性の検証に有効である。

図 5 に示した Q2-4, Q2-5 の評価結果より、フォーメーションを考える際に対称性を持たせるか迷ったことがある参加者は 94.7%, 対称性を持たせた姿を客観的に確認したいと思ったことがある参加者は 94.7% であることから、フォーメーションに対称性を持たせるかどうか迷う参加者が多く、またその対称性を確認したいというニーズも高いことがわかる。コメントに見られる「実際の練習まで出来栄が分からないことへの不安」や「頭の中での連鎖を考える難しさ」などは、フォーメーション制作における重要な課題であり、特に練習時間が限られている中での確認作業が難しいことが分かった。本アプリケーションでは、複数の 3D 人体モデルを使用して対称シミュレーションが可能であり、練習前に出来栄を確認できるため、これらの不安を解消する助けになると考えられる。

図 5 に示した Q2-6, Q2-7 の評価結果より、振り付けを教える際に、苦労したことがある参加者は 73.7%, 対称性のある振り付けで混乱したり時間がかかってしまったりしたことがあるのは 84.2% であることから、振り付けを教える際に多くの参加者が苦労しており、特に対称性のある振り付けに関して混乱や時間の浪費が生じていることが分かった。コメントに見られる「対称性のある振り付けを教えるのが大変」という意見は、制作者が反転した動きをダンサーに見せる際に感じる負担を反映しており、これは振り

付けの指導における大きな障壁である。本アプリケーションでは反転した 3D モデルを簡単に確認できるため、制作者が反転した動きを覚える必要がなくなり、振り付けを教える際にも効率的に指導できるというメリットがある。つまり振り付けの構想段階だけでなく、指導段階においてもアプリケーションが利益をもたらす可能性が高いことが示唆される。

図 5 に示した Q2-8, Q2-9 の評価結果より、照明、カメラワークをオーダーする際に、苦労したことがある参加者は 42.1%, 客観的に確認したいと思ったことがある参加者は 78.9% であることから、照明やカメラワークをオーダーする際に苦労している参加者は少数派であるが、客観的に確認したいという意見が多いことがわかった。この差は、振り付けやフォーメーション構成に比べて照明やカメラワークにこだわらない制作者が一定数いることが背景にあると考えられる。コメントに見られる「曲の雰囲気合っているかどうか、同じような色味や動きが連続していないかなど不安」という意見や、「実際の照明やカメラワークがイメージと違った」という声は、制作者の照明やカメラワークの設定に関する知識や経験が不足していること、映像照明担当に完成形のイメージをうまく伝達できていないことなどが起因している。これにより制作者が意図したものと異なる結果になるリスクが高く、そのリスクを避けるためにお任せでオーダーする制作者が存在すると思われる。本アプリケーションは照明やカメラワークを詳細に設定し、人体モデルの動きと合わせて 3D シミュレーションを行うことができるため、制作者がオーダーを提出する前にイメージを確認できる。この機能により、実際の照明やカメラワークがイメージと異なるリスクを減らすことができ、より精度の高いオーダーが可能となると期待できる。またアプリケーションをオーダー時にも使用することで映像照明担当にもイメージが伝わりやすくなる。

6.1.3 アプリケーション評価

図 6 に示した Q3-1, Q3-2 の評価結果より、骨格推定（動画から動きを分析すること）はダンス制作において有用だと感じた参加者は 89.5% であった。しかし 3D モデルで再現した動きの精度は十分であると感じた参加者は 57.9%, どちらでもないと感じた参加者は 26.3%, 十分でないと感じた参加者は 15.8% であった。このことから骨格推定はダンス制作において非常に有用であるという意見が大多数を占めている一方、3D モデルで再現した動きの精度については満足できる水準には至っていないことが分かった。精度に関する評価が分散している理由として、再現される動きの細かさや自然さに課題があることが挙げられる。肯定的な意見では、ほとんど人間の動き方が再現されており手足の動きが胴体に比べて精度が高いと評価されている一方で、否定的な意見では動きが不自然であったり、細かい動きや速い動きが再現できておらず分かりにくい点が指摘さ

れた。これにより特に早いテンポや複雑な振り付けを必要とするダンスにおいては再現が難しく、使用に際して不便を感じる場合があると考えられる。これらの問題は、骨格推定技術が細かい動きや早い動きに十分対応できていないことや、3D 再現時に腰を基準にした動きの再現が不自然になっていることが原因と考えられる。様々なダンススタイルに対応するにはさらなる精度の向上が求められる。

図 6 に示した Q3-3, Q3-4 の評価結果より、3D モデルによるフォーメーションのシミュレーションはダンス制作において有用だと感じた参加者は 94.7%, 左右対称の動きを再現できることはダンス制作において有用だと感じた参加者は 100% であり、その有効性を感じている参加者が圧倒的に多かったことが分かる。コメントからも、3D モデルを使用することで振り付けを立体的に確認でき、ダンサーを実際に動かしているかのように感じられる点が非常に有効だとされている。ダンサーが実際に踊る前に、仮想的にシミュレーションできることにより時間や労力の節約につながると期待される。したがって、3D フォーメーションシミュレーションは、ダンス制作プロセスにおいて大きな効率化をもたらすツールとなり得ることが分かる。

図 6 に示した Q3-5, Q3-6 の評価結果より、3D モデルによるフォーメーションのシミュレーションにおいて、照明を再現できることはダンス制作において有用だと感じた参加者は 94.7%, カメラワークを再現できることはダンス制作において有用だと感じた参加者は 78.9% であることから、参加者の多くが非常に肯定的な反応を示していることが分かる。コメントからも、照明やカメラワークの確認がしやすく、細かい調整が容易になる点が非常に便利であるという意見が多く寄せられた。また、映像照明担当への伝達時に齟齬がなくなり、よりスムーズな制作進行が期待できる。

図 6 に示した Q3-7, Q3-8 の評価結果より、本アプリケーションを活用したダンス制作は面白そうだと感じた参加者は 94.7% コメントでは、構成や対称性、照明やカメラワークなどを可視化することが、ダンス制作においてより高いクオリティを実現する手段として有効だと感じた参加者が多く、また、イメージの食い違いを未然に防ぐ点が重要だとされていた。これにより練習効率の向上やダンサーの負担軽減、映像照明担当とのスムーズなやりとりが期待される。また、参加者の中には有料で利用する価値があると感じている人もおり、アプリケーションの商業的な可能性も示唆されている。

7. おわりに

7.1 結論

本研究ではダンス制作プロセスにおける負担を軽減するために、3D ダンスシミュレーションアプリケーションを提案しその効果について分析した。その結果、3D ダンスシ

ミュレーションによりダンス制作の効率化に大きな効果をもたらす可能性が高いという結果が得られた。アプリケーションに対して肯定的な反応を示したユーザが多く、コメントから対称性のある振り付けや複雑なフォーメーション、照明、カメラワークの確認が容易になり、振り付け制作や指導、舞台演出における負担が軽減される可能性が充分にあることが分かった。

一方で、骨格推定技術を利用した動画からの動きの分析はダンス制作プロセスにおける大きな利点を提供するものの、現状ではいくつかの改善点が残されていることが明らかとなった。具体的には細かい動きや速い動きに対する対応力が不十分であることが示された。

7.2 将来課題、展望

本研究では3D ダンスシミュレーションアプリケーションを制作したが、ユーザー評価によっていくつか改善点や追加機能が示された。

人体モデルの動きについては、より高い精度の再現が求められている。これについてはサーバーで行われる三次元骨格推定精度のさらなる向上や、3D 人体モデルの設定の見直しが必須である。また、現在は同じ動きをする3D 人体モデルしか使用できないが、異なる動きを同時にシミュレーションできるようにすることで、立ちと座りの振り付けの組み合わせや、連鎖的な動きに対応できるようになり、アプリケーションの汎用性が広がることが期待できる。

フォーメーション配置については、ダンサーの間隔やバミリ*1に関する自動調整機能が挙げられる。これは特に大規模なダンス制作においてフォーメーション配置の効率化が期待できる。さらに、3D 人体モデルに移動機能を追加することで、フォーメーション移動のシミュレーションも可能になる。

また、ユーザー間での共同制作機能や音楽の追加機能も挙げられる。これにより、ダンス制作の幅が広がりさらに多くの場面での活用が可能になる。

参考文献

- [1] Yuichiro Hiramoto, Mohammed Al-Sada, Tatsuo Nakajima. Designing a 3D Human Pose Estimation-Based VR Tennis Training System. 2023 IEEE 29th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), pp. 267–268, 2023.
- [2] Sebastian Starke. Bio IK: A memetic evolutionary algorithm for generic multi-objective inverse kinematics. PhD thesis, Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky, 2020.
- [3] Rainer Martens, Les Burwitz, and Joshua Zuckerman. Modeling effects on motor performance. Research Quarterly. American Alliance for Health, Physical Education and Recreation, Vol. 47, No. 2, pp.277–291, 1976.

*1 舞台上で演者が立つ位置

表 A.1 調査と評価の内容

質問番号	内容
Q1-1	振り付けを覚える際に、苦勞したことがある
Q1-2	振り付けを覚える際に、対称性のある振り付けで混乱したり時間がかかったことがある
Q2-1	振り付けを考える際に、苦勞したことがある
Q2-2	フォーメーションを考える際に、苦勞したことがある
Q2-3	フォーメーションを考える際に、複数人が踊っている姿を客観的に確認したいと思ったことがある
Q2-4	フォーメーションを考える際に、対称性を持たせるか迷ったことがある
Q2-5	フォーメーションを考える際に、対称性を持たせた姿を客観的に確認したいと思ったことがある
Q2-6	振り付けを教える際に、苦勞したことがある
Q2-7	振り付けを教える際に、対称性のある振り付けで混乱したり時間がかかったことがある
Q2-8	照明、カメラワークをオーダーする際に、苦勞したことがある
Q2-9	照明、カメラワークをオーダーする際に、客観的に確認したいと思ったことがある
Q3-1	骨格推定（動画から動きを分析すること）はダンス制作において有用だと感じた
Q3-2	3D モデルで再現した動きの精度は十分であると感じた
Q3-3	3D モデルによるフォーメーションのシミュレーションはダンス制作において有用だと感じた
Q3-4	3D モデルによるフォーメーションのシミュレーションにおいて、左右対称の動きを再現できることはダンス制作において有用だと感じた
Q3-5	3D モデルによるフォーメーションのシミュレーションにおいて、照明を再現できることはダンス制作において有用だと感じた
Q3-6	3D モデルによるフォーメーションのシミュレーションにおいて、カメラワークを再現できることはダンス制作において有用だと感じた
Q3-7	本アプリケーションを活用したダンス制作は面白そうだと感じた
Q3-8	本アプリケーションを友人に勧めたいと思う

- [4] Ronald W Schafer. What is a savitzky-golay filter?[lecture notes].IEEE Signal processing magazine, Vol. 28, No. 4, pp. 111–117, 2011.
- [5] Wenhao Li, Hong Liu, Runwei Ding, Mengyuan Liu, Pichao Wang, and Wenming Yang. Exploiting temporal contexts with strided transformer for 3d human pose estimation. IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 25, pp. 1282–1293, 2022.

付 録

A.1 調査と評価の内容

調査と評価の内容を表 A.1 に示す。