

一

修士学位論文

オンラインショッピングにおける
購買体験を支援する
拡張現実感技術を用いた
Virtual Try On システム

令和3年度

東京大学大学院

工学系研究科 電気系工学専攻

37-206470

北野 壮一

指導教員 小川 剛史 准教授

論文要旨

オンラインショッピングにおける 購買体験を支援する 拡張現実感技術を用いた Virtual Try On システム

東京大学大学院
工学系研究科 電気系工学専攻
37-206470
北野 壮一

購買行動は、オンライン化の影響を強く受ける日常行動の1つである。近年では、カテゴリを問わず、多様な製品の取引の場が、実店舗から EC サイト等を介したオンライン上へと移行している。拡大傾向にある EC 市場において、衣類製品は数多く取り扱われている製品カテゴリの1つであり、オンラインショッピングにおける衣類製品の購買体験については、さらなる質の向上が望まれる。Virtual Try On システムは、実際の衣類製品が手元に存在しないオンラインショッピングに際して、バーチャル試着体験の提供によって、購買者の意思決定を支援する技術であり、さまざまな研究および商用利用がこれまでに行われてきた。

本研究では、バーチャル衣服の被着用者が人間である、拡張現実感技術を用いた Virtual Try On システムにおける試着結果提示用デバイスとして、OSTHMD を用いることによって、新たなバーチャル試着体験を提供する 2 つの Virtual Try On システムを提案した。1 つ目は、OSTHMD を用いることによって、試着結果の提示位置をユーザの動きに対して適応的に変更可能な特徴を活かして、360° 方向からの試着結果の確認を支援する Virtual Try On システムである。2 つ目は、OSTHMD を用いることによって、実世界の情報と合わせた試着結果を、ユーザに提示することができ

る特徴を活かして、実世界の衣服との着合わせの確認を支援する Virtual Try On システムである。

システム性能評価では、ユーザの動きに応じて、リアルタイムで試着結果を生成するための、画像合成処理における既存の問題への対応策を講じた上で、その方法が適切に機能するか、検証実験を実施した。検証の結果、既存の問題への対応策は、期待通りに機能しており、様々な方向からの試着結果を、一定の品質でユーザに提示可能であることが確認できた。

ユーザビリティ評価では、提案システムの使用感およびユーザのシステム利用時における特徴の評価を目的として、被験者実験を実施した。実験の結果、試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムは、被験者が感じる使い心地の良さや有用性の観点で、従来システムよりも優れていることがわかった。また、OSTHMD を用いることによって、ユーザは、背面からの試着結果を、従来システムよりも快適に確認可能であることが示唆された。さらに、実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムでは、使用感については、有効性を確認できなかったが、特定の条件下においては、従来システムと異なる試着結果の印象を、ユーザに抱かせることが示唆された。

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 概要.....	3
第 2 章 関連研究.....	4
2.1 画像ベースの Virtual Try On システムに関する研究.....	4
2.1.1 画像処理技術を用いた Virtual Try On システム.....	4
2.1.2 深層学習モデルを用いた Virtual Try On システム.....	5
2.2 XR ベースの Virtual Try On システムに関する研究.....	6
2.2.1 VR ベースの Virtual Try On システム.....	6
2.2.2 AR ベースの Virtual Try On システム.....	6
2.3 衣服モデル生成手法に関する研究.....	8
2.3.1 3D データを用いた衣服モデル生成手法.....	8
2.3.2 多視点画像を用いた衣服モデル生成手法.....	8
2.3.3 単視点画像を用いた衣服モデル生成手法.....	9
第 3 章 提案システム.....	10
3.1 コンセプト.....	10
3.2 実装方法.....	11
3.2.1 システムの構成.....	11
3.2.2 システムの処理の流れ.....	12
3.2.3 試着結果生成のための画像合成処理.....	13
3.2.4 試着結果の出力インターフェース.....	20
3.3 実際の動作.....	25
3.3.1 試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システム.....	25
3.3.2 実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム.....	25

3.4	衣服モデル生成手法	27
3.4.1	提案手法	27
第4章	システム性能評価	31
4.1	概要	31
4.2	改善前の動作検証	32
4.2.1	実験設定	33
4.2.2	実験結果	33
4.2.3	考察	34
4.3	改善後の動作検証	39
4.3.1	改善方法	39
4.3.2	検証結果	40
4.3.3	考察	49
第5章	ユーザビリティ評価	50
5.1	評価実験 I	50
5.1.1	実験目的	50
5.1.2	実験内容	50
5.1.3	実験結果	57
5.1.4	考察	61
5.2	評価実験 II	67
5.2.1	実験目的	67
5.2.2	実験内容	68
5.2.3	実験結果	73
5.2.4	考察	77
第6章	結論	81
6.1	結論	81
6.2	今後の課題	82
6.2.1	OSTHMDの導入にともなう問題の改善	82
6.2.2	着合わせ想定がおよぼす影響の実用面における有効性検証	82
6.2.3	試着に関する情報品質の向上	82

謝辞.....	83
発表文献	84
参考文献	85
付録 A 衣服モデル生成手法の定性評価	89
A.1 定性評価.....	89
A.2 まとめ.....	89

目次

図 1-1	Virtual Try On システム	2
図 3-1	Virtual Try On システム全体の処理	13
図 3-2	画像合成処理.....	14
図 3-3	ホモグラフィ行列の推定に用いた関節位置	16
図 3-4	ホモグラフィ行列の推定に用いた追加の対応点	18
図 3-5	肌色領域検出処理.....	19
図 3-6	実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム	21
図 3-7	背景除去に利用した 2 値画像.....	22
図 3-8	上半身領域のみの試着結果	22
図 3-9	試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムの動作	26
図 3-10	実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムの動作 ..	26
図 4-1	問題が発生した際の試着結果	32
図 4-2	実験環境.....	32
図 4-3	エラーの定義.....	33
図 4-4	フレーム推移とエラーの発生についての結果	35
図 4-5	フレーム推移と関節位置のばらつきについての結果 (1 試行目)	36
図 4-6	フレーム推移と関節位置のばらつきについての結果 (2 試行目)	37
図 4-7	フレーム推移と関節位置のばらつきについての結果 (3 試行目)	38
図 4-8	新たに追加した対応点	40
図 4-9	フレーム推移とエラーの発生についての結果	41
図 4-10	フレーム推移と対応点のばらつきについての結果 (1 試行目)	42
図 4-11	フレーム推移と対応点のばらつきについての結果 (2 試行目)	43
図 4-12	フレーム推移と対応点のばらつきについての結果 (3 試行目)	44
図 4-13	Hu モーメント不変量に基づく類似度についての具体例	46
図 4-14	フレーム推移と類似度の差についての結果	47
図 4-15	関節位置のばらつきと類似度の差についての結果 (1 試行目)	47
図 4-16	関節位置のばらつきと類似度の差についての結果 (2 試行目)	48
図 4-17	関節位置のばらつきと類似度の差についての結果 (3 試行目)	48
図 5-1	据え置き型ディスプレイを用いたシステム	51
図 5-2	据え置き型ディスプレイを用いたシステムのユーザインタフェース.....	51
図 5-3	OSTHMD を用いたシステムのユーザインタフェース.....	51
図 5-4	被験者アンケート	53

図 5-5	回転角度の定義.....	55
図 5-6	試着結果の確認方向の定義.....	56
図 5-7	質問項目毎の回答結果.....	58
図 5-8	属性毎の回答結果.....	58
図 5-9	回転量についての結果.....	59
図 5-10	捻り量についての結果.....	59
図 5-11	試着結果の方向別確認割合についての結果.....	59
図 5-12	試着結果の方向別確認割合と動きデータの相関.....	60
図 5-13	据え置き型ディスプレイを用いたシステム利用時の フレーム推移と腰の回転角度の絶対値についての結果.....	62
図 5-14	OSTHMD を用いたシステム利用時の フレーム推移と腰の回転角度の絶対値についての結果.....	63
図 5-15	背面の試着結果の平均確認時間と確認回数についての結果.....	64
図 5-16	条件②で用いたシステム.....	69
図 5-17	条件③で用いたシステム.....	69
図 5-18	全条件で用いたシステムに共通のユーザインタフェース.....	69
図 5-19	質問項目毎の回答結果.....	74
図 5-20	属性毎の回答結果.....	74
図 5-21	画像情報に基づく順位づけ結果との違い (Tシャツセット全体).....	75
図 5-22	画像情報に基づく順位づけ結果との違い (視点によって見え方が変化する Tシャツ).....	75
図 5-23	画像情報に基づく順位づけ結果との違い (背面固有のデザインがある Tシャツ).....	75
図 5-24	着合わせ想定の有無が Tシャツの印象におよぼす影響.....	76
図 A-1	入力寸法値を個別に変化させた際の Tシャツモデルの形状変化についての結果.....	90

表目次

表 5-1 順位づけタスクの各試行で用いた Tシャツセットと実世界のズボンの組み合わせ	71
--	----

第1章 序論

1.1 研究背景

IT 技術の進展にともない、従来の生活様式においてオフライン環境で行われてきた日々の活動の多くが、オンライン化の影響を受けている。購買活動も、オンライン化の影響を受ける生活行動の 1 つである。経済産業省の報告[1]によると、日本国内では 2010 年から 2019 年の期間において、EC 市場規模は約 7.8 兆円から約 19.4 兆円へと拡大しており、物販系 EC 化率は 2.84%から 6.76%へと増加している。海外では、アメリカにおいて、2007 年から 2017 年の期間に、小売販売の総売上額に占める EC サイトを介した売上額の比率が、約 3 倍まで上昇している事実が報告されている[2]。また、近年の新型コロナウイルスの世界的な感染拡大が、購買活動のオンライン化にさらなる拍車をかけているとの報告もある[3, 4]。このように、購買活動の場が、従来の実店舗からオンライン環境へと移行する傾向にあることは、データからも明らかであり、今後もこの流れは継続することが予想される。

オンライン環境での購買活動において、数多く取り扱われている製品カテゴリの 1 つにアパレル製品がある。経済産業省の報告[1]によると、日本国内では 2019 年の全カテゴリの EC 市場規模に占めるアパレル製品の割合は約 19%であり、全カテゴリの中で市場規模が最大である。また、アメリカ国内の EC 市場規模の一部分を反映したデータセットを用いた分析結果によると、全カテゴリの取り扱い製品数に占めるアパレル製品数が占める割合は約 6%であり、食料品、教育、娯楽関連の製品に次ぐ数の製品が EC 市場で取り扱われている[2]。したがって、近年拡大傾向にある EC 市場において、アパレル製品は特に取引が盛んなカテゴリの 1 つである。以上を踏まえて、オンラインショッピングにおける、アパレル製品の購買体験のさらなる質の向上が望まれる。

オンラインショッピングにおける、アパレル製品の購買体験の質を向上させるための手段の 1 つとして、Virtual Try On システムの利用が挙げられる (図 1-1)。Virtual Try On システムは多くの場合、画像合成技術や Virtual Reality (以下、VR)、

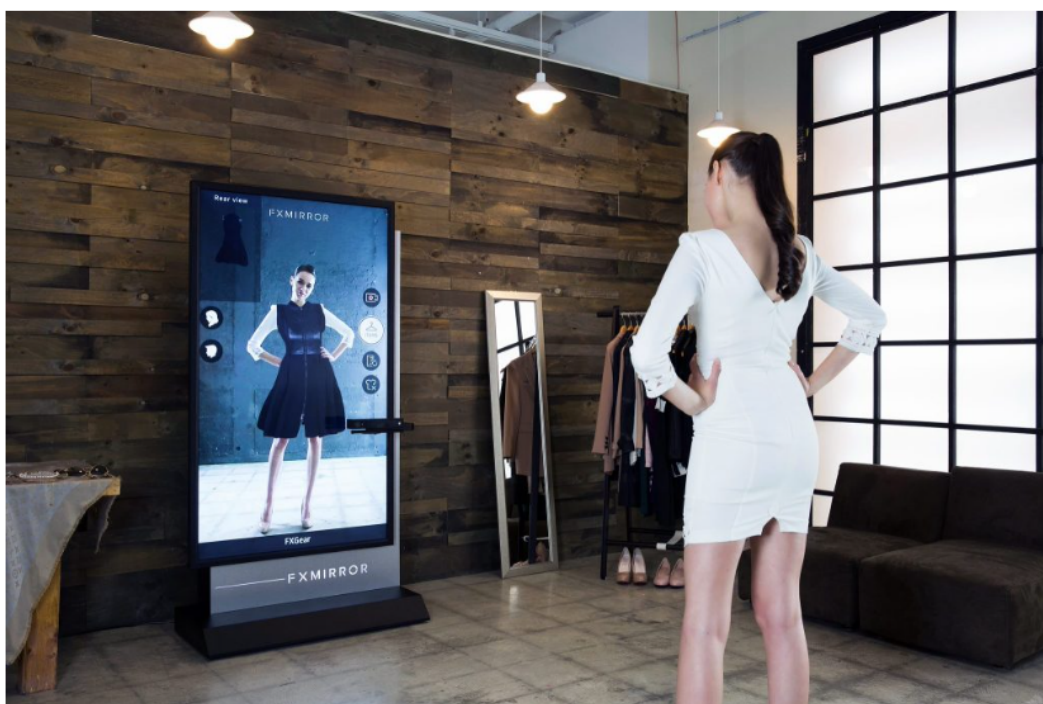


図 1-1 Virtual Try On システム¹

拡張現実感（Augmented Reality：以下，AR）などの Extended Reality（以下，XR）技術を用いて実現される．Virtual Try On システムを利用することによって，アパレル製品の購入を検討するユーザは，実際の製品を試着した場合に近い状況で，さまざまな情報を取得することができる．その結果，ユーザは，オンラインショッピングサイト上の画像情報のみを基に製品を選択する場合よりも，具体的な根拠に基づいた意思決定を下すことができる．Virtual Try On システムは，研究レベルだけでなく，商用レベルでも盛んに利用されてきた．実際に，UNIQLO²やZARA³などの大手アパレル企業が主導する Virtual Try On システムを活用したサービスの報告もある．したがって，将来的に，Virtual Try On システムの利用は，オンラインショッピングにおいて，アパレル製品の購入を検討する際の一般的な選択となりうる．

1 <https://www.fxgear.net/vr-fashion>

2 <https://www.uniqlo.com/jp/ja/>

3 <https://www.zara.com/jp/>

1.2 研究目的

本研究では、バーチャル衣服の試着結果を、 360° 方向から自由に確認することができる、新たな Virtual Try On システムの提案と評価を行なった。具体的には、AR ディスプレイの1つである、光学透過型頭部装着型ディスプレイ（Optical See-Through Head Mounted Display：以下、OSTHMD）を用いて、ユーザへの試着結果の提示を行なった。また、被験者実験を通して、提案システムが試着体験に与える影響に関する評価を行なった。さらに、OSTHMD を用いた Virtual Try On システムでは、実世界の情報と合わせて試着結果を提示することができる特徴を利用して、実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムの提案および被験者実験を通じた評価も行なった。

1.3 概要

本論文の構成は次のとおりである。第2章では、本研究の関連研究について説明する。第3章では、提案する Virtual Try On システムのコンセプト、実装方法、動作の様子について主に説明する。第3章の最後に、Virtual Try On システムのための衣服の3Dモデル作成手法についての検討内容も説明する。第4章では、提案する Virtual Try On システムの、画像合成処理に関する既存の問題解決のために実施した検証実験について述べる。第5章では、提案システムの効果を評価するために行った被験者実験について述べ、得られた結果の考察を行う。最後に、第6章で本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

本研究に関連する研究について紹介する。Virtual Try On システムは、バーチャル試着の対象となる衣服情報の観点から、2つに分類できる。1つ目は、特定視点から撮影された衣服画像を用いた、画像ベースの Virtual Try On システムである。2つ目は、実際の衣服に基づいてモデリングされた3Dモデルを用いた、XR ベースの Virtual Try On システムである。以降では、画像ベースの Virtual Try On システムと XR ベースの Virtual Try On システムに関連する研究について、主に説明する。また、本研究では、XR ベースの Virtual Try On システムを利用する際に必要となる、衣服の3Dモデルを簡易的に生成する手法についても検討した。そのため、衣服の3Dモデル生成に関連する研究についても、本章末尾で紹介する。

2.1 画像ベースの Virtual Try On システムに関する研究

現在に至るまで、特定視点から撮影された衣服画像を、画像処理技術や深層学習モデルを用いて、ユーザの身体領域に合わせて変形することによって、衣服の試着結果を確認可能にする Virtual Try On システムが数多く報告されてきた。本節では、画像ベースの Virtual Try On システムについて、画像処理技術を用いたシステムと深層学習モデルを用いたシステムに関連する研究について述べる。

2.1.1 画像処理技術を用いた Virtual Try On システム

Yamada ら[5]は、ユーザ画像と衣服画像において身体領域の輪郭検出を行い、それぞれの輪郭上にサンプリングした複数の制御点を用いた最適化計算を行うことによって、衣服画像が自然な形状変化を伴って、ユーザ画像上に適切に配置される手法の提案を行なった。Sekine ら[6]は、カメラと距離センサが搭載された大型モニタを利用して、画像ベースの Virtual Try On システムを提案した。大型モニタの前に立った

状態のユーザから推定した体型を基に、事前に構築したデータベース上から、最もユーザの体型に近い衣服画像を選択し、モニタを通して試着結果をユーザに提示することができる。Srinivasan ら[7]は、ユーザ画像と衣服画像の輪郭上から、人体構造に基づいた特徴点を検出し、それらを参照点として利用することによって、試着結果となる合成画像の生成を行なった。Shah ら[8]は、ユーザ画像と衣服画像上の両肩、両腰の計4点から推定されたホモグラフィ行列を用いて、衣服画像をユーザ画像上に射影することによって、試着結果となる画像を生成した。

2.1.2 深層学習モデルを用いた Virtual Try On システム

近年では、深層学習モデルを用いた画像ベースの Virtual Try On システムに関する研究が数多く発表されている。VITON[9]では、ターゲットとなるユーザ画像に対して、衣服画像を合成した画像を、試着結果として生成することができる深層学習モデルが提案された。VITON では、衣服画像をターゲットとなるユーザ画像上に合成した際に、衣服の質感、ロゴ、刺繍等の詳細な情報の多くが失われてしまうという問題があった。しかし、CP-VTON[10]では、VITON がもつ上記の問題を改善し、衣服の詳細情報を保存した状態で、合成画像を生成することに成功した。VITON や CP-VTON では、衣服のみが写った衣服画像を利用していたが、SwapNet[11]では、衣服を着用した人物の画像から、衣服領域のみを抽出し、ターゲットとなるユーザ画像上に合成する深層学習モデルの提案を行なった。Dong ら[12]は、画像に写った人物がさまざまなポーズを取っている場合でも、衣服画像を適切にユーザ画像上に合成する深層学習モデルの提案を行なった。FW-GAN[13]では、ビデオフレーム内の人物に対して、衣服画像を合成する深層学習モデルの提案を行なった。FW-GAN によって生成されたビデオを通して、ユーザは試着結果を動画として確認することができる。

画像ベースの Virtual Try On システムでは、実際の衣服が手元に存在しない場合でも、試着結果を手軽に確認することができる。一方で、元となる衣服情報が、特定視点から撮影された画像であるため、複数視点から試着結果を見ることは基本的に困難である。また、これまでに報告された画像ベースの Virtual Try On システムでは、リアルタイム性が重視されていない。以上の問題を踏まえると、現時点における画像ベースの Virtual Try On システムを用いた試着体験は、視点が限定的かつインタラクテ

イブ性に乏しい。そのため、実店舗における衣服の試着体験には遠く及ばないことがわかる。

2.2 XR ベースの Virtual Try On システムに関する研究

実際の衣服を基に作成した 3D モデルに対して、リアルタイムでユーザの動きを反映し、VR 環境あるいは AR 環境で、ユーザに対して試着結果を提示する、XR ベースの Virtual Try On システムに関する研究も、これまでに報告されてきた。XR ベースの Virtual Try On システムは、VR 空間でのバーチャル試着体験を実現する、VR ベースの Virtual Try On システムと、実世界の情報に合わせて試着結果を提示する、AR ベースの Virtual Try On システムに分類される。

2.2.1 VR ベースの Virtual Try On システム

VR ベースの Virtual Try On システムに関する研究報告は、AR ベースの Virtual Try On システムに関する研究報告と比較すると数少ない。V-DOOR[14]では、VR 空間内で、ユーザが自身の体型に近いアバターを選択し、アバターが衣服を試着している様子をあらゆる方向から確認することができる Virtual Try On システムが提案された。

2.2.2 AR ベースの Virtual Try On システム

AR ベースの Virtual Try On システムは、バーチャル衣服の被着用者の観点から、アバターである場合と実際の人間である場合の 2 つに大きく分類される。以下では、AR ベースの Virtual Try On システムにおいて、バーチャル衣服の被着用者を、アバターに設定したシステム（以下、被着用者がアバターである Virtual Try On システム）、と人間に設定したシステム（以下、被着用者が人間である Virtual Try On システム）の関連研究について順に説明したのちに、バーチャル衣服の被着用者の分類には当てはまらない、AR ベースの Virtual Try On システムの関連研究を紹介する。

2.2.2.1 被着用者がアバターである Virtual Try On システム

Sekhavat[15]は、ユーザがモバイルデバイスのカメラを通して、衣服のタグを撮影

することによって、試着対象の衣服を着用したアバターの映像を確認できるシステムを提案した。このシステムでは、ユーザはタグを撮影する視点を変更することによって、試着結果をあらゆる方向から自由に確認することができる。Liu ら[16]と Xu ら[17]は、ユーザの体型や顔などの特徴を基にカスタマイズされたアバターと実環境の間で発生するインタラクションの様子を、リアリティをもった試着結果としてユーザが AR グラスを介して客観的に確認できるシステムを提案した。

2.2.2.2 被着用者が人間である Virtual Try On システム

Giovanni らや Yousef らなどは、据え置き型ディスプレイと深度センサを用いた Virtual Try On システムを提案した[18-22]。ユーザは、自身の身体にバーチャル衣服が重畳された試着結果としての映像を、自由に動きながら、リアルタイムに据え置き型ディスプレイを通して確認することができる。Rogge ら[23]は、事前に撮影したビデオフレーム内に映る人物に、バーチャル衣服を試着させる手法を提案した。この手法では、入力ビデオを基に再構築した人物の体型と動きを利用して、適切なサイズのバーチャル衣服に動きを加えたアニメーションを作成した。作成したバーチャル衣服のアニメーションを、入力ビデオ内の人物に対して合成することによって、ビデオフレーム内の人物の試着結果を動画として確認することができる。Yoon ら[24]は、ユーザ画像とバーチャル衣服の 3D モデルを入力として、ユーザの動きが反映されたバーチャル衣服のレンダリング結果を、適切なサイズと位置で配置することができる深層学習モデルの提案を行なった。

2.2.2.3 その他の関連研究

AteGau[25]では、壁面に設置した衣服に対して、プロジェクタを用いて適切な位置にバーチャル衣服を投影することによって、2つの衣服の組み合わせを確認することができるシステムが報告された。Yuan ら[26]は、据え置き型ディスプレイと深度センサを用いて、AR ベースの Virtual Try On システムを提案した。この研究では、据え置き型ディスプレイを通してユーザに提示する情報として、ユーザの身体にバーチャル衣服のみを重畳した映像、ユーザの頭部にバーチャル衣服を着用したアバターの身体を重畳した映像、ユーザの動きをリアルタイムに反映したアバターの映像の3つ条

件を準備し，使用感に関する比較実験を行なった．

XR ベースの Virtual Try On システムは，画像ベースの Virtual Try On システムと比較して，構成が複雑かつ大規模になりやすい．一方で，自由な姿勢における試着結果を，さまざまな方向から，リアルタイムで確認することが可能であるため，実店舗における試着に近い体験をユーザに提供することができる．本研究では，XR ベースの Virtual Try On システムについて，新たなシステムの提案を行なった．

2.3 衣服モデル生成手法に関する研究

XR ベースの Virtual Try On システムを利用する際に必要となる，衣服の 3D モデルを作成する手続きのなかで，三次元形状の構成は特に重要である．本節では，衣服の 3D モデルの三次元形状の構成に関する研究について説明する．衣服の 3D モデルの三次元形状の構成手法は，入力に利用したデータの観点から，深度センサによって取得した 3D データを用いた手法，多視点画像を用いた手法，単視点画像を用いた手法の 3 つに分類することができる．以降では，それぞれの手法に関する研究を，順に紹介する．

2.3.1 3D データを用いた衣服モデル生成手法

Chen ら[29]は，入力として与えられた画像に写った人物が着用する衣服の 3D モデルを，3D スキャンによって事前に作成した衣服のパーツの 3D モデルを組み合わせることによって作成した．Pons-Moll ら[30]は，衣服を着用した状態の人物の 4D スキャン映像を入力として，衣服の 3D モデルの三次元形状の構成を行った．

2.3.3 多視点画像を用いた衣服モデル生成手法

Scholz ら[31]と White ら[32]は，特殊なカラーマーカを表面に印刷した衣服を多視点から撮影することによって，衣服の 3D モデルの三次元形状の構成を行った．Bhatnagar ら[33]は，一連のビデオフレームから抽出したある人物の多視点画像を基に，人体と衣服の 3D モデルの三次元形状の構成を行った．

2.3.3 単視点画像を用いた衣服モデル生成手法

Zhou ら[34]や Yang ら[35]は、衣服を着用した人物が写った単視点画像を基に、人体や衣服の 3D モデルの三次元形状の構成を行った。Xu ら[36]は、平面上に置いた衣服の画を基に、衣服の 3D モデルを作成した。具体的には、衣服画像から衣服形状を決定づける特徴点の検出を行い、特徴点の位置関係を 3D のテンプレートモデルの形状に反映させることによって、入力画像に写った衣服の形状に近い 3D モデルを生成した。

深度センサで取得した 3D データに基づいた、衣服の 3D モデルの三次元形状構成手法は、高精度である反面、入力データの取得に必要となる機材は高価であり、適用場面は限定的である。その一方、多視点画像を入力とした、衣服の 3D モデルの三次元形状構成手法は、3D データを入力とした手法と比較して、高価な機材は必要としないが、入力データの取得には手法毎に特殊な環境の構築が必要であり、適用場面はやはり限定的である。3D データや多視点画像を用いた手法と比較して、単視点画像を用いた手法は、高価な機材や特殊な環境を必要とせず、最も簡易的な手法であり、さまざまな場面に適用可能である。ただし、フリーマーケットサイトやオークションサイトなどを介して、個人で衣類製品の取引を行う状況を想定した場合には、衣服のみが写った単視点画像のみを入力として、衣服の 3D モデルを作成できることが望ましい。以上を踏まえて、本研究では、衣服のみが写った単視点画像を入力として、簡易的に衣服の 3D モデルの三次元形状の構成を行う手法について検討した。

第3章 提案システム

本章では主に、提案システムのコンセプト、実装方法、実際の動作に関する説明を行う。本章の最後に、XR ベースの Virtual Try On システムを利用したバーチャル試着の際に必要な、衣服の 3D モデルを、オンライン上の衣服画像を基に簡易的に作成する方法について検討した内容を説明する。

3.1 コンセプト

前章で述べたとおり、XR ベースの Virtual Try On システムは、画像ベースの Virtual Try On システムと比較して、実際の試着に近い体験を提供することが可能である。さらに、実際の試着体験の再現度という観点では、バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On システムは、その他の XR ベースの Virtual Try On システムよりも優れている。したがって、これまでに紹介したさまざまな Virtual Try On システムのなかでも、バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On システムが、最も今後普及しやすい形態の 1 つであると考えられる。そこで本研究では、バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On システムがもつ既存の問題に焦点を当てる。

従来、バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On システムは、試着結果提示用デバイスに据え置き型ディスプレイを用いたシステムが数多く報告されてきた。据え置き型ディスプレイを用いた Virtual Try On システムの問題点として、試着結果を 360° 方向から確認することが困難である点が挙げられる。試着結果の提示位置が物理的に固定されているため、ユーザは常に据え置き型ディスプレイの方向に視線を向け続ける必要があり、その結果、特に背面の試着結果の確認が困難になる。これは、衣服情報として 3D モデルを用いた XR ベースの Virtual Try On システムがもつ長所の 1 つである、さまざまな方向からの試着結果が確認可能である点を活かしてきていない。

本研究では、バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On

システムの試着結果提示用デバイスとして、OSTHMD を用いたシステムを提案する。OSTHMD は、試着時の視覚情報の提示位置がプログラマブルであるため、据え置き型ディスプレイを用いた Virtual Try On システムのように、試着中のユーザが特定の方向に視線を向け続ける必要はない。その結果、試着結果を 360° あらゆる方向から容易に確認可能なシステム（以下、「試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システム」）を実現することができる。

据え置き型ディスプレイと比較した際の OSTHMD の他の特徴として、試着中のユーザに提示する試着結果の視覚情報が物理的な枠に囚われない、という点がある。すなわち、据え置き型ディスプレイを用いたシステムでは、試着結果の情報がディスプレイの枠内で完結するのに対して、OSTHMD を用いたシステムでは、実世界の情報と合わせて試着結果を確認することができる。この特徴を活かして、ユーザが実際に所有する実世界の衣服と、実際の環境に存在しないバーチャル衣服を着合わせた際の様子を確認できる Virtual Try On システム（以下、「実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム」）の提案も行なった。

本研究では、比較的簡単な形状である T シャツのバーチャル試着を実現するための Virtual Try On システムに焦点を当てて、実装を行なった。

3.2 実装方法

3.2.1 システムの構成

以下の機器およびソフトウェアを用いて、システムの実装を行なった。

- デスクトップ PC
 - ハードウェア
 - CPU : Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU 3.6GHz(8 CPUs)
 - メモリ : 32GB
 - GPU : NVIDIA GeForce GTX 1080
 - ソフトウェア
 - Windows10 Home 64bit
- HoloLens2

- Azure Kinect Sensor
- Unity 2019.4.22.f

試着結果提示用デバイスとして、Microsoft 社の OSTHMD である、HoloLens2 を使用した（以下、HoloLens）。また、バーチャル試着体験をユーザに提供する際、バーチャル衣服はユーザの身体の動きを反映している必要がある。提案システムでは、Microsoft 社の深度センサである、Azure Kinect Sensor（以下、Kinect センサ）を用いてユーザの身体の動きの推定（以下、ボディトラッキング）を行ない、その結果をバーチャル衣服の形状に反映させた。ソフトウェア実装には、Unity を用いた。Unity 内部においては、Microsoft 社が提供する Mixed Reality エクスペリエンスを構築するためのクロスプラットフォームツールキットである、Mixed Reality Toolkit (MRTK)、および Microsoft 社が提供する Kinect センサの開発者ツールキットを Unity 内部で使用可能にする、Light Buzz 社の有償アセットを利用した。

提案システムの動作品質に関しては、HoloLens の視野角が水平方向 43° 、垂直方向 28.5° 、対角方向 52° であり、解像度は片目あたり 2K、 1° あたり 47pixel である。また、Kinect センサのフレームレートは 15fps、Unity 内部の平均フレームレートは、「試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システム」では 22fps であり、「実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム」では 13fps であった。

3.2.2 システムの処理の流れ

システムの処理は、Unity 内部の処理と Unity 外部の画像合成処理の大きく 2 つから構成される。

Unity 内部の主な処理は、バーチャル衣服へのユーザの身体動作の反映（以下、モーションリターゲットイング）と、Unity 外部の画像合成処理において入力となるデータの出力、Unity 外部の処理で出力された合成画像データの読み込み、ユーザへの試着結果の表示から構成される。Unity 外部の画像合成処理の入力データとして、試着体験中のユーザの画像データと関節位置データ、モーションリターゲットイング済みのバーチャル衣服の画像データと関節位置データを Unity 内部から出力した。

Unity 外部の画像合成用プログラムは、Python を用いて実装した。Unity 内部の処理

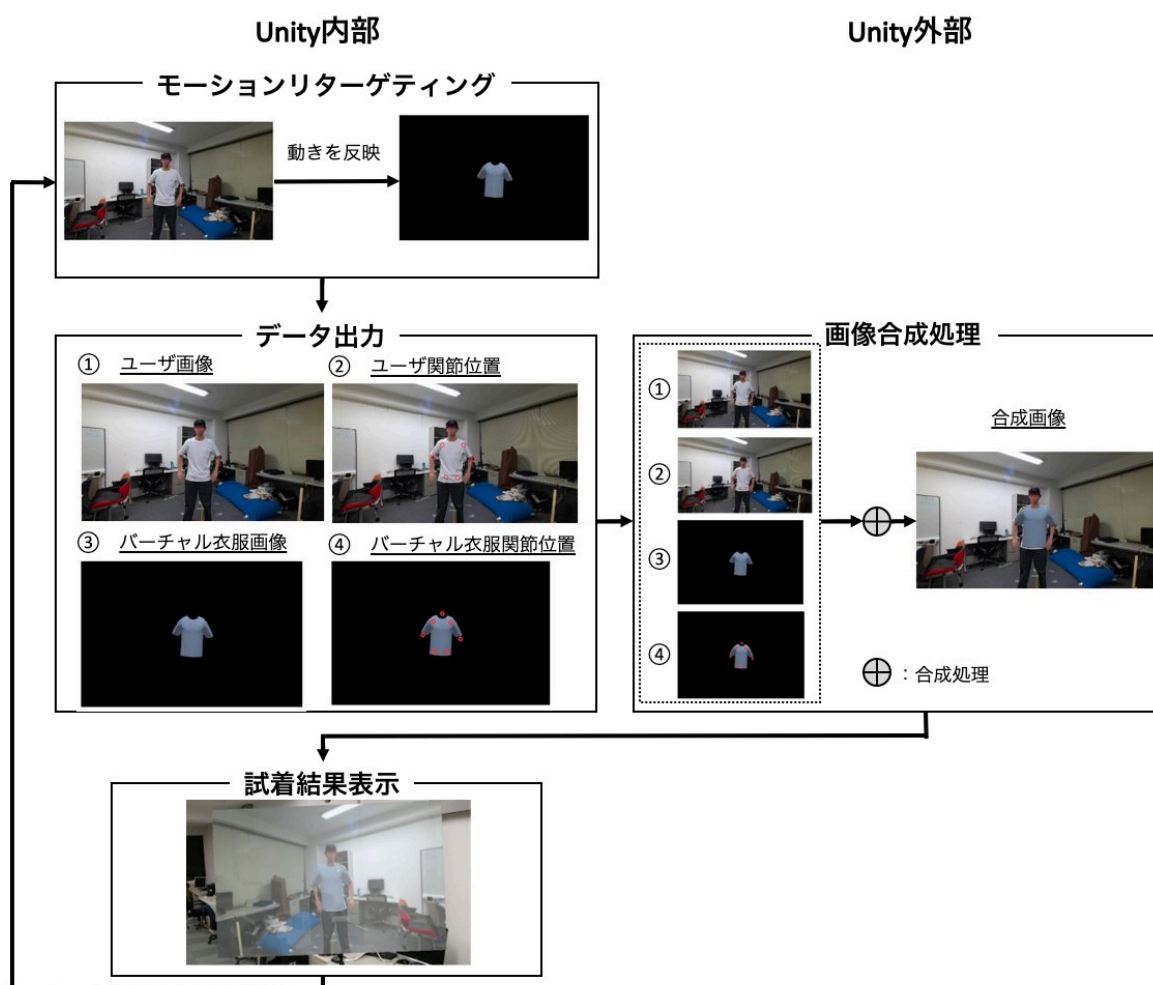


図 3-1 Virtual Try On システム全体の処理

を通して出力されたデータを入力として、バーチャル衣服をユーザが実際に試着しているような合成画像を、試着結果として生成した。システム全体の処理の概要は、図 3-1 のとおりである。

3.2.3 試着結果生成のための画像合成処理

モーションリターゲティング済みのバーチャル衣服を、ユーザが実際に試着しているような合成画像を生成する方法は、三次元空間において位置合わせを行なったのちに、ユーザの情報とバーチャル衣服の情報をまとめて画像空間にレンダリングする方法、ユーザの情報とバーチャル衣服の情報を別々に画像空間にレンダリングしたのちに、画像空間においてユーザとバーチャル衣服の位置合わせを行う方法の 2 つに分

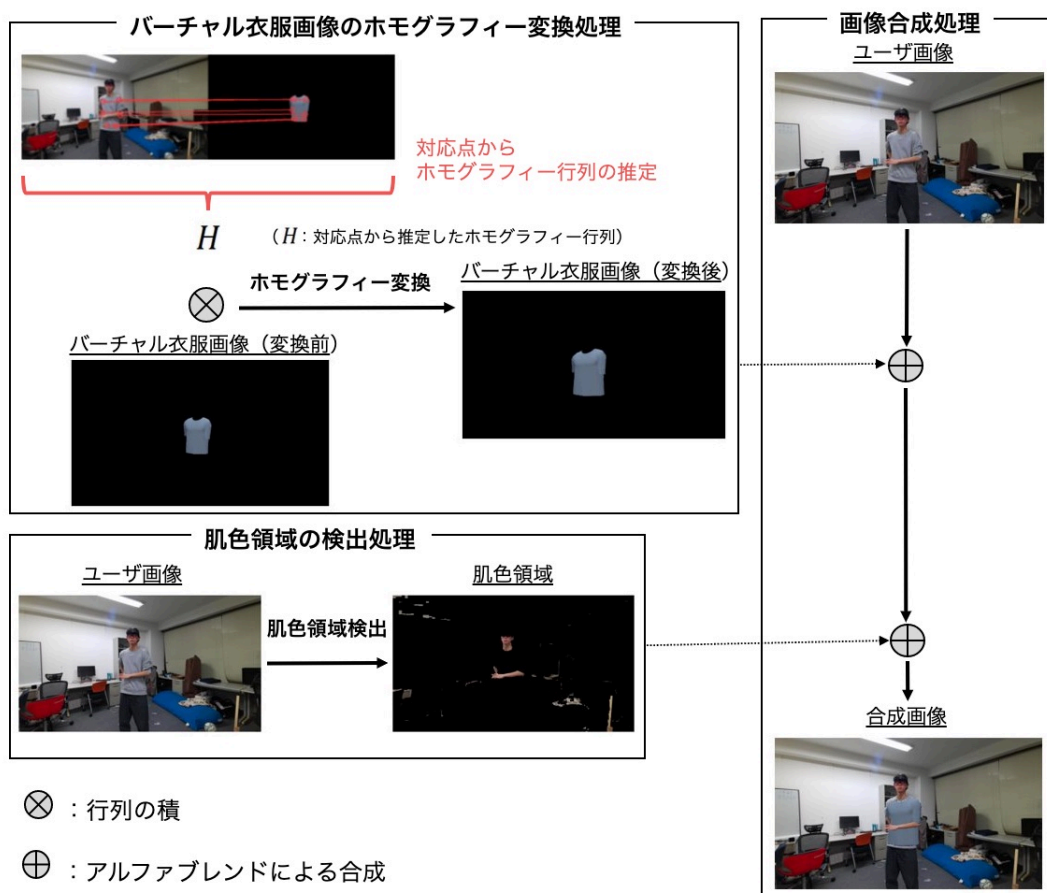


図 3-2 画像合成処理

類されるが、本研究の実装では後者の方法によって合成画像を生成した。提案システムの画像合成処理の概要を、図 3-2 に示す。画像合成処理は、大きく 2 つの処理から構成される。1 つ目は、バーチャル衣服画像をユーザの画像空間の適切な位置に射影する位置合わせ処理である。2 つ目は、ユーザと衣服の正確な前後関係を反映した試着結果を生成するための肌色領域検出処理である。

画像空間において、ユーザ画像とバーチャル衣服画像の位置合わせを行う場合、関節位置情報と輪郭情報が先行研究[5-8]において頻繁に利用されてきた。輪郭情報は、ユーザが Kinect センサに対して正面または背面を向いている場合には、位置合わせのための有効な情報となる。しかし、ユーザに対して垂直軸周りの自由な回転を許容する提案システムでは、ユーザが Kinect センサに対して側面を向く状況が発生するため、輪郭情報は常に有効な情報ではない。したがって、提案システムの実装では、Kinect センサを用いて検出した関節位置情報に基づいて、ユーザ画像とバーチャル衣

服画像の位置合わせを行なった。

3.2.3.1 位置合わせ処理

画像空間上の点 $\mathbf{x} = [x, y]$ は、ホモグラフィーマトリクス H を用いて、別の画像空間上の点 $\mathbf{x}' = [x', y']$ に写像できる。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad \text{すなわち} \quad \tilde{\mathbf{x}}' = H\tilde{\mathbf{x}} \quad (3.1)$$

ただし、 $\tilde{\mathbf{x}}$ および $\tilde{\mathbf{x}}'$ はそれぞれ \mathbf{x} と \mathbf{x}' の同次座標を表す。提案システムの画像合成処理における位置合わせ処理では、このホモグラフィーマトリクスを利用したホモグラフィーマトリクス変換を用いて、バーチャル衣服画像をユーザの画像空間内の適切な位置に射影した。具体的な手順は、まず初めに Unity 内部の処理を通して出力されたユーザ画像とバーチャル衣服画像内の関節位置の対応関係を基に、バーチャル衣服画像をユーザの画像空間へ射影するために必要なホモグラフィーマトリクスの推定を行った。そして、推定されたホモグラフィーマトリクスを用いて、実際にバーチャル衣服画像をユーザの画像空間上へ射影し、ユーザの身体にバーチャル衣服が一致した合成画像を試着結果として生成した。

ホモグラフィーマトリクスの推定は、両肩、両肘、両腰の計 6 点 (図 3-3) の関節位置をユーザ画像とバーチャル衣服画像の間の基本的な対応点として利用し、DLT (Direct Linear Transformation : 直接線形変換) 法によって行った。式(3.1)をホモグラフィーマトリクスの要素 $h_1 \sim h_9$ に関して整理すると、式(3.2)のようになる。

$$\begin{bmatrix} -x & -y & -1 & 0 & 0 & 0 & xx' & yx' & x' \\ 0 & 0 & 0 & -x & -y & -1 & xy' & yy' & y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

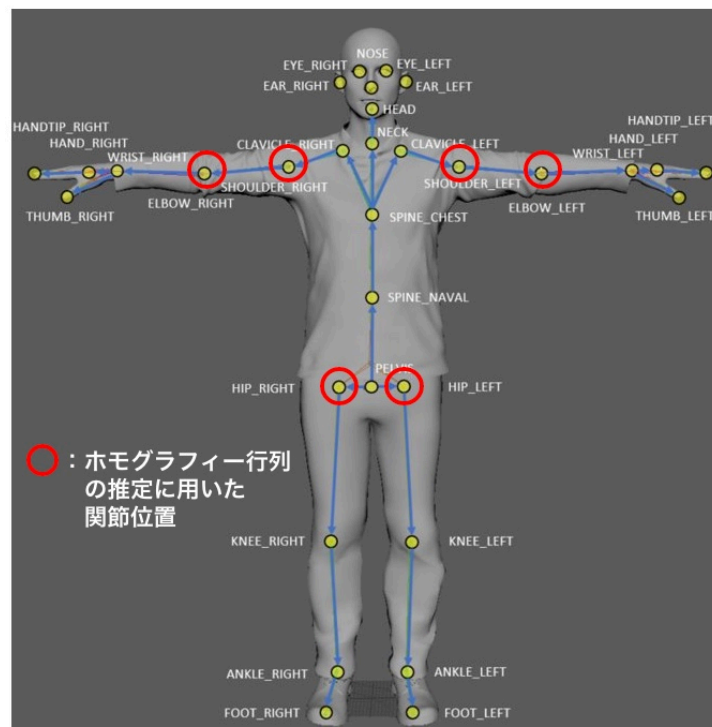


図 3-3 ホモグラフィ行列の推定に用いた関節位置⁴

ユーザとバーチャル衣服の画像上の対応点をそれぞれ $\mathbf{x}'_i = [x'_i, y'_i]$ および $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i]$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) として, この全ての対応点について式(3.2)を考えると,

$$\begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_1 x'_1 & y_1 x'_1 & x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & -1 & x_1 y'_1 & y_1 y'_1 & y'_1 \\ -x_2 & -y_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_2 x'_2 & y_2 x'_2 & x'_2 \\ 0 & 0 & 0 & -x_2 & -y_2 & -1 & x_2 y'_2 & y_2 y'_2 & y'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_6 & -y_6 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_6 x'_6 & y_6 x'_6 & x'_6 \\ 0 & 0 & 0 & -x_6 & -y_6 & -1 & x_6 y'_6 & y_6 y'_6 & y'_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad \text{すなわち} \quad \mathbf{A}\mathbf{h} = \mathbf{0} \tag{3.3}$$

となる. 行列 \mathbf{A} は, 対応点数の 2 倍の行数をもつ行列となる. この行列 \mathbf{A} に対して特異値分解 (Singular Value Decomposition : SVD) を適用することによって, ホモグラフィ行列の要素 $h_1 \sim h_9$ を推定することができる.

4. <https://docs.microsoft.com/ja-jp/azure/kinect-dk/body-joints>

推定したホモグラフィ行列を用いて、式(3.1)のとおりバーチャル衣服の画像を射影変換することによって、ユーザの画像空間内の適切な位置に合った画像を生成することができる。

3.2.3.2 ホモグラフィ行列の推定に利用する対応点の追加

3.2.2.1 において、バーチャル衣服画像をユーザの画像空間上に射影するためのホモグラフィ行列の推定には、ユーザとバーチャル衣服のそれぞれの画像上の両肩、両肘、両腰の関節位置 6 点を基本的な対応点として利用したと述べた。しかし、この関節位置 6 点のみを対応点として用いた場合、ユーザが Kinect センサに対して側面を向いた際に、2つの問題が生じる。1つ目は、ホモグラフィ行列の推定が不安定になり、バーチャル衣服画像が、ユーザの画像空間の領域外に射影されてしまう問題である。2つ目は、バーチャル衣服画像が、ユーザの画像空間内の適切な位置に射影される一方で、形状品質が低下してしまう問題である。これらの問題を解決するために、図 3-4 のように、ユーザとバーチャル衣服の画像内の両肩、両肘、両腰の関節位置 6 点を基に、5 点の対応点を新たに追加した。ユーザとバーチャル衣服の画像上の追加の対応点を、それぞれ $\mathbf{x}'_{a1} = [x'_{a1}, y'_{a1}]$ および $\mathbf{x}_{a1} = [x_{a1}, y_{a1}]$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) として、これらを式(3.3)の行列 A に行方向に積み重ねると、

$$\begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_1x'_1 & y_1x'_1 & x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & -1 & x_1y'_1 & y_1y'_1 & y'_1 \\ -x_2 & -y_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_2x'_2 & y_2x'_2 & x'_2 \\ 0 & 0 & 0 & -x_2 & -y_2 & -1 & x_2y'_2 & y_2y'_2 & y'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_6 & -y_6 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_6x'_6 & y_6x'_6 & x'_6 \\ 0 & 0 & 0 & -x_6 & -y_6 & -1 & x_6y'_6 & y_6y'_6 & y'_6 \\ -x_{a1} & -y_{a1} & -1 & 0 & 0 & 0 & x_{a1}x'_{a1} & y_{a1}x'_{a1} & x'_{a1} \\ 0 & 0 & 0 & -x_{a1} & -y_{a1} & -1 & x_{a1}y'_{a1} & y_{a1}y'_{a1} & y'_{a1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{a5} & -y_{a5} & -1 & 0 & 0 & 0 & x_{a5}x'_{a5} & y_{a5}x'_{a5} & x'_{a5} \\ 0 & 0 & 0 & -x_{a5} & -y_{a5} & -1 & x_{a5}y'_{a5} & y_{a5}y'_{a5} & y'_{a5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix} = \mathbf{0}$$

$$\text{すなわち } \mathbf{Ah} = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

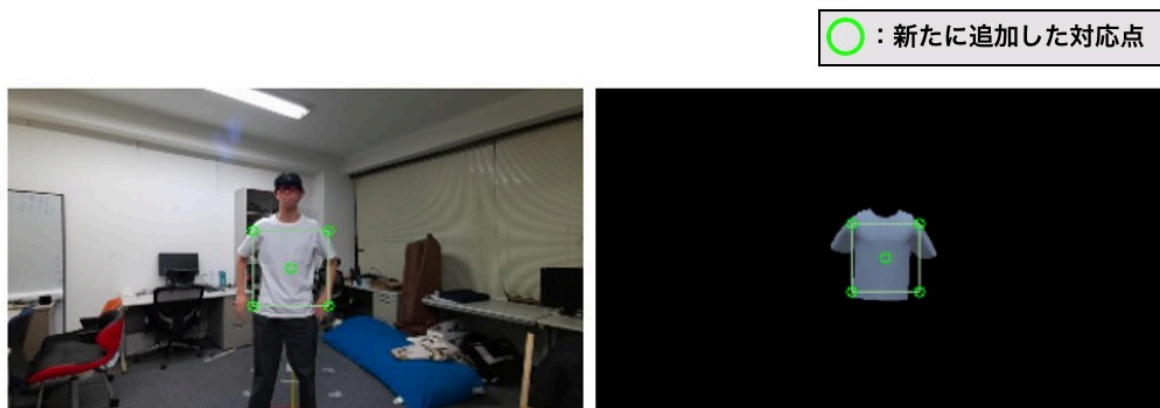


図 3-4 ホモグラフィ行列の推定に用いた追加の対応点

となる. このように, 基本的な関節位置に基づいて作成した追加の対応点を用いると, 上述のユーザが Kinect センサに対して側面を向いた場合に発生する問題は解決される. しかし, 式(3.4)を直接用いてホモグラフィ行列の推定を行なった場合, 追加の対応点が, 関節位置に基づく対応点と同等に取り扱われることになり, ユーザが Kinect センサに対して正面または背面を向いている場合の, 画像合成の精度は低下してしまう. この新たな問題を解決するために, 式(3.5)のように, 式(3.4)の行列 A に対して, 対応点の優先度を表す重み値を要素にもつ対角行列を掛けた.

$$\text{diag}[w, w, \dots, 1, 1]Ah = \mathbf{0} \quad \text{すなわち} \quad wAh = \mathbf{0} \quad (3.5)$$

関節位置に基づく対応点の優先度を表す重み値 w を, 追加の対応点の重み値 1 よりも大きな値に設定することによって, 関節位置に基づく対応点を, 追加の対応点よりも優先的に取り扱うことができる. 以上より, 行列 wA に対して, 特異値分解を適用することによって, ホモグラフィ行列の要素 $h_1 \sim h_9$ を推定することができる.

ユーザが Kinect センサに対して側面を向いた場合に発生する問題の詳細, 原因の考察および対応点の追加による改善結果等については第 4 章で詳しく述べる.

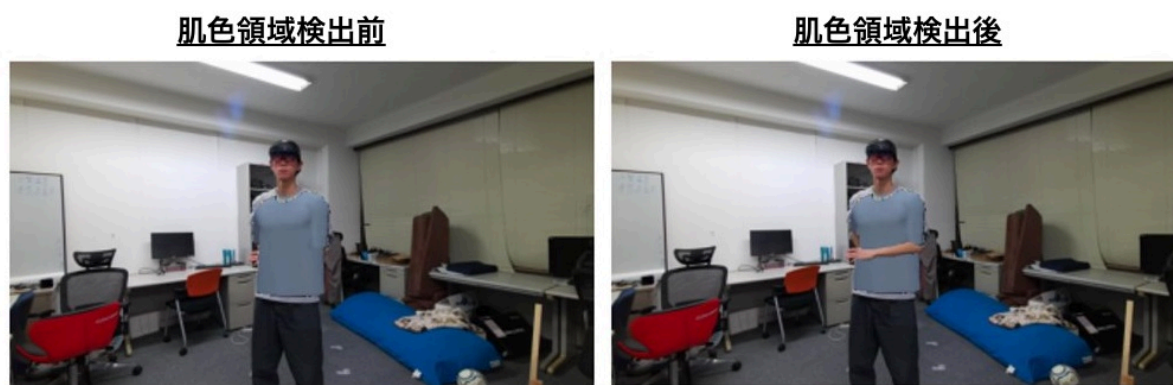


図 3-5 肌色領域検出処理

3.2.3.3 肌色領域検出処理

ユーザが、バーチャル衣服を実際に試着しているような合成画像を、試着結果として生成するためには、ホモグラフィ変換を用いた位置合わせ処理のみでは不十分である。図 3-5 左のように、Kinect センサに向かって、ユーザの身体に交差が発生した場合、バーチャル衣服を試着した際のユーザとバーチャル衣服の前後関係を、正確に反映できていない合成結果が、試着結果として生成されてしまう。この問題を回避するために、バーチャル衣服の画像をユーザの画像空間上に射影したのちに、ユーザの身体の適当な部位を、最前面に表示させる必要がある。本研究では、T シャツを対象とした Virtual Try On システムに焦点を当てた実装を行ったため、ユーザの画像内の肌色領域の検出を行ない、検出領域を最前面に表示した合成画像を試着結果として生成した。

肌色領域の検出は、一般的な RGB の輝度値から構成される画像を、色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Value) から構成される HSV 空間へと変換し、HSV の各要素の下限値と上限値を適切に設定することによって行なった。提案システムの実装では、HSV 色相の各要素の下限値と上限値 (min, max) を色相 (0, 20)、彩度 (30, 150)、明度 (70, 255) に設定した。実際に、肌色領域の検出を行なったのちに、該当領域を最前面に表示した合成画像は図 3-5 右のとおりである。

3.2.4 試着結果の出力インタフェース

Unity 外部の画像合成処理によって、生成された試着結果の画像は、Unity 内部の処理に読み込まれたのち、ユーザに提示される。本研究では、試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムと、実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムのそれぞれにおいて、異なる方法を用いてユーザに試着結果を提示した。

3.2.4.1 試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システム

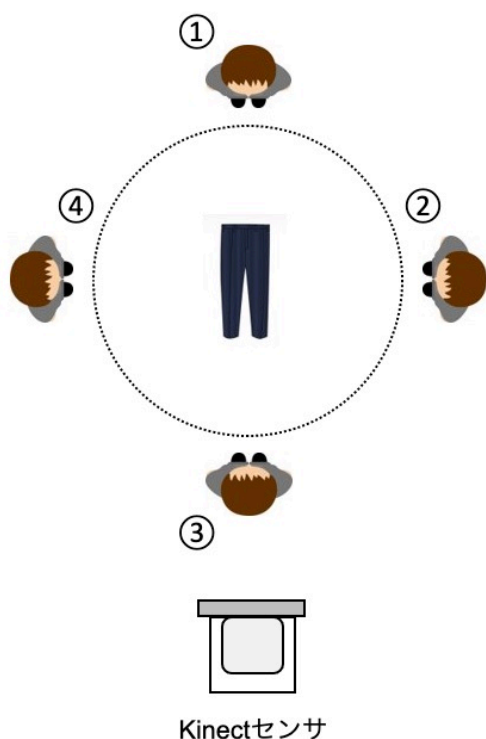
試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムでは、バーチャル衣服の試着結果を映すスクリーンが、少しの遅延を持った状態で、常にユーザの眼前に追従するように、実装を行なった。具体的には、ユーザの頭の前方を向くベクトルと、スクリーンの位置ベクトルのなす角が、ある閾値以上に達した場合に、球面線形補間によって、スクリーンが頭の位置を追従することになる。

3.2.4.2 実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム

実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムでは、ユーザが、実世界に設置されたズボンの周囲を回りながら、バーチャル T シャツと実世界のズボンの着合わせの様子を、360° 方向から確認することができるように、実装を行なった (図 3-6)。このシステムの目的は、衣服着用時の実世界でのイメージを、従来の Virtual Try On システムよりも実際に近い形で、ユーザに提供することである。提案システムの利用を通して、バーチャル T シャツと実際のズボンを着合わせたユーザが、実環境に存在するような視覚情報を、ユーザ自身が客観的に確認することができる。

提案システムの目的を実現するために、出力インタフェースに関して行なった実装は、大きく 2 つである。1 つ目は、ユーザに提示する試着結果を、上半身領域のみに限定する実装である。Kinect センサで撮影したフレームをそのまま利用した場合、背景や下半身等の、実世界のズボンとの着合わせを想定したシステムにとって不必要な情報もユーザに提示されてしまい、着合わせ結果の確認しづらさにつながってしまう。したがって、背景領域と下半身領域の検出および除去をした上で、上

ユーザ, Kinectセンサ, 実世界のズボンの位置関係



ユーザへの提示情報

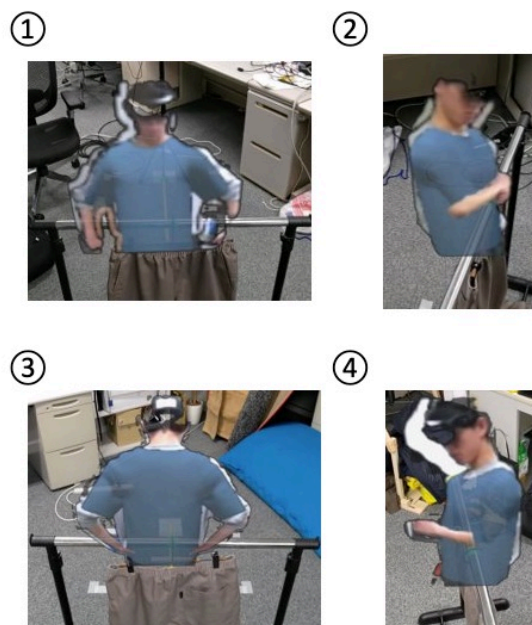


図 3-6 実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム

半身領域のみをユーザに提示する処理が必要である。2つ目は、ユーザが Kinect センサの前で自由に動いた場合に、表示される試着結果の向き、スケール、位置を動的に設定する実装である。Kinect センサで撮影したフレームを、事前に設定した向き、スケール、位置で実世界に配置した場合、ユーザに提示される試着結果は、Kinect センサの前方における、ユーザの動きの影響を受けてしまう。例えば、ユーザが Kinect センサに対して、奥行き方向に移動した場合にはスケールが、横方向に移動した場合には位置が、大きな影響を受ける。この問題を回避するために、ユーザの動きに応じて、提示する試着結果の向き、スケール、位置を動的に調整する処理が必要となる。2つの実装に関して、より具体的な内容を以下で述べる。

ユーザに提示する試着結果を、上半身領域のみに限定するために、Unity 外部での画像合成処理の出力画像形式を png 形式に設定し、透明度を示す α 値を適切に設定した。Unity 内部の処理を通して出力された、人体領域と背景領域から構成される 2



図 3-7 背景除去に利用した 2 値画像



図 3-8 上半身領域のみの試着結果

値画像（図 3-7）を基に，合成画像の背景領域の α 値を 0 に設定した．また，合成画像内のユーザの腰の位置より下の領域の α 値も 0 に設定した．このように生成された合成画像を，Unity 内部の Transparent シェーダーを利用して，ユーザに提示した結果を図 3-8 に示す．

ユーザが，Kinect センサの前方において自由に動いた場合に，表示される試着結果の向き，スケール，位置を動的に設定する実装は，初期化と更新処理から構成される．ここで，Unity 内部の処理においては，試着結果は，平面オブジェクトのテクスチャとして，ユーザへ提示される．そのため，試着結果の向き，スケール，位置の動的な設定とは，実質的に，平面オブジェクトに対する操作であることに言及しておく．また，以下で登場する座標情報は，試着開始時にユーザが装着している，HoloLens の位置を原点とした相対座標であることに，注意が必要である．初期化は，ユーザが Kinect センサの前方 1m の位置に直立した状態で，前方を向くことに

よって完了する．向きの初期化については，ユーザの正面位置に角度を持たせず
に，真っ直ぐ配置する．スケールの初期化については，提示される試着結果の合成
画像内におけるユーザの首と骨盤の距離が，Kinect センサを用いて計測された，ユ
ーザの首と骨盤の実寸距離に一致するように， y 軸方向（垂直方向）の初期スケール
の設定を行なった． x 軸方向（横方向）の初期スケールには， y 軸方向（垂直方向）
の初期スケールと，Kinect センサで撮影した元画像のアスペクト比の積を設定し
た． z 軸方向（奥行き方向）のスケールに関しては，提案システムにおいて，調整の
必要が特にないため，初期化・更新処理を通して，適当な一定値を設定した．スケ
ールの初期値を $\mathbf{S}^{init} = (x_{scale}^{init}, y_{scale}^{init}, z_{scale}^{init})$ ，首と骨盤の画像空間内の初期位置をそ
れぞれ， $\mathbf{J}_{neck2D}^{init} = (x_{neck2D}^{init}, y_{neck2D}^{init})$ ， $\mathbf{J}_{pelvis2D}^{init} = (x_{pelvis2D}^{init}, y_{pelvis2D}^{init})$ ，Kinect センサ
で検出した，首と骨盤の三次元空間内の位置をそれぞれ， $\mathbf{J}_{neck3D}^{init} =$
 $(x_{neck3D}^{init}, y_{neck3D}^{init}, z_{neck3D}^{init})$ ， $\mathbf{J}_{pelvis3D}^{init} = (x_{pelvis3D}^{init}, y_{pelvis3D}^{init}, z_{pelvis3D}^{init})$ ，フレームの縦と
横のサイズ（pixel 数）を H ， W とする．このとき，スケールの初期値 \mathbf{S}^{init} の要素
 x_{scale}^{init} ， y_{scale}^{init} は，次の式(3.6)と式(3.7)に従う．

$$y_{scale}^{init} = \left| \frac{y_{pelvis3D}^{init} - y_{neck3D}^{init}}{y_{pelvis2D}^{init} - y_{neck2D}^{init}} \right| H \quad (3.6)$$

$$x_{scale}^{init} = \frac{W}{H} y_{scale}^{init} \quad (3.7)$$

位置の初期化については，ユーザの前方に設置した実世界のズボンの腰部に，バー
チャル衣服を試着した際の，ユーザの腰部が重なるように実装した．初期位置の x 座
標（横方向の位置）および z 座標（奥行きの位置）に関しては，ユーザの正面前方
1m の位置であることが決まっているため， y 座標の初期化方法のみを説明する．
Kinect センサとズボン腰部の床からの高さを事前に決定した状態で，Kinect センサ
で検出したユーザの両眼の重心位置を用いて，初期位置の y 座標を計算した．初期位
置を $\mathbf{P}^{init} = (x_{position}^{init}, y_{position}^{init}, z_{position}^{init})$ ，Kinect センサで検出した三次元空間内の両
眼の重心位置を $\mathbf{J}_{eye3D}^{init} = (x_{eye3D}^{init}, y_{eye3D}^{init}, z_{eye3D}^{init})$ ，位置 Kinect センサと腰部の床から
の高さをそれぞれ h_{Kinect} ， h_{pants} とする．このとき，初期位置 \mathbf{P}^{init} の要素 $y_{position}^{init}$
は，式(3.8)に従う．

$$y_{position}^{init} = h_{pants} - (h_{Kinect} - y_{eye3D}^{init}) - \left(\frac{y_{pelvis2D}^{init}}{H} - 0.5 \right) y_{scale}^{init} \quad (3.8)$$

更新処理は，ユーザの位置や姿勢に基づいて，毎フレーム動的に実行される．向き
の更新は，毎フレームのユーザの頭の向きに基づいて，試着結果が常にユーザの頭
の向きを向くようにヨー方向（垂直軸周り）の回転角度を調節した．スケールの更
新は，毎フレームの試着結果の画像空間内におけるユーザの首と骨盤の距離と，初
期スケール設定時の，画像空間内におけるユーザの首と骨盤の距離の比を用いた．
あるフレームにおけるスケールを $\mathbf{S} = (x_{scale}, y_{scale}, z_{scale})$ ，試着結果の画像空間内
におけるユーザの首と骨盤の位置をそれぞれ $\mathbf{J}_{neck} = (x_{neck2D}, y_{neck2D}, z_{neck2D})$ ，
 $\mathbf{J}_{pelvis} = (x_{pelvis2D}, y_{pelvis2D}, z_{pelvis2D})$ とする．このとき，スケール \mathbf{S} の要素 x_{scale} ，
 y_{scale} は，次の式(3.9)と式(3.10)に従う．

$$x_{scale} = \frac{|y_{pelvis2D}^{init} - y_{neck2D}^{init}|}{|y_{pelvis2D} - y_{neck2D}|} x_{scale}^{init} \quad (3.9)$$

$$y_{scale} = \frac{|y_{pelvis2D}^{init} - y_{neck2D}^{init}|}{|y_{pelvis2D} - y_{neck2D}|} y_{scale}^{init} \quad (3.10)$$

位置の更新は，毎フレームの試着結果の画像空間内におけるユーザの骨盤の位置，
更新処理内で計算した向き，Kinect で撮影した元画像の縦と横のサイズ (pixel
数)，Kinect センサとズボン腰部の床からの高さ，初期位置設定時に用いた，Kinect
センサで検出した三次元空間内におけるユーザの両目の重心位置を用いた．あるフ
レームにおける位置を $\mathbf{P} = (x_{position}, y_{position}, z_{position})$ ，更新処理内で計算した向
き，つまりヨー方向の回転角度を θ とする．このとき，位置 \mathbf{P} の各要素は，次の式
(3.11)から式(3.13)に従う．

$$x_{position} = x_{position}^{init} - \left(0.5 - \frac{x_{pelvis2D}}{W}\right) x_{scale} \cos \theta \quad (3.11)$$

$$y_{position} = h_{pants} - (h_{Kinect} - y_{eye3D}^{init}) + \left(\frac{y_{pelvis2D}}{H} - 0.5\right) y_{scale} \quad (3.12)$$

$$z_{position} = z_{position}^{init} - \left| \left(0.5 - \frac{x_{pelvis2D}}{W}\right) x_{scale} \sin \theta \right| \quad (3.13)$$

3.3 実際の動作

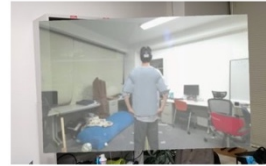
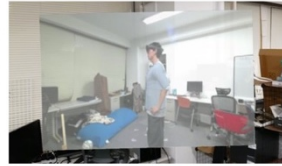
3.3.1 試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システム

試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムでは、前節での説明のとおり、試着結果が常にユーザの眼前に提示されるように動作する。ユーザは、試着結果を確認する際に、特定の位置を向き続ける必要がなく、さまざまな方向からの試着結果を確認することができる。実際の動作の様子を図 3-9 に示す。図 3-9 の左から、ユーザがセンサに対して正面、左、背面、右を向いている場合に、ユーザに対して提示される試着結果である。

3.3.2 実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム

実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムでは、バーチャル T シャツを試着中のユーザの映像を、実世界に設置されたズボンと合わせて確認することができる。実際の動作の様子を、図 3-10 に示す。図 3-10 の左から、ユーザが Kinect センサに対して、近い距離、遠い距離、左側、右側に位置している場合に、ユーザに対して提示される試着結果である。図 3-10 より、ユーザと Kinect センサの位置関係に依存せず、同一スケールで試着中のユーザの上半身が、実世界のズボンの腰部辺りに表示され続けていることがわかる。ユーザがズボンの周囲を回った際の動作の様子は、前項に示した図 3-6 のとおりである。

ユーザへの提示情報



ユーザとKinectセンサの位置関係

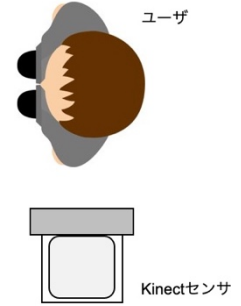
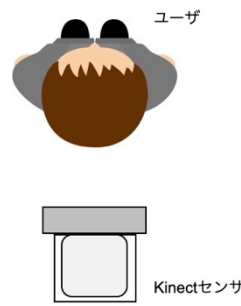
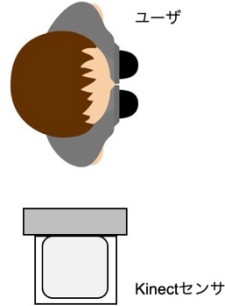
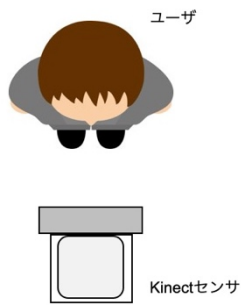
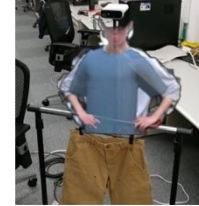


図 3-9 試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムの動作

ユーザへの提示情報



ユーザとKinectセンサの位置関係

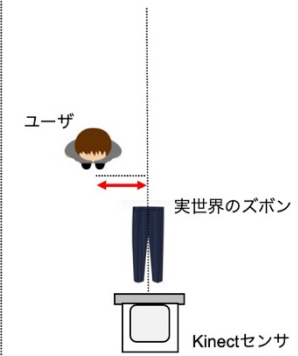
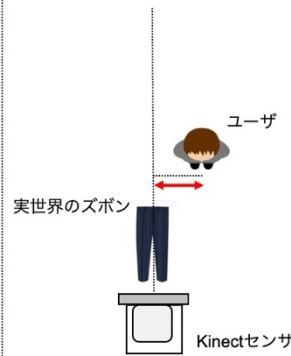
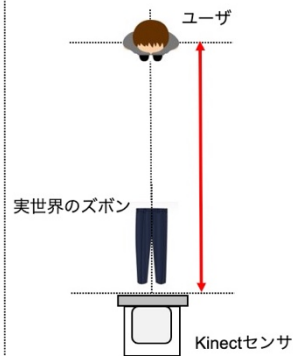
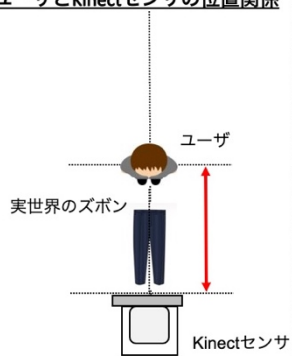


図 3-10 実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムの動作

3.4 衣服モデル生成手法

本研究の一環として、衣服モデルの生成手法に関する検討も行った。バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On システムでは、衣服の 3D モデルが必要となるが、一般的に衣服の 3D モデルの作成は時間を要する作業である。したがって、現状の Virtual Try On システムを用いたバーチャル試着の対象となる衣服は、長時間の事前作業を経て作成された、少数の衣服に限定される場合が多い。そこで、オンライン上の衣服画像を入力として、簡易的に衣服の 3D モデルを作成する手法、とりわけ、衣服の三次元形状を構成する手法について検討した。なお、3D モデル作成の対象とする衣服には、比較的単純な形状をもつ T シャツを選択した。本節では、提案手法の詳細について述べる。提案手法の定性評価およびまとめについては、付録 A に掲載した。また、本章以降で述べる Virtual Try On システムに関するシステム性能評価（第 4 章）およびユーザビリティ評価（第 5 章）においては、本節内で説明する手法を用いずに、既存の手作業に基づいて作成した衣服モデルを用いた。

3.4.1 提案手法

第 2 章において、衣服の 3D モデルの三次元形状を構成するにあたって、衣服のみが写った単視点画像を入力とした手法が、最も簡易的で、適用場面が広い手法であると述べた。Xu ら [36] は、衣服のみが写った単視点画像を用いた衣服の 3D モデル作成手法を提案したが、単視点画像内の衣服の形状変化に対して、衣服の 3D モデルの形状変化は限定的である。これは、単視点画像内の衣服から抽出した特徴点を、衣服の 3D テンプレートモデルの形状変化に利用する際に、制御する頂点が少ないことが原因として考えられる。そこで本研究では、寸法値を入力として、T シャツの 3D モデルの各頂点の三次元座標を出力する線形モデルの構築を検討した。線形モデルを決定づけるパラメータの推定を適切に行うことができれば、オンライン上に存在する T シャツ画像から抽出した寸法値を利用することによって、簡易的に衣服の 3D モデルの三次元形状を構成することができる。

線形モデル構築の大まかな手順について述べる。まず、線形モデルの構築に必要な寸法値とそれに対応する T シャツの 3D モデルから構成されるデータセットを事前に準備する。ここで、データセット内の T シャツの 3D モデルを構成する頂点の

数、面の数、頂点間の連結は統一されている必要がある。次に、データセット内の T シャツの 3D モデルを構成する頂点の座標情報を主成分分析によって圧縮する。最後に、圧縮後の T シャツの 3D モデルの情報と、それぞれに対応する寸法値の情報を用いて、線形モデルのパラメータを推定する。以下で、主成分分析を用いた T シャツの 3D モデルの情報圧縮と線形モデルのパラメータ推定の手順について詳しく述べる。

主成分分析を用いた T シャツの 3D モデルの情報圧縮の手順について説明する。まず、データセット内の T シャツの 3D モデルの頂点情報を基に、行列 A を式 (3.14) のとおり構成する。

$$A = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \cdots \ \mathbf{a}_3]_{3n \times m} \quad (3.14)$$

行列 A の各列 \mathbf{a}_i (以下、頂点座標ベクトル \mathbf{a}_i) は、データセットに含まれる m 個の T シャツモデルのうち、 i 番目の T シャツモデルを構成する n 個の頂点座標を、 x 座標、 y 座標、 z 座標の順に、行方向へと並べた $3n \times 1$ 形状のベクトルである。そして、データセット内の T シャツモデルの各頂点の平均座標ベクトル $\bar{\mathbf{a}}$ (以下、平均座標ベクトル $\bar{\mathbf{a}}$) を式 (3.15) に従って計算する。

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{a}_i \quad (3.15)$$

行列 A の各列の頂点座標ベクトル \mathbf{a}_i から平均座標ベクトル $\bar{\mathbf{a}}$ を差し引いた結果を行列 \bar{A} とし、この行列 \bar{A} を用いて式 (3.16) のように共分散行列 C を計算する。

$$C = \bar{A}(\bar{A})^T \quad (3.16)$$

この共分散行列 C の固有ベクトルを正規化することによって、データセットに含まれる T シャツの 3D モデルの頂点座標の情報を要約した主成分ベクトル $\hat{\mathbf{y}}_j$ (以下、主成分ベクトル $\hat{\mathbf{y}}_j$) を導くことができる。この主成分ベクトル $\hat{\mathbf{y}}_j$ と頂点座標ベクトル \mathbf{a}_i および平均座標ベクトル $\bar{\mathbf{a}}$ を用いて、式 (3.17) の内積計算をすることによって、 $3n \times 1$ 形状の頂点座標ベクトル \mathbf{a}_i は、主成分ベクトルの重みから構成される $k \times 1$ 形状のベ

クトル \mathbf{b}_i (以下, 重みベクトル \mathbf{b}_i) へと圧縮される.

$$\mathbf{b}_i = [\widehat{\mathbf{y}}_1^T \widehat{\mathbf{y}}_2^T \cdots \widehat{\mathbf{y}}_k^T](\mathbf{a}_i - \bar{\mathbf{a}}) \quad (3.17)$$

次に, 圧縮後の T シャツの 3D モデルの情報とそれに対応する寸法値の情報を用いて, 線形モデルの構築, つまり, 線形モデルを決定づけるパラメータの推定を行う手順について説明する. まず, データセットに含まれる T シャツモデルに対応する寸法値情報から構成される行列 L を式(3.18)のとおり構成する.

$$L = [\mathbf{l}_1 \mathbf{l}_2 \cdots \mathbf{l}_m]_{5 \times m} \quad (3.18)$$

行列 L の各列 \mathbf{l}_i (以下, 寸法値ベクトル \mathbf{l}_i) は, データセットに含まれる m 個の T シャツモデルのうち, i 番目の T シャツモデルに対応する寸法値から構成されるベクトルであり, 式(3.19)のように身幅, 肩幅, 袖丈, 袖幅, 襟幅の寸法値を着丈の寸法値を用いて正規化した値を成分にもつ, 5×1 形状のベクトルである.

$$\mathbf{l}_i = \begin{bmatrix} \frac{\text{身幅}}{\text{着丈}} & \frac{\text{肩幅}}{\text{着丈}} & \frac{\text{袖丈}}{\text{着丈}} & \frac{\text{袖幅}}{\text{着丈}} & \frac{\text{襟幅}}{\text{着丈}} \end{bmatrix}^T \quad (3.19)$$

ここで, 重みベクトル \mathbf{b}_i と寸法値ベクトル \mathbf{l}_i を相互に関連づける線形モデルのパラメータとして, 行列 R と残差ベクトル $\boldsymbol{\mu}$ をデータセットの情報を基に, 最小二乗法によって推定する. その結果, 重みベクトル \mathbf{b}_i と寸法値ベクトル \mathbf{l}_i の間には, 式(3.20)のとおり線形の関係が成り立つ.

$$R\mathbf{b}_i + \boldsymbol{\mu} = \mathbf{l}_i \quad (3.20)$$

式(3.20)の線形モデルを利用することによって, データセット外のオンライン上の T シャツ画像等に基づいた新たな寸法値ベクトル \mathbf{l}_{new} を入力として, 新たな T シャツの 3D モデルの重みベクトル \mathbf{b}_{new} を式(3.21)に従って求めることができる.

$$\mathbf{b}_{new} = (R^T R)^{-1} R^T (\mathbf{l}_{new} - \boldsymbol{\mu}) \quad (3.21)$$

新たな T シャツの 3D モデルの重みベクトル \mathbf{b}_{new} が得られた場合，式(3.22)に従って，主成分ベクトル $\widehat{\mathbf{y}}_j$ と平均座標ベクトル $\bar{\mathbf{a}}$ から新たな T シャツの 3D モデルの頂点座標を計算することができる。

$$\mathbf{a}_{new} = [\widehat{\mathbf{y}}_1 \ \widehat{\mathbf{y}}_2 \ \cdots \ \widehat{\mathbf{y}}_k] \mathbf{b}_{new} + \bar{\mathbf{a}} \quad (3.22)$$

第4章 システム性能評価

本章では、画像合成処理のなかで、バーチャル衣服画像とユーザ画像の位置合わせの際に発生する問題の概要説明、問題改善前の動作検証、問題改善後の動作検証について述べる。

4.1 概要

提案システムの核となる処理の1つが、試着結果の画像合成処理である。提案システムの実装では、前章で述べたとおり、ホモグラフィ変換を用いて、バーチャル衣服画像がユーザの画像上に位置合わせされた試着結果の画像を生成した。このとき、ホモグラフィ行列の推定には、ユーザとバーチャル衣服それぞれの、両肩、両肘、両腰の関節位置6点を基本的な対応点として利用した。しかし、これらの関節位置のみを対応点として利用した場合、2つの問題が発生する。1つ目は、Kinect センサに対してユーザが側面を向いた際に、ホモグラフィ行列の推定が不安定になるという問題である(図4-1左)。ホモグラフィ行列の推定が不安定になった場合、バーチャル衣服画像は、ホモグラフィ変換によって、対象とするユーザ画像の領域外にも射影されてしまい、形状の品質低下が顕著になる。2つ目は、1つ目の問題発生時と同様に、Kinect センサに対してユーザが側面を向いた際に、射影変換されたバーチャル衣服画像の形状品質が低下する問題である(図4-1右)。1つ目の問題と比較して、バーチャル衣服画像は、ユーザ画像領域内の適切な位置に射影されているが、形状の品質低下に関しては、改善の余地がある。2つの問題はともに、ユーザが Kinect センサに対して側面を向いた際に、頻繁に発生することが、事前の観察から定性的に理解できた。そこで、検証実験を通して、問題が発生する原因を定量的に理解し、問題を回避するための改善策を講じることを試みた。ただし、形状の品質低下の問題に関しては、エラーの判断基準として利用する、定量的な指標を定義することが困難であったため、主に1つ目の問題が発生する原因の理解および解決に努めた。本章後半の検証結果において、2つ目の問題の改善についても言及する。

問題① ユーザ画像領域外への射影



問題② 形状品質の低下



図 4-1 問題が発生した際の試着結果



図 4-2 実験環境

4.2 改善前の動作検証

前節で説明した、1つ目の問題の原因究明を目的として、ホモグラフィー行列の推定に、関節位置のみを用いた場合の動作検証実験を行なった。

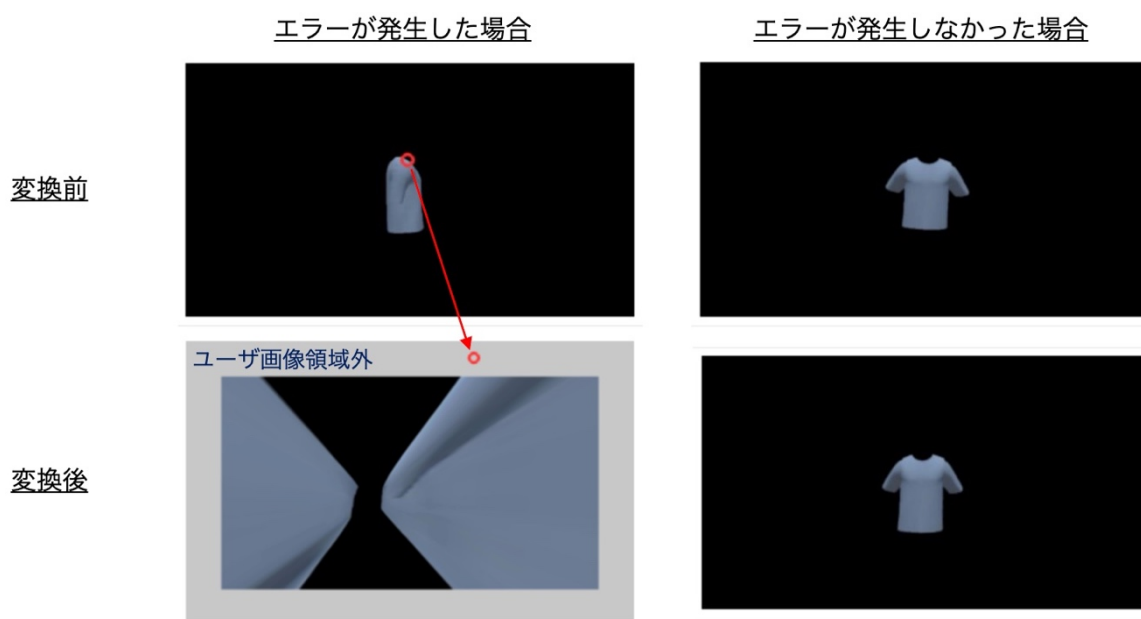


図 4-3 エラーの定義

4.2.1 実験設定

Kinect センサから、約 1.5m 離れた位置に設置した目印 (図 4-2) の上で、1 分間のバーチャル試着を 3 試行実施した。その際、約 15 秒ごとに、Kinect センサに対する身体の向きを、右、正面、左、背面の順に変更した。

4.2.2 実験結果

まず、実験結果に関する説明の前に、以下で利用するエラーの定義について説明する。前節で述べたとおり、1 つ目の問題が発生した場合、推定されたホモグラフィ行列を用いた射影変換後のバーチャル衣服は、対象とするユーザの画像領域から大きく外れてしまう。よって、バーチャル衣服の元画像の衣服領域に該当する全 pixel のなかで、射影変換先の位置が、ユーザの画像空間の外部の領域となった pixel が、1pixel 以上存在するフレームを、エラーとして定義する。この定義に従って、エラーが発生した場合と、エラーが発生しなかった場合のイメージを、図 4-3 に示す。

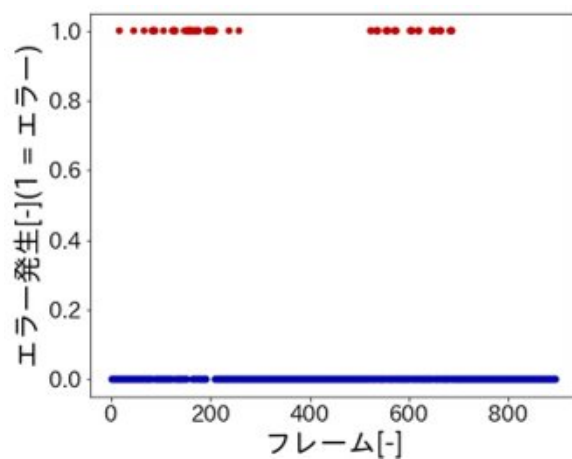
3 試行のバーチャル試着を実施した際の、フレーム推移とエラー発生の結果を、図 4-4 に示す。図 4-4 の(a)から(c)は順に、1 試行目、2 試行目、3 試行目の結果を示す。また、横軸は経過フレームを示し、縦軸に関しては、エラー発生した場合を 1 (赤い

プロット), エラーが発生しなかった場合を 0 (青いプロット) として示した. 各試行の全フレームに対するエラー発生フレームの割合は, 約 10.6%, 約 12.5%, 約 13.0% であった.

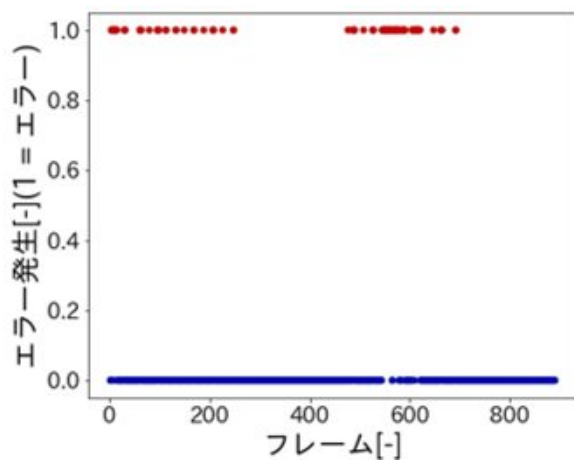
3 試行のバーチャル試着を実施した際の, フレーム推移と対応点として用いた関節位置のばらつき (標準偏差) の結果を, 図 4-5 から図 4-7 に示す. 各図において, (a) は, フレーム推移とユーザの関節位置の x 軸方向のばらつき, (b)は, フレーム推移とユーザの関節位置の y 軸方向のばらつきに関する結果である. また, (c)は, フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつき, (d)は, フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置の y 軸方向のばらつきに関する結果である. 横軸は経過フレームを示し, 縦軸はホモグラフィック行列の推定に利用した, 関節位置のばらつき (標準偏差) を示す. ばらつきを表す標準偏差は, 各関節位置を, それぞれの画像の x 軸または y 軸方向の解像度によって, 正規化したのちに計算した. また, エラーが発生した場合のプロットを赤色, エラーが発生しなかった場合のプロットを青色で表示した.

4.2.3 考察

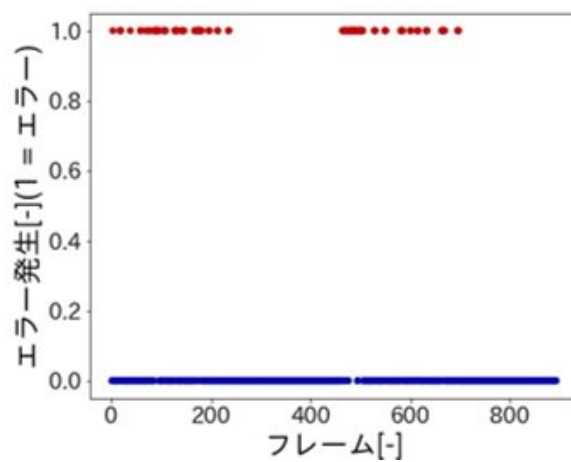
実験結果を基に, 考察を行う. まず, 図 4-4 を確認すると, フレーム全体の前から 1/4 の領域と 4/3 の領域において, 集中的にエラーが発生していることが読み取れる. これは, 1 分間のバーチャル試着の中で, ユーザが Kinect センサに向かって, 右または左を向いている場合に該当する. したがって, 定性的な事前の認識と同様に, 対象としている問題は, ユーザが Kinect センサに対して, 側面を向いている場合に頻繁に発生することが確認できた. 図 4-5 から図 4-7 の(a)と(c)を確認すると, ユーザが Kinect センサに対して, 側面を向いている場合のなかでも特に, 対応点として用いたユーザとバーチャル衣服の関節位置の, x 軸方向のばらつきが小さくなった場合に, エラーが集中している様子が読み取れる. 一方で, 図 4-5 から図 4-7 の(b)と(d)を確認すると, ユーザとバーチャル衣服の関節位置の y 軸方向のばらつきとエラー発生の間には, x 軸方向のような傾向は確認できない. 以上より, ユーザが Kinect センサに対して, 側面を向いた場合に, 関節位置に基づいたホモグラフィック行列の推定が, 不安定になる問題の直接的な原因として, 対応点として用いた関節位置の, x 軸方向のばらつきが小さくなることが考えられる.



(a)



(b)



(c)

図 4-4 フレーム推移とエラーの発生についての結果：(a)1 試行目；(b)2 試行目；
(c) 3 試行目

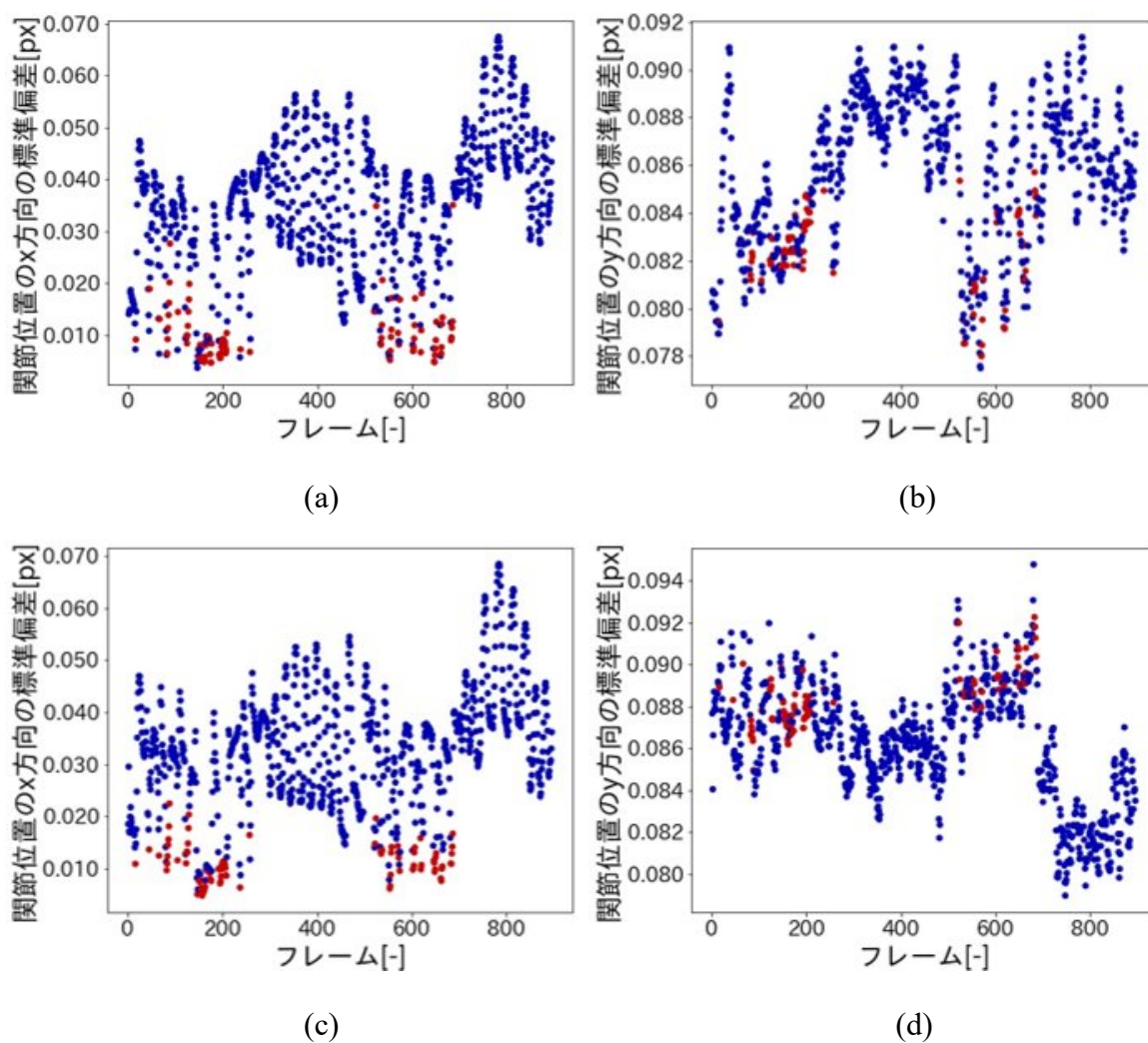


図 4-5 フレーム推移と関節位置のばらつきについての結果 (1 試行目) : (a)フレーム推移とユーザの関節位置のx軸方向のばらつき ; (b)フレーム推移とユーザの関節位置のy軸方向のばらつき ; (c)フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置のx軸方向のばらつき ; (d)フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置のy軸方向のばらつき

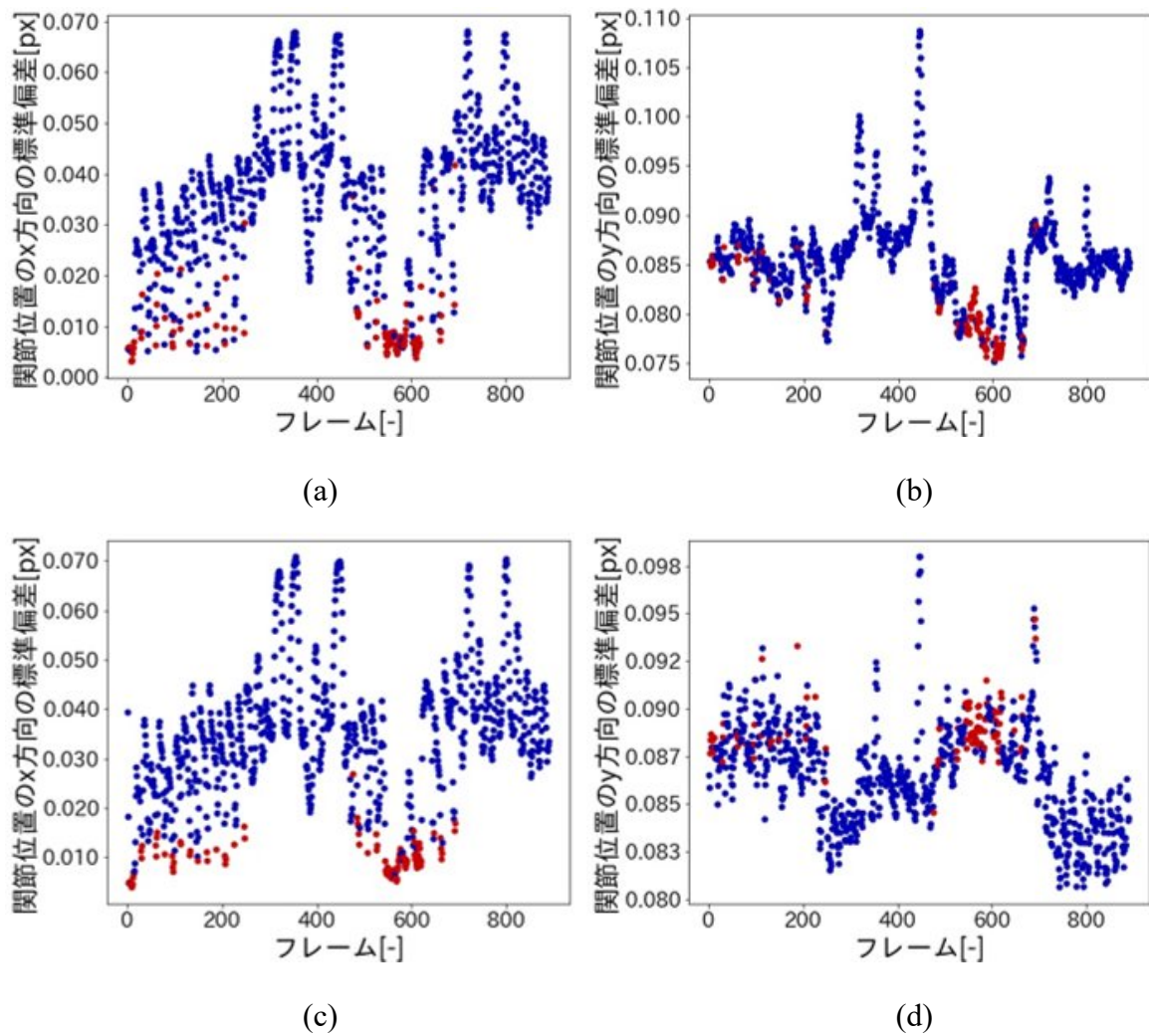


図 4-6 フレーム推移と関節位置のばらつきについての結果 (2 試行目) : (a)フレーム推移とユーザの関節位置の x 軸方向のばらつき ; (b)フレーム推移とユーザの関節位置の y 軸方向のばらつき ; (c)フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつき ; (d)フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置の y 軸方向のばらつき

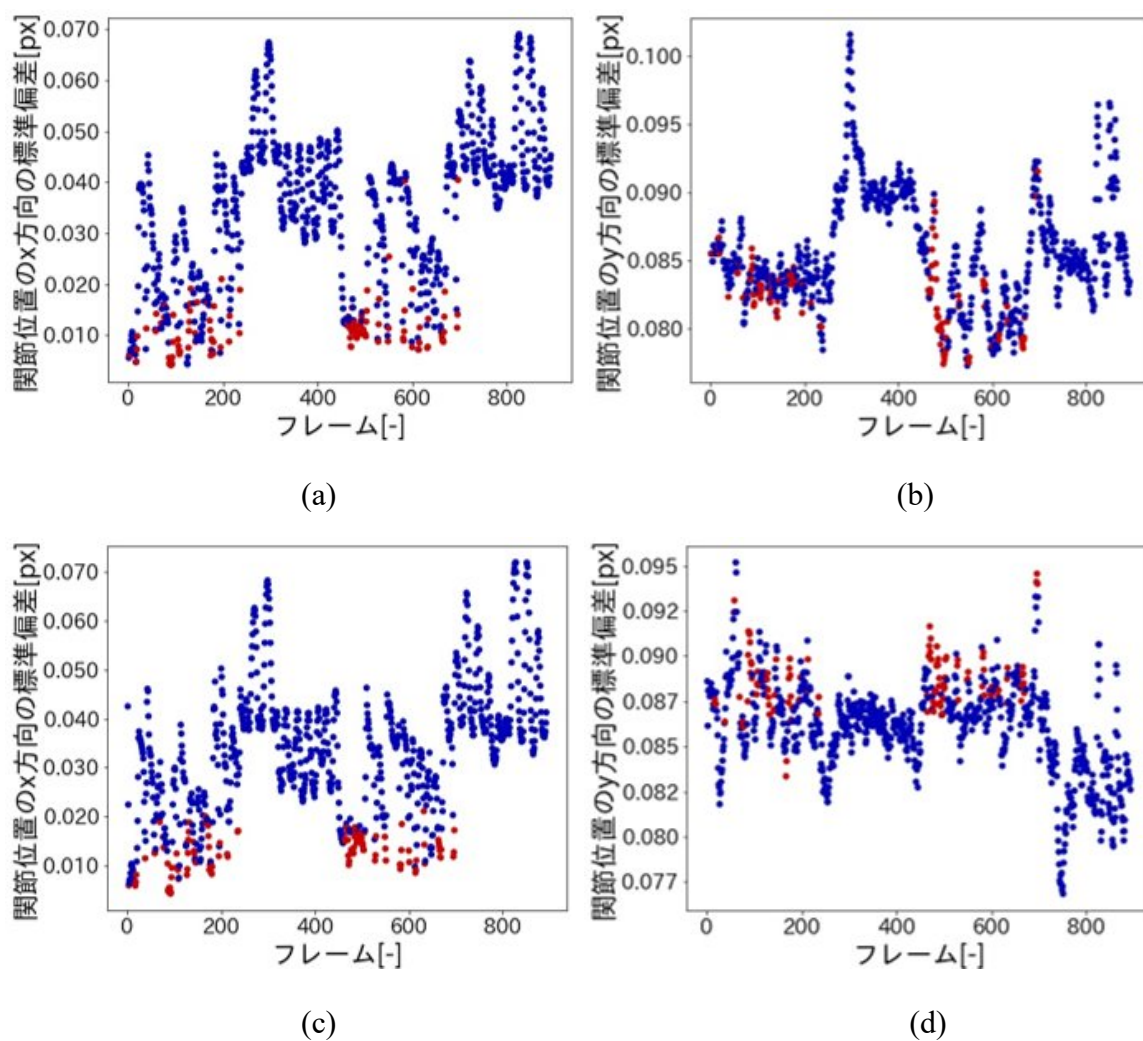


図 4-7 フレーム推移と関節位置のばらつきについての結果 (3 試行目) : (a)フレーム推移とユーザの関節位置の x 軸方向のばらつき ; (b)フレーム推移とユーザの関節位置の y 軸方向のばらつき ; (c)フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつき ; (d)フレーム推移とバーチャル衣服の関節位置の y 軸方向のばらつき

4.3 改善後の動作検証

動作検証実験の結果と考察を踏まえて、対象としている問題の発生を回避するための改善を行ない、再び動作検証を行なった。

4.3.1 改善方法

前節より、対象とする問題を解決するためには、Kinect センサに対して、ユーザが側面を向いた場合に、ホモグラフィ行列の推定に利用する、対応点の x 軸方向のばらつきが、極端に小さくなる状況を避ける必要がある。最も簡単な方法の 1 つとして、ホモグラフィ行列の推定に利用する、新たな対応点を追加することが考えられる。ただし、両肩、両肘、両腰の関節位置に限らず、ユーザの身体上の全ての関節位置は、Kinect センサに対して、ユーザが側面を向いた場合に、 x 軸方向の狭い範囲に集中してしまう。したがって、両肩、両肘、両腰以外の関節位置を、新たな対応点として直接用いることは、問題の根本解決にはつながらない。そこで、身体上の関節位置を基に、身体領域の外部に、新たな対応点を作ること考える。バーチャル衣服が、ユーザの身体部位に重なることを目標とした場合、それぞれの画像内で検出された関節位置の、 y 座標の最大値と最小値の間の距離は、2 つの画像間で、一致していることが望ましい。つまり、身体上の関節位置を基に計算した、 y 座標の最大値と最小値の間の距離は、ユーザとバーチャル衣服画像の間の、参照長さとして利用することができる。そこで、図 4-8 のように、 y 軸方向の参照長さを一辺とする、四角形の頂点と四角形の対角線の交点の計 5 点を、新たな対応点として用いた。ユーザとバーチャル衣服の間で、新たに追加された、対応点を頂点に有する四角形は、ユーザとバーチャル衣服の縦横の比が同等であると仮定した場合、2 つの画像間で一致することになる。これらの対応点を追加することによって、Kinect センサに対して、ユーザが側面を向いた場合であっても、ホモグラフィ行列の推定に用いる対応点がある一定以上の x 軸方向のばらつきをもつことが保証されるため、対象とする問題の解決につながることを期待される。

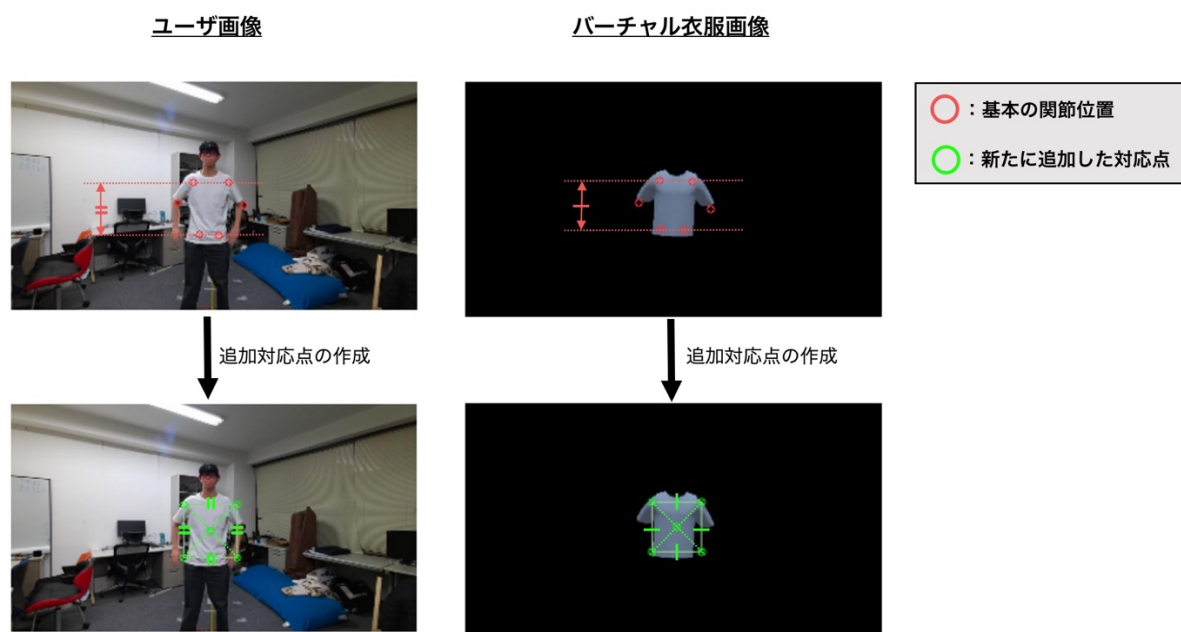


図 4-8 新たに追加した対応点

4.3.2 検証結果

改善前の動作検証実験で取得したデータを利用し、関節位置を基に配置した対応点を新たに追加した場合に、対象とする問題の発生を抑制することができるか、検証を行なった。

3 試行のバーチャル試着を実施した際の、フレーム推移とエラー発生の結果を、図 4-9 に示す。図 4-9 の(a)から(c)は順に、1 試行目、2 試行目、3 試行目の結果を示す。また、横軸は経過フレームを示し、縦軸に関しては、エラーが発生した場合を 1 (赤いプロット)、エラーが発生しなかった場合を 0 (青いプロット) として示した。全試行を通して、全フレームに対するエラー発生フレームの割合は、0%であった。

3 試行のバーチャル試着を実施した際の、フレーム推移と対応点のばらつき (標準偏差) の結果について、対応点追加前後の結果を、同一の図にプロットしたものを図 4-10 から図 4-12 に示す。各図において、(a)は、フレーム推移とユーザ画像上の対応点の x 軸方向のばらつき、(b)は、フレーム推移とユーザ画像上の対応点の y 軸方向のばらつきに関する結果である。また、(c)は、フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点の x 軸方向のばらつき、(d)は、フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点の y 軸方向のばらつきに関する結果である。横軸は経過フレームを示し、縦軸は、

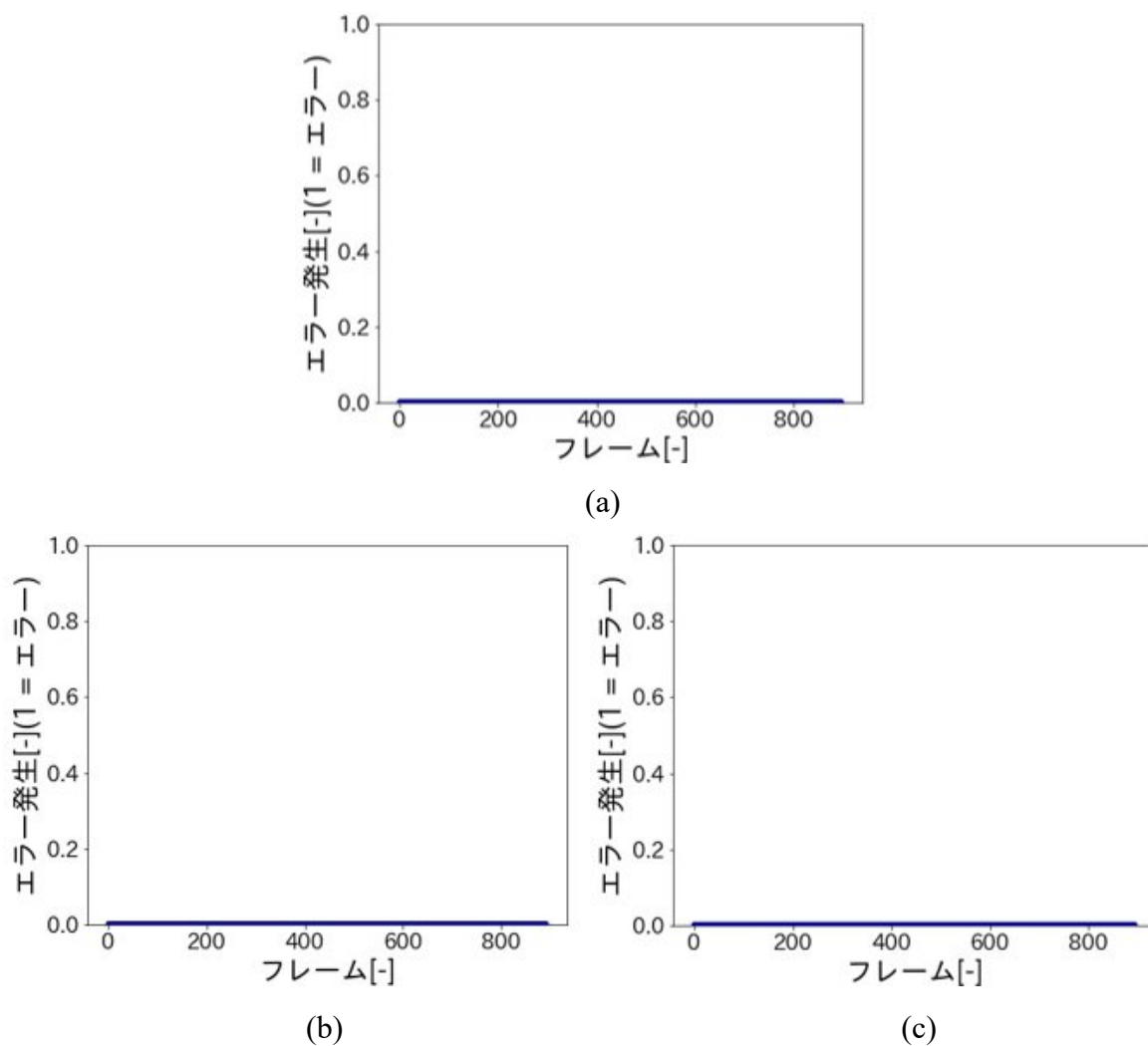


図 4-9 フレーム推移とエラーの発生についての結果：(a)1 試行目；(b)2 試行目；
(c) 3 試行目

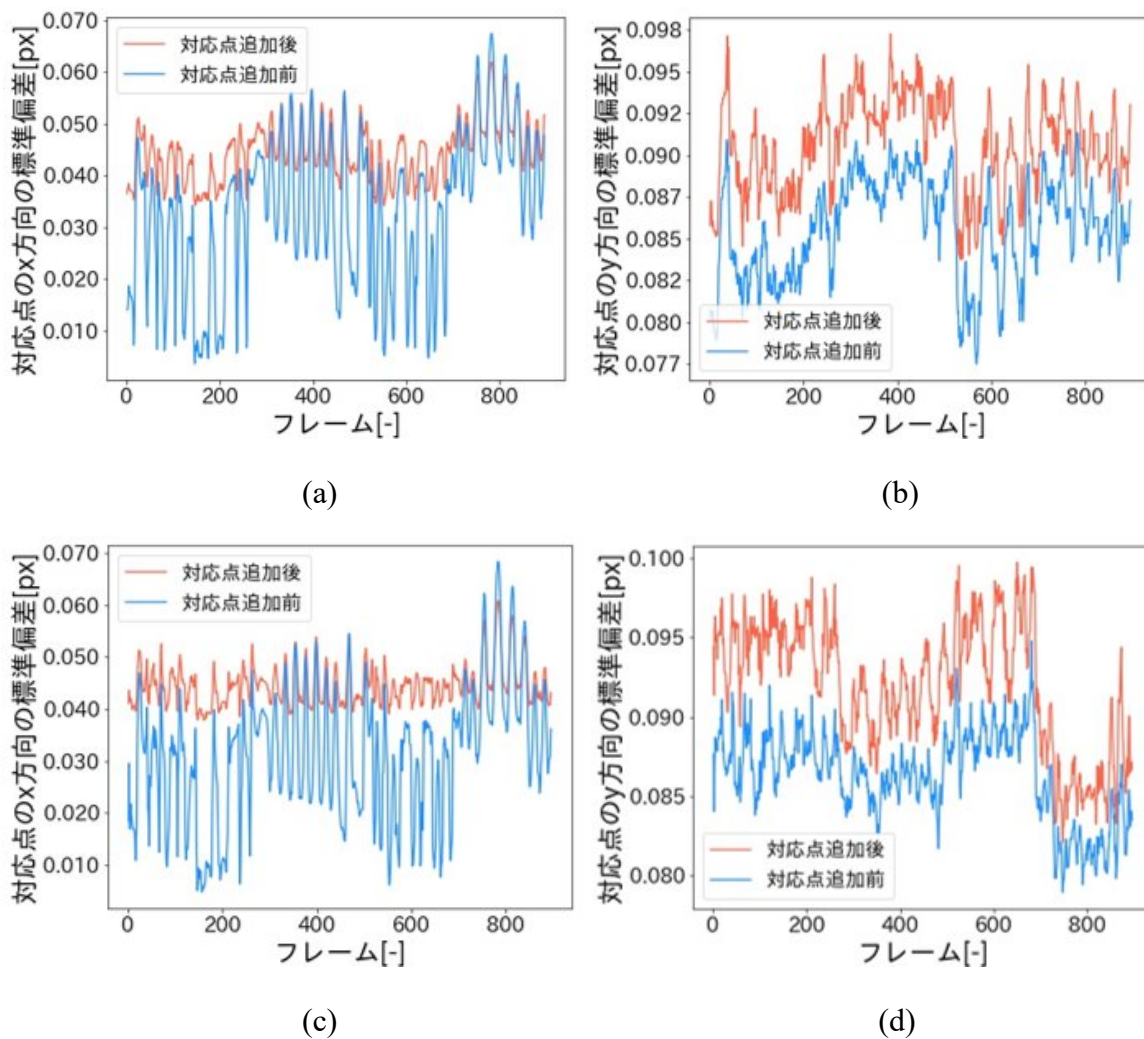


図 4-10 フレーム推移と対応点のばらつきについての結果 (1 試行目) : (a)フレーム推移とユーザ画像上の対応点のx軸方向のばらつき ; (b)フレーム推移とユーザ画像上の対応点のy軸方向のばらつき ; (c)フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点のx軸方向のばらつき ; (d)フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点のy軸方向のばらつき

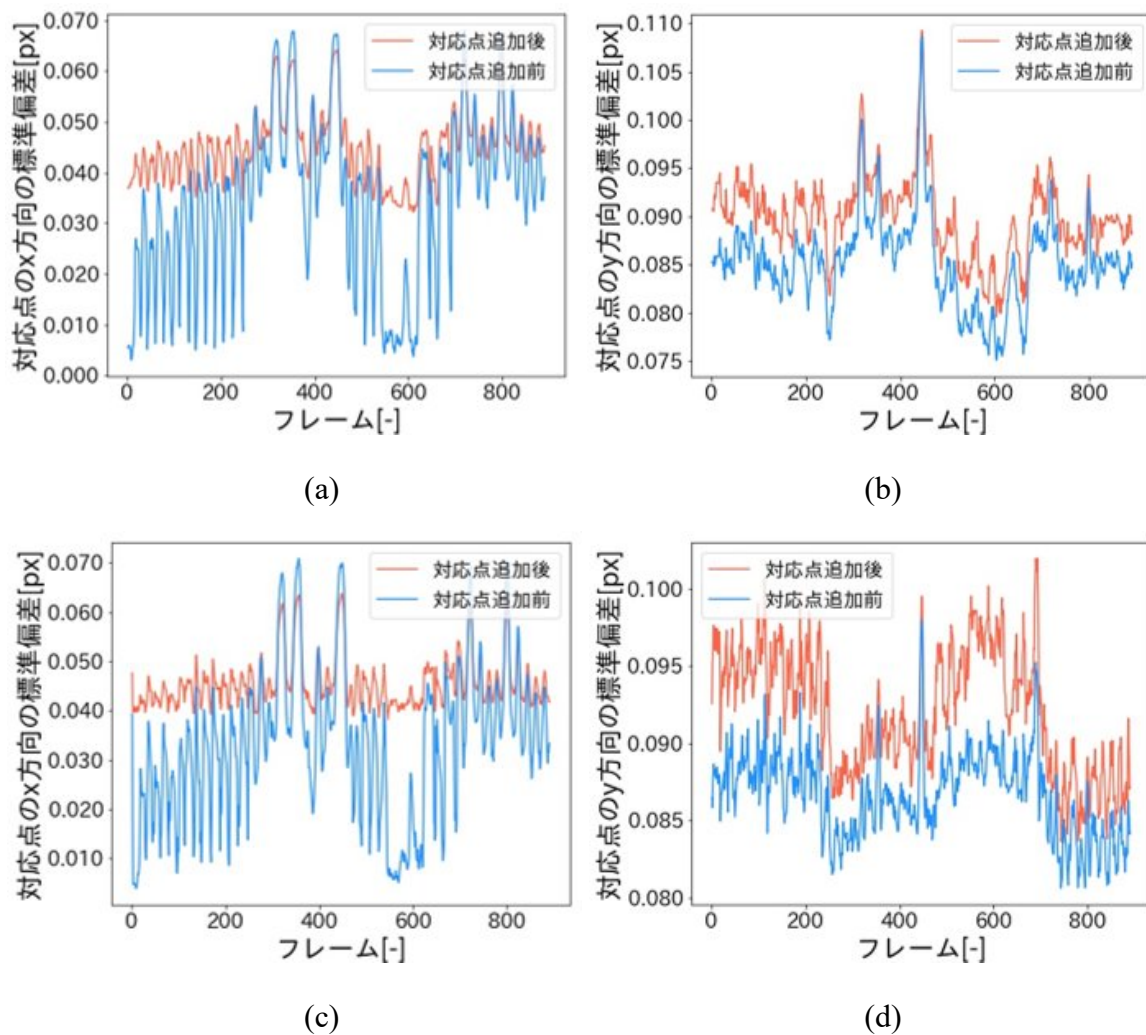


図 4-11 フレーム推移と対応点のばらつきについての結果 (2 試行目) : (a)フレーム推移とユーザ画像上の対応点のx軸方向のばらつき ; (b)フレーム推移とユーザ画像上の対応点のy軸方向のばらつき ; (c)フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点のx軸方向のばらつき ; (d)フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点のy軸方向のばらつき

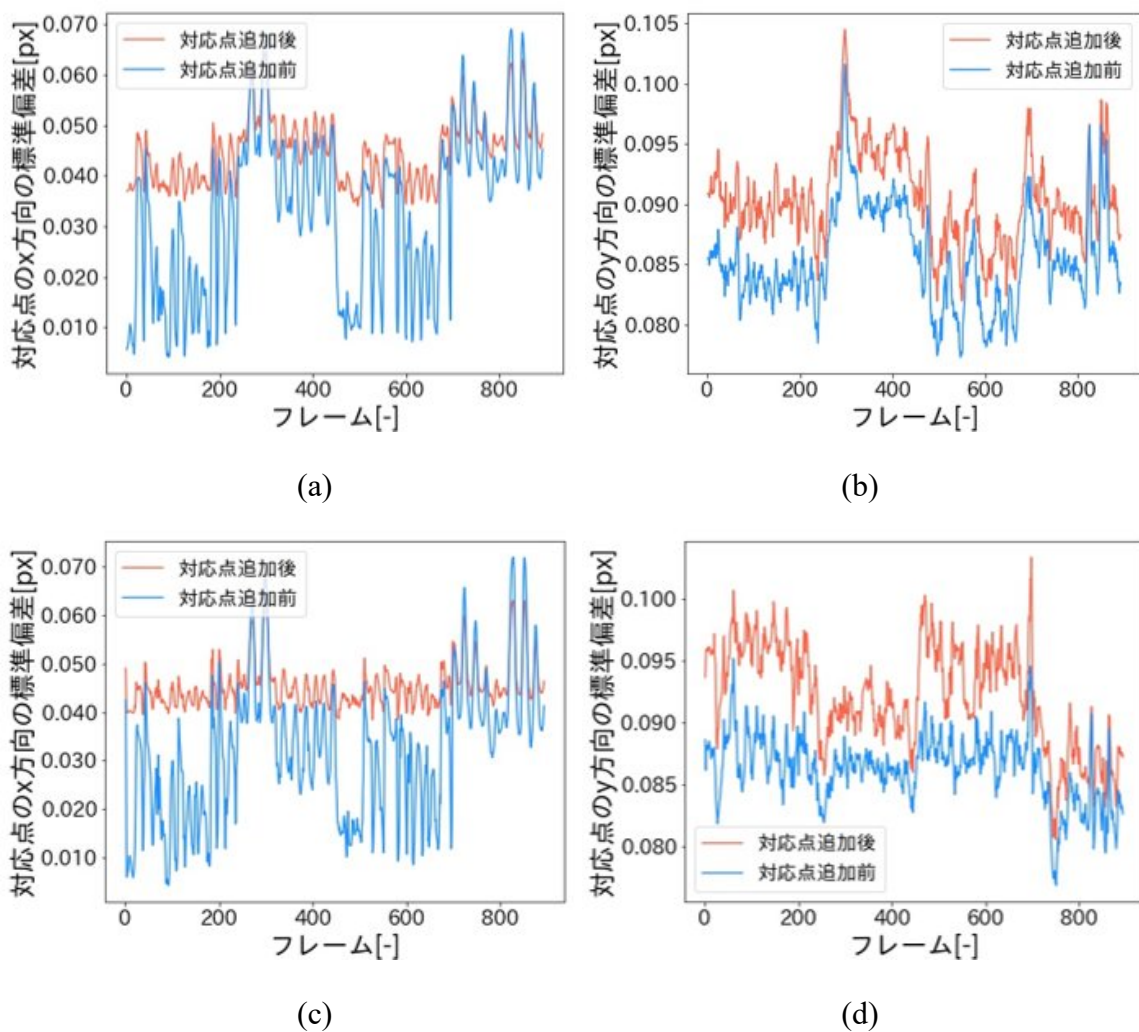


図 4-12 フレーム推移と対応点のばらつきについての結果 (3 試行目) : (a)フレーム推移とユーザ画像上の対応点のx軸方向のばらつき ; (b)フレーム推移とユーザ画像上の対応点のy軸方向のばらつき ; (c)フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点のx軸方向のばらつき ; (d)フレーム推移とバーチャル衣服画像上の対応点のy軸方向のばらつき

ホモグラフィ行列の推定に利用した対応点のばらつき（標準偏差）を示す。また、エラーが発生した場合には、赤色でプロット、エラーが発生しなかった場合には、青色でプロットを表示した。

本章冒頭において、2つ目の問題として述べた、形状品質低下の問題の改善結果についても、ここで説明する。まず始めに、形状品質の評価指標として用いた、Hu モーメント不変量[37-40]について説明する。Hu モーメント不変量は、画像内のある形状に対して定義される、7つの値から構成される不変量であり、平行移動、スケール変化、回転移動の影響を受けない。したがって、合同や相似に近い形状の場合、近い値が Hu モーメント不変量として定義されるため、形状の類似度について、定量的な評価を行うことができる。例えば、画像内に写った2つの形状について、それぞれの Hu モーメント不変量を定義し、7つの対応する値同士の差分の絶対値の和を計算することによって、2つの形状の類似度を数値化することができる。前述したとおり、近い形状には、近い値が Hu モーメント不変量として定義されるため、計算した類似度が0に近いほど、2つの形状の類似度は大きいものとして、評価することができる。今回は、Unity 内部の処理から出力された直後の、ホモグラフィ変換前のバーチャル衣服画像を、参照画像に設定した。そして、対応点追加前後の、ホモグラフィ変換後のバーチャル衣服画像と参照画像の間の類似度を、Hu モーメント不変量に基づいて計算した。実際に、バーチャル試着中のあるフレームに関して、対応点追加前後の、ホモグラフィ変換後のバーチャル衣服画像と参照画像の間の類似度を、Hu モーメント不変量に基づいて計算したものを、図 4-13 に示す。対応点追加前の、ホモグラフィ変換後のバーチャル衣服画像の形状は、参照画像内のバーチャル衣服画像の形状と比較すると、差が顕著であり、類似度も大きな値として評価されている。一方で、対応点追加後の、ホモグラフィ変換後のバーチャル衣服画像の形状は、参照画像内のバーチャル衣服画像の形状と類似しており、類似度も小さな値として評価されている。

3 試行のバーチャル試着を実施した際の、フレーム推移と Hu モーメント不変量に基づいた類似度の差の結果を、図 4-14 に示す。図 4-14 の(a)から(c)は順に、1 試行目、2 試行目、3 試行目の結果を示す。横軸は、経過フレームを示し、縦軸は、対応点追加前のホモグラフィ変換後のバーチャル衣服画像と、参照画像の類似度から、対応点追加後のホモグラフィ変換後のバーチャル衣服画像と、参照画像の類似度を引いた値を示す。Hu モーメント不変量に基づいた類似度の差が正の場合、すなわち、

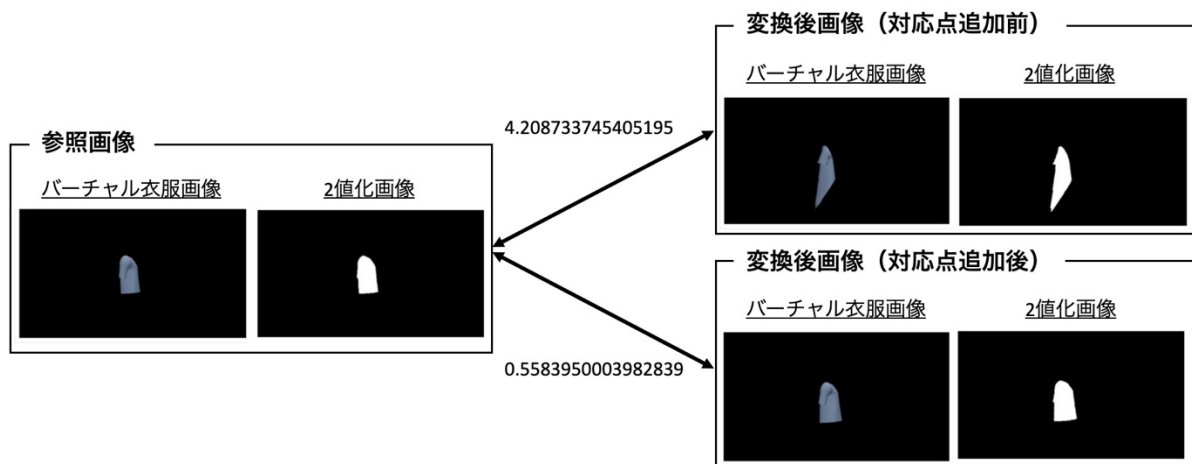


図 4-13 Hu モーメント不変量に基づく類似度についての具体例

対応点追加前の方が、参照画像との間に形状の類似度の差がある場合は、赤いプロットで示し、負の場合、すなわち、対応点追加後の方が、参照画像との間に形状の類似度の差がある場合は、青いプロットで示した。

3 試行のバーチャル試着を実施した際の、関節位置の x 軸方向のばらつきと Hu モーメント不変量に基づいた類似度の差の結果を、図 4-15 から図 4-17 に示す。各図において、(a)は、ユーザの関節位置の x 軸方向のばらつきと Hu モーメント不変量に基づいた類似度の差、(b)は、バーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつきと Hu モーメント不変量に基づいた類似度の差に関する結果である。横軸は、関節位置の x 軸方向のばらつき（標準偏差）を示し、縦軸およびプロットの色割り当ては、図 4-14 の縦軸と同様である。

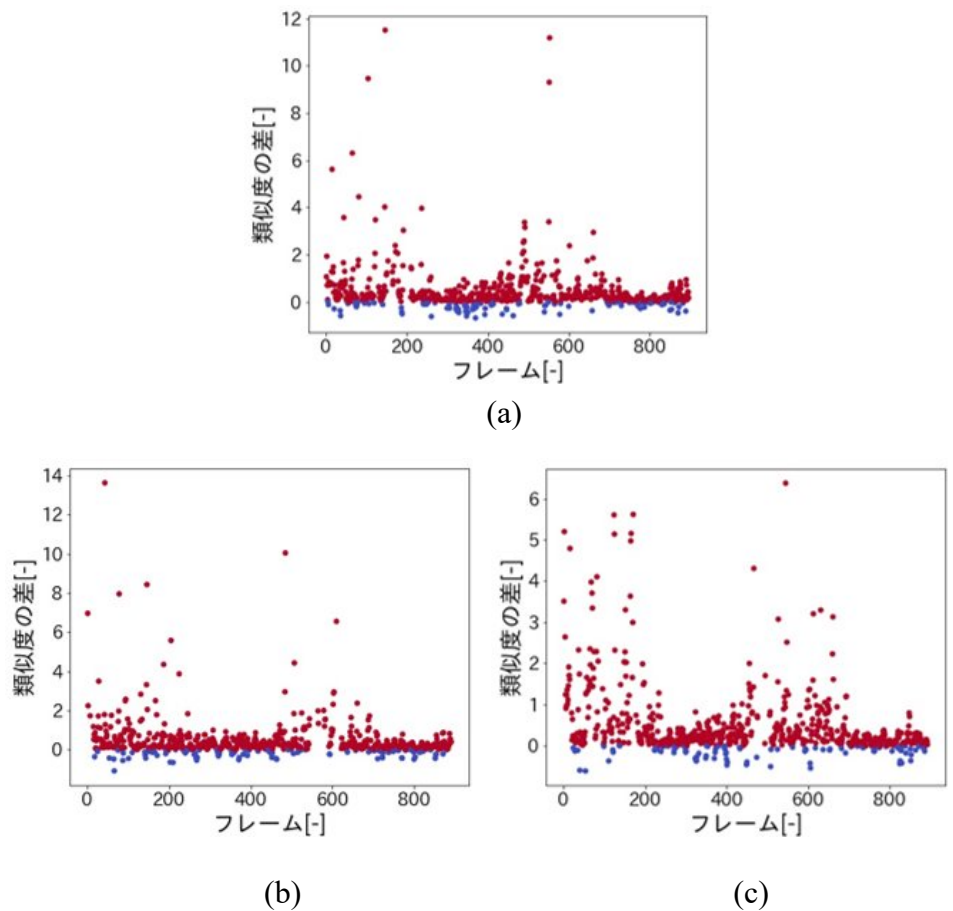


図 4-14 フレーム推移と類似度の差についての結果：(a)1 試行目；(b)2 試行目；(c) 3 試行目

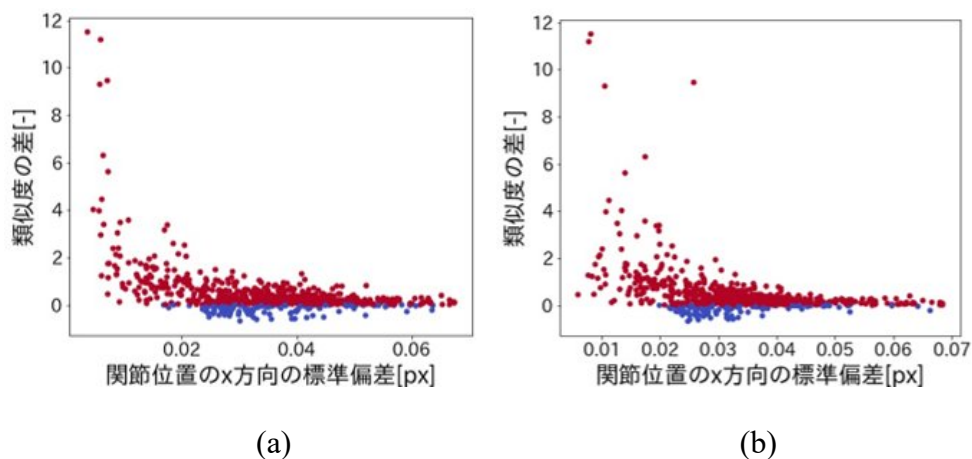


図 4-15 関節位置のばらつきと類似度の差についての結果（1 試行目）：(a) ユーザの関節位置の x 軸方向のばらつきと類似度の差；(b)バーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつきと類似度の差

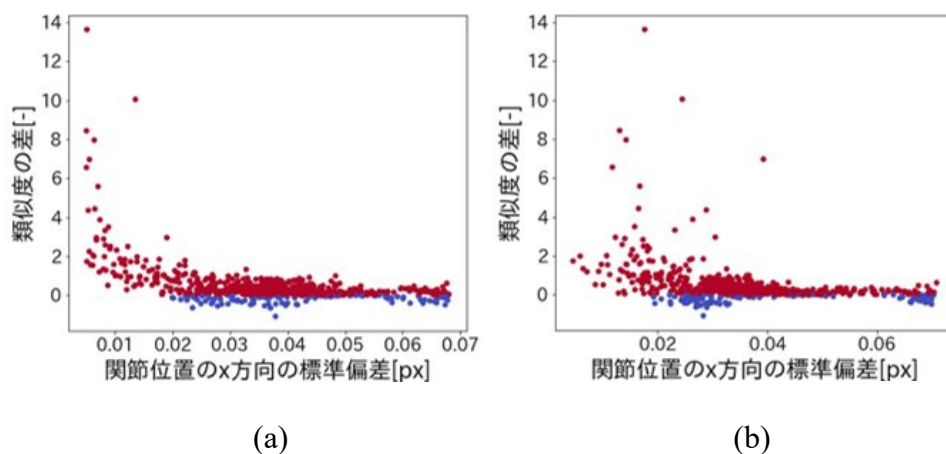


図 4-16 関節位置のばらつきと類似度の差についての結果 (2 試行目) : (a) ユーザの関節位置の x 軸方向のばらつきと類似度の差 ; (b)バーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつきと類似度の差

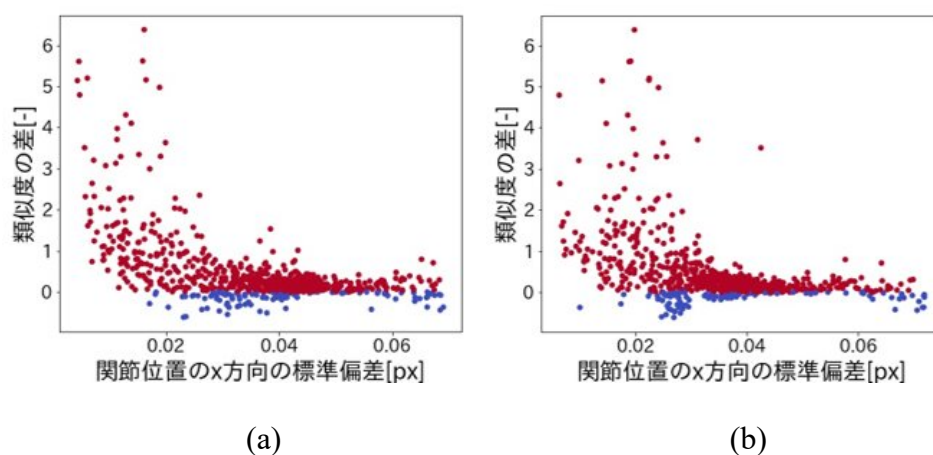


図 4-17 関節位置のばらつきと類似度の差についての結果 (3 試行目) : (a) ユーザの関節位置の x 軸方向のばらつきと類似度の差 ; (b)バーチャル衣服の関節位置の x 軸方向のばらつきと類似度の差

4.3.3 考察

図 4-9 を確認すると、対応点追加前の結果と比較して、1 つ目の問題の発生を抑制できたことがわかる。また、図 4-10 から図 4-12 の(a)と(c)を確認すると、対応点追加後は、Kinect センサに対して、ユーザが側面を向いている場合であっても、対応点全体の x 軸方向のばらつきの大きさが、ある一定以上の値を維持し続けている様子が、読み取れる。一方、図 4-10 から図 4-12 の(b)と(d)を確認すると、対応点追加後に、対応点の y 軸方向のばらつきの大きさが、全体的に底上げされている様子が読み取れるものの、 x 軸方向の場合と比較すると、小さな変化であると言える。以上より、前節で行なった考察のとおり、対象とする問題は、Kinect センサに対して、ユーザが側面を向いた場合に、対応点として用いた関節位置の、 x 軸方向のばらつきの大きさが極端に小さくなってしまふことが原因であり、関節位置を基に配置した対応点を、新たに追加することによって、Kinect センサに対するユーザの向きに依存せず、安定的にホモグラフィ行列の推定を行うことができたと考えられる。

図 4-14 を確認すると、フレーム全体の前から、 $1/4$ の領域と $4/3$ の領域において、赤いプロットで示された、類似度の差が特に大きいフレームが、いくつか散見される。よって、これらのフレームについては、対応点を新たに追加することによって、形状品質の著しい低下を抑制することができたと考えられる。一方で、青いプロットで示された、新たに対応点を追加することによって、形状品質が低下したことを意味するフレームも、いくつか確認することができる。しかし、類似度の差の絶対値の観点から見た場合には、赤いプロットで示された、形状品質の低下が顕著なフレームと比較すると、軽微な品質の低下に留まっており、特に問題にはならない。また、図 4-15 から図 4-17 を確認すると、関節位置の x 軸方向のばらつきが小さい領域において、赤いプロットで示された、類似度の差が大きいフレームが集中している様子を読み取ることができる。これより、形状品質の低下の問題に関しても、Kinect センサに対してユーザが側面を向いた際に、関節位置の x 軸方向のばらつきが小さくなってしまふことが原因であり、関節位置を基に作成した、新たな対応点を追加することによって、問題が抑制されたことが示唆された。

第5章 ユーザビリティ評価

5.1 評価実験 I

試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムの評価実験

5.1.1 実験目的

据え置き型ディスプレイを試着結果提示用デバイスとして利用した，従来の Virtual Try On システム（以下，据え置き型ディスプレイを用いたシステム）と比較して，OSTHMD を試着結果提示用デバイスとして用いた，試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システム（以下，OSTHMD を用いたシステム）がもつ有効性の評価を目的として，被験者実験を実施した．

5.1.2 実験内容

5.1.2.1 概要

被験者は，据え置き型ディスプレイを用いたシステムと，OSTHMD を用いたシステムの 2 つの条件下において，バーチャル試着を行った．被験者は，事前に準備された複数のバーチャル衣服の中から，最も自分が好みだと思ふ衣服を選択するように，指示が与えられた．これは，被験者が，実際に衣服に関する意思決定を行う場合に近い心理状態で，バーチャル試着に臨むことを意図した，ダミータスクである．試着時間は，2 つの条件ともに，3 分間とした．また，T シャツをバーチャル試着の対象の衣服として，被験者実験を行なった．

5.1.2.2 比較条件

本実験において，被験者がバーチャル試着を行った 2 つの条件下で用いた Virtual Try On システムについて，それぞれ説明する．



図 5-1 据え置き型ディスプレイを用いたシステム

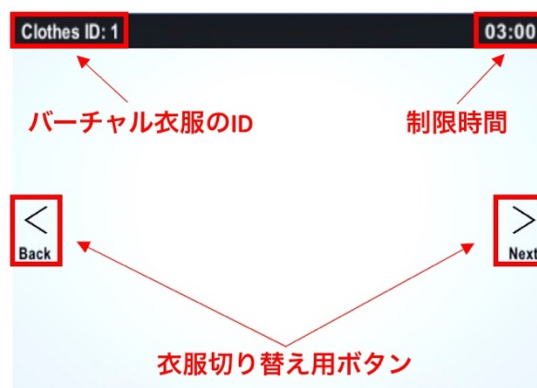


図 5-2 据え置き型ディスプレイを用いたシステムのユーザインタフェース

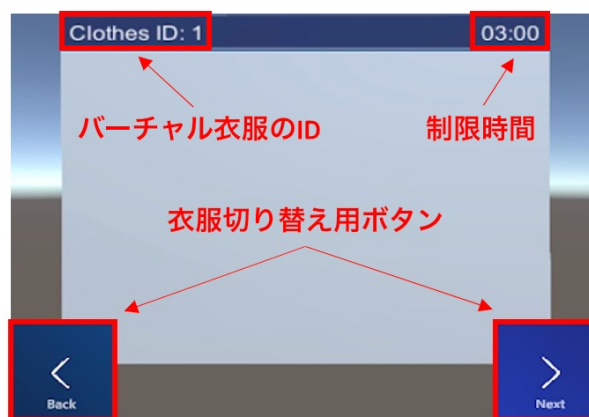


図 5-3 OSTHMD を用いたシステムのユーザインタフェース

1つ目の条件で用いた Virtual Try On システムは、据え置き型ディスプレイを用いたシステムである（図 5-1）。実際に利用した据え置き型ディスプレイのサイズは、24.0 インチで、縦が約 30cm、横が約 55cm であった。Kinect センサは、据え置き型ディスプレイの背後に、床から約 1.35m の高さで設置した。被験者は、据え置き型ディスプレイから、約 1.3m から 1.8m 離れた位置で、バーチャル試着を行なった。ユーザインタフェースを図 5-2 に示す。中心部の領域には、バーチャル試着の結果、左上には、タスクで必要となるバーチャル衣服の ID、右上には制限時間、両端には、衣服切り替え用のボタンが配置されている。衣服切り替えは、ディスプレイ内に表示される、試着中の被験者の手首部分を、衣服切り替え用ボタンの領域に近づけることで行われる。据え置き型ディスプレイを用いたシステムの、Unity 内部の平均フレームレートは、40fps であった。

2つ目の条件で用いた Virtual Try On システムは、OSTHMD を用いたシステムであり、被験者は HoloLens を装着した状態で Kinect センサの前面に立ち、バーチャル試着を行う。ユーザインタフェースを図 5-3 に示す。ユーザインタフェースを通して、被験者が確認できる情報は、据え置き型ディスプレイを用いたシステムと同様である。衣服の切り替えは、被験者の眼前に表示されるバーチャルボタンに対して、直接タッチする動作を行うことによって、実現される。OSTHMD を用いたシステムの、Unity 内部の平均フレームレートは、22fps であった。

5.1.2.3 バーチャル衣服について

被験者が、バーチャル試着を行う T シャツの 3D モデルを、本実験の 2 つの条件下の Virtual Try On システムで、それぞれ 10 着ずつ、計 20 着準備した。

T シャツの 3D モデルは、モデリング、リギング、ウェイトイングといった 3 つの作業を経て作成された。モデリング作業は、バーチャル衣服の 3 次元形状の構築および表面のテクスチャマッピングを行う作業、リギング作業は、モデリング作業によって作成された 3D モデルに対して、制御対象となるボーンを埋め込む作業、ウェイトイング作業は、リギング作業で埋め込んだボーンと、3D モデル上の頂点の関連づけを行う作業である。モデリングには、Marvelous Designer⁵、リギングとウェイトイングには、Blender⁶を用いた。

5. <https://www.marvelousdesigner.com/>

6. <https://www.blender.org/>

QA (Quality Attribute) : 製品の購買意思決定に対する寄与度に関する属性

- Q1. 使い勝手が良いと感じた。
I found it user-friendly.
- Q2. 製品を購入する際の補助として信頼できると感じた。
I felt that using it was reliable in assisting me to make a purchase.
- Q3. 多くの改善が必要であると感じた。
I felt that this needs a lot of improvement.
- Q4. 試着結果の外見が好きだ。
I liked its appearance.
- Q5. 試着体験が期待にそぐわなかった。
It did not match my expectations.
- Q6. 製品を購入する際の補助として正確であると感じた。
I felt that using it was accurate in assisting me to make a purchase.

CA (Cognitive Attribute) : 精神プロセスに関する属性 (注意力、学習、意思決定を含む)

- Q7. 使いづらかった。
I found it confusing to use.
- Q8. 使用中に慌てた。
I got flustered when using it.
- Q9. 使用を通して、システムをコントロールできていると感じた。
I felt in control throughout when using it.
- Q10. 使用中にストレスを感じた。
I felt under stress while using it.

ATU (Attitude Towards Using) : システムの使いやすさ (easy to use) や有用性 (usefulness) に関する属性

- Q11. もう一度使いたいと思った。
I will be happy to use it again.
- Q12. システムを利用することが楽しかった。
I enjoyed using it.
- Q13. 他の人に利用することを勧めると思う。
I will recommend others to use it.
- Q14. もし、機会があれば将来的に頻繁に利用すると思う。
I will frequently use it in future if I have the chance.
- Q15. 将来のユーザーに対してシステムのポジティブな感想を言うと思う。
I will say positive things about it to future users.

図 5-4 被験者アンケート

5.1.2.4 取得データ

主観データとして、先行研究[15, 26]にて、Virtual Try On システムの評価に利用された、被験者アンケートを用いた。被験者アンケートの質問項目は、図 5-4 のとおりである。この被験者アンケートによって、対象とする Virtual Try On システムについて、QA (Quality Attribute) , CA (Cognitive Attribute) , ATU (Attitude Toward Using) の 3 つの属性の観点から評価することができる。QA は、Virtual Try On システムが、実際にユーザの購買意思決定に与える影響に関連する属性であり、被験者がシステムに対して抱いた、信頼感や正確性として解釈できる。CA は、システムの操作性に関連する属性である。ATU は、被験者がシステムの利用を通して感じた、使い心地や有効性に関連する属性である。被験者アンケートの計 15 項目のうち、1 問目から 6 問目が QA、7 問目から 10 問目が CA、11 問目から 15 問目が ATU

を評価するための質問項目に該当する。被験者は、各項目について5段階（1＝全くそう思わない，5＝とてもそう思う）で評価を行なった。被験者アンケートは、全体を通して、質問項目が誘導的になることを回避するため、ポジティブな質問とネガティブな質問から構成されている。そのため、評価時には全ての回答スコアをポジティブな質問に対する回答スコアへと変換した。

客観データとして、バーチャル試着時の被験者の三次元関節位置，Unity内部のフレームレート，衣服切り替えタイミングを取得した。

5.1.2.5 バーチャル試着時の被験者の動きに関する指標

バーチャル試着中の被験者の三次元関節位置を基に，被験者の動作として，回転角度（腰，肩，頭），捻り量（腰-肩，腰-頭，肩-頭），試着結果の方向別（前面，側面，背面）確認割合を指標として定義した。

回転角度に関する指標の定義について，説明する。腰と肩については，左右の関節位置を結んだベクトルを基に，頭については，左右の耳の位置を結んだベクトルを基に，図5-5に示すとおり，Kinectセンサの x 軸方向とのなす角を計算した。そして，Kinectセンサに向かって，時計回りの方向を正の向き，半時計回りの方向を負の向きとした上で，先述した角度に符号を付けて，回転角度を定義した。腰，肩，頭いずれかの回転角度を θ ，Kinectセンサによって検出された左右の関節の位置（左右の耳の位置）を，それぞれ J_L, J_R とし，Kinectセンサの x 軸方向， y 軸方向の正規化ベクトルをそれぞれ e_x, e_y とする。このとき，右側の関節の位置（右側の耳の位置）から，左側の関節の位置（左側の耳の位置）へ向かうベクトルを，Kinectセンサの zx 平面に射影したベクトル L_{zx} は，次式で表される。

$$L_{zx} = (J_L - J_R) - \langle J_L - J_R | e_y \rangle e_y \quad (5.1)$$

このベクトル L_{zx} とKinectセンサの x 軸方向とのなす角を，次式を用いて計算することにより，回転角度 θ が定義される。

$$\theta = \pm \cos^{-1} \left(\left\langle \frac{L_{zx}}{\|L_{zx}\|} | e_x \right\rangle \right) \quad (5.2)$$

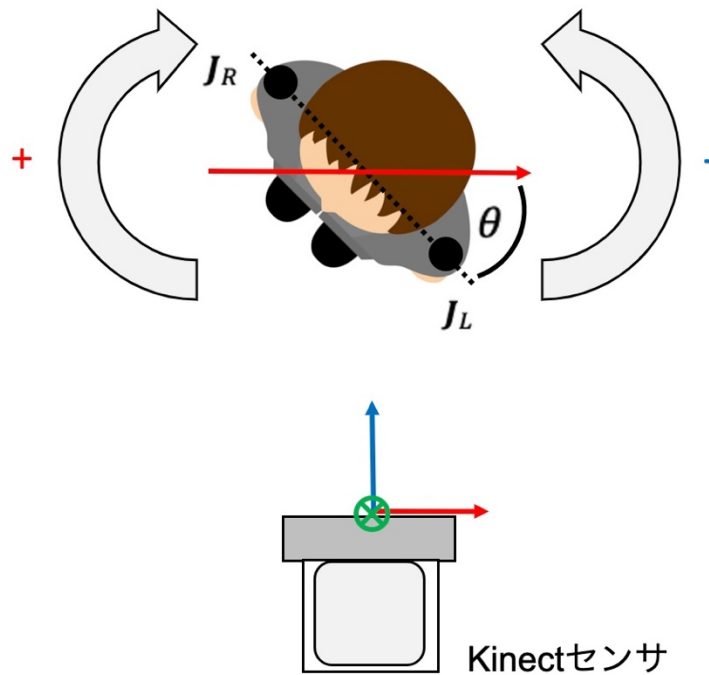


図 5-5 回転角度の定義

捻り量に関する指標の定義について、説明する。上述の定義によって、Kinect センサの生データから計算された腰、肩、頭の回転角度をそれぞれ θ_W 、 θ_S 、 θ_H とする。このとき、腰-肩の捻り量 T_{W-S} 、腰-頭の捻り量 T_{W-H} 、肩-腰の捻り量 T_{S-W} を次式のように定義する。

$$T_{W-S} = |\theta_W - \theta_S| \quad (5.3)$$

$$T_{W-H} = |\theta_W - \theta_H| \quad (5.4)$$

$$T_{S-W} = |\theta_S - \theta_W| \quad (5.5)$$

また、捻り量の合計 T_{total} を次式のように定義する。

$$T_{total} = T_{W-S} + T_{W-H} + T_{S-W} \quad (5.6)$$

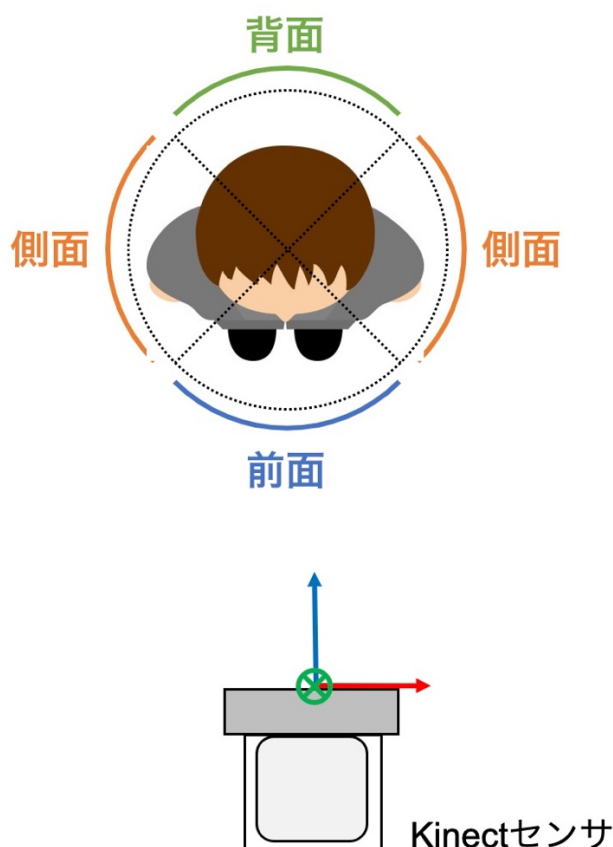


図 5-6 試着結果の確認方向の定義

試着結果の方向別確認割合について、説明する。まず、試着結果の確認方向は、被験者の腰の回転角度が、 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ のときに前面、 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ あるいは、 $-135^{\circ} \sim -45^{\circ}$ のときに側面、 $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$ あるいは、 $-180^{\circ} \sim -135^{\circ}$ のときに背面として、定義する（図 5-6）。そして、バーチャル試着時の対象とする全フレーム数に対する、試着結果の方向別確認方向のフレーム数の比率によって、試着結果の方向別確認割合を定義する。

5.1.2.6 被験者情報

本実験は、平均年齢 23.5 歳の 11 人（男性 8 人、女性 3 人）の被験者に対して、行われた。なお、半数以上の被験者が、HMD および AR アプリケーションの利用経験があった。また、被験者のうち、Virtual Try On システムの経験があったのは、1 人のみであった。

5.1.3 実験結果

5.1.3.1 被験者アンケートの回答結果

被験者アンケートの回答結果について述べる。図 5-7 に、質問項目毎の回答結果を、箱髭図によってシステム別に示した。図 5-8 には、属性毎の回答結果を、箱髭図によってシステム別に示した。図 5-7 と図 5-8 において、据え置き型ディスプレイを用いたシステムに関する結果を青色、OSTHMD を用いたシステムに関する結果を赤色の箱髭図で表示した。属性毎の回答結果のシステム間の差に関して、仮説検定を適用した。今回の実験においては、被験者数が 11 人と正規性の仮定を置くに満たない人数であったため、ノンパラメトリック検定を選択した。さらに、対応ありの 2 群間の差の検定であることから、検定手法として、Wilcoxon の符号付順位検定を選択し、両側検定を実施した。仮説検定の結果、QA, CA については有意差なし、ATU については有意水準 5% で、有意差を確認できた。

5.1.3.2 被験者の動きに関する実験結果

5.1.2.5 で定義した、回転角度、捻り量、試着結果の方向別確認割合に関する結果について述べる。図 5-9 には、回転量に関する結果を、箱髭図によってシステム別に示した。図 5-9 の(a)から(d)は順に、腰、肩、頭、の回転量および回転量の総和を示す。ここでの回転量は、回転角度のフレーム間の差分について、試着中の対象とする全フレームの平均値を取ったものとした。図 5-10 には、捻り量に関する結果を箱髭図によってシステム別に示した。図 5-10 の(a)から(d)は順に、腰と肩、腰と頭、肩と頭の捻り量および捻り量の総和を示す。図 5-10 に示す捻り量は、対象とする全フレームに渡って、事前定義した捻り量の値の平均を取ったものとした。図 5-11 には、試着結果の方向別確認割合の結果を、箱髭図によってシステム別に示した。図 5-11 の(a)から(c)は順に、前面、側面、背面の試着結果の確認割合を示す。箱髭図の色の割り当てについては、図 5-7 と同様である。ここで、試着中の動きデータの分析に際して、被験者が積極的な姿勢で試着結果を確認しているフレームに特に関心があったため、計 10 着のバーチャル T シャツのうち、試着結果を確認していた時間（フレーム数）の長さについて、上位 3 つに該当するフレームを、対象とする全フレームとして用いた。

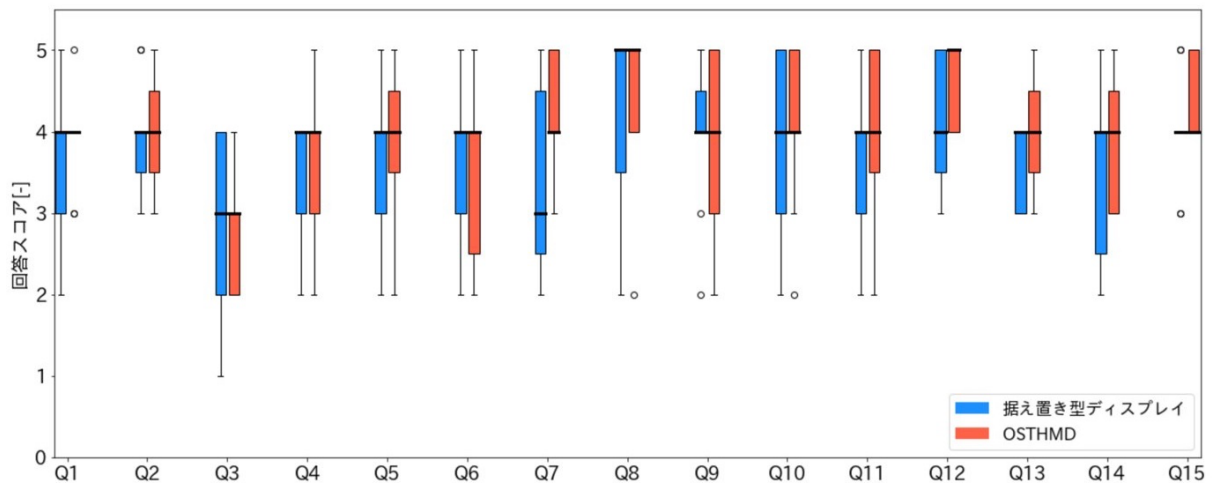


図 5-7 質問項目毎の回答結果

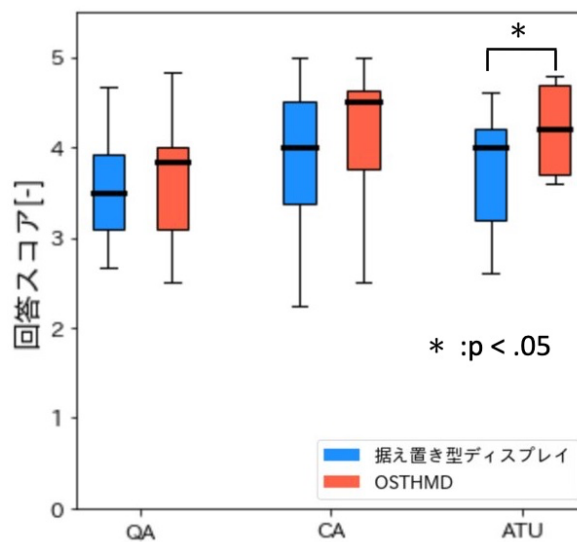


図 5-8 属性毎の回答結果

背面の試着結果を確認する際の、被験者の動きの特徴について分析を行うため、試着結果の方向別確認割合と、その他の動きに関する指標の関連性を確認した。図 5-12(a)に、据え置き型ディスプレイを用いたシステムを、被験者が利用した際の、試着結果の方向別確認割合と回転量、捻り量の散布図を示す。同様に図 5-12(b)には、OSTHMDを用いたシステムを、被験者が利用した際の、試着結果の方向別確認割合と回転量、捻り量の散布図を示す。相関係数が 0.7 以上の場合の散布図については、赤でプロット、-0.7 以下の場合の散布図については、青でプロットをした。

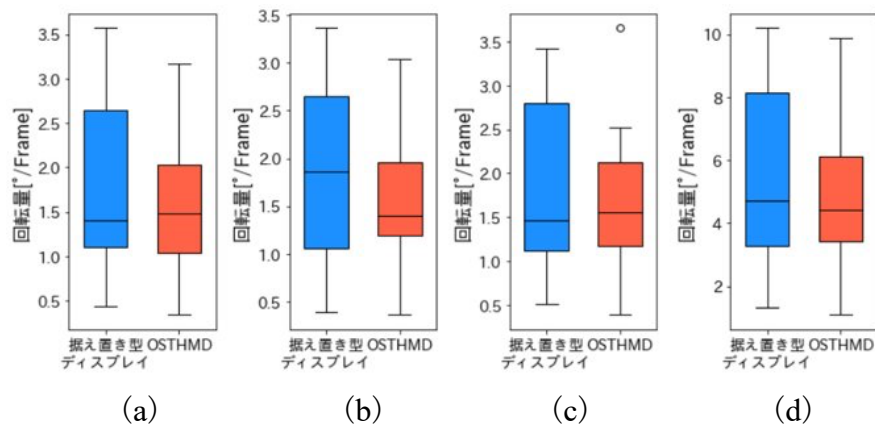


図 5-9 回転量についての結果：(a)腰の回転量；(b)肩の回転量；(c)頭の回転量；
(d)回転量の総和

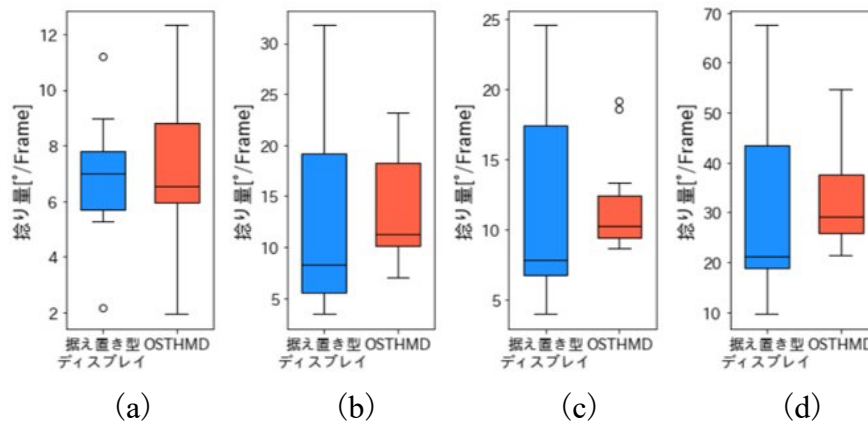


図 5-10 捻り量についての結果：(a)腰と肩の捻り量；(b)腰と頭の捻り量；(c)肩
と頭の捻り用；(d)捻り量の総和

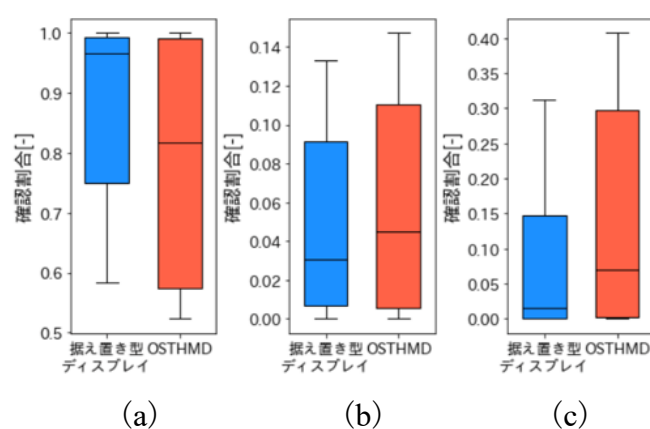


図 5-11 試着結果の方向別確認割合についての結果：(a)前面；(b)側面；(c)背面
の試着結果の確認割合

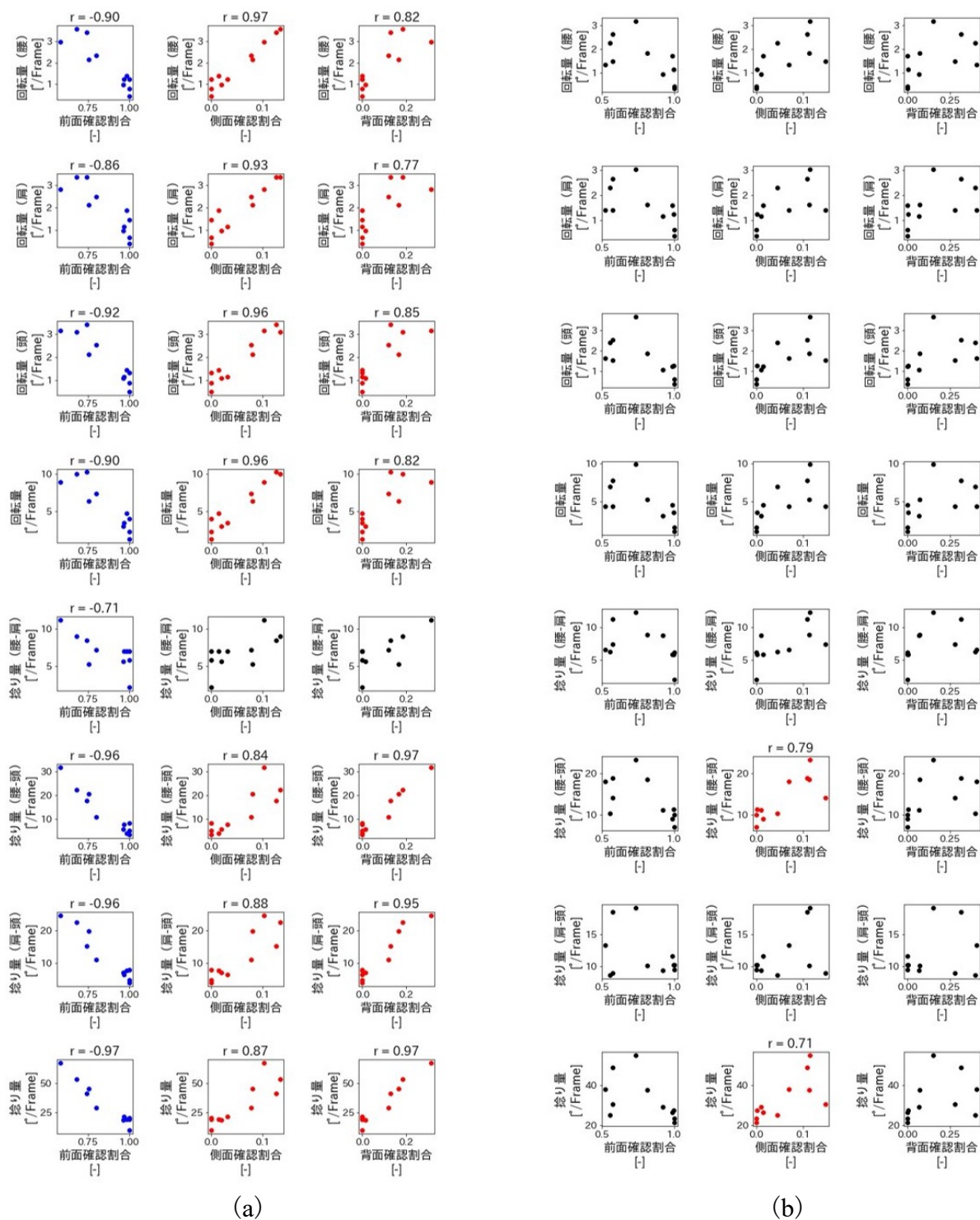


図 5-12 試着結果の方向別確認割合と動きデータの相関：(a)据え置き型ディスプレイを用いたシステムに関する結果；(b)OSTHMDを用いたシステムに関する結果

背面の試着結果を確認する際の、被験者の動き以外の特徴について分析を行うため、背面確認時間について、本実験で用いた2つのシステム間の比較を行なった。本実験の2つの条件下における、バーチャル試着体験を通して、両システムで背面の試着結果を確認した被験者は、計6人であった。この6人の被験者がバーチャル試着を行なった際の、腰の回転角度の絶対値の推移を図5-13と図5-14に示す。図5-13は、据え置き型ディスプレイを用いたシステムについての結果であり、図5-14は、OSTHMDを用いたシステムについての結果である。図5-13と図5-14において、(a)から(f)は、6人の被験者それぞれに対応する結果である。図5-13と図5-14の横軸はフレーム推移を、縦軸は、各フレームにおける被験者の腰の回転角度の絶対値を示す。回転角度の定義は、5.1.2.5で説明したとおりであり、図5-13と図5-14において、 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ のときには前面、 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ のときには側面、 $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$ のときには背面の試着結果を、被験者が確認していると解釈できる。また、1回あたりの背面確認時間を新たに定義し、6人の被験者が2つのシステムを利用した際の、平均背面確認時間の結果を、箱髭図として図5-15(a)に示した。箱髭図の色の割り当てについては、図5-7と同様である。1回あたりの背面確認時間は、被験者が一度背面の試着結果を確認してから、次に側面の試着結果を確認するまでのフレーム数と定義した。平均背面確認時間の、2つのシステム間の差を確認するために、仮説検定を行なった。今回は、正規性の仮定を置くに満たない6人の被験者のデータを用いたため、ノンパラメトリック検定を選択した。さらに、対応ありの2群間の差の検定であることから、検定手法としてWilcoxonの符号付順位検定を選択し、両側検定を行なった。仮説検定の結果、平均背面確認時間について、OSTHMDを用いたシステムと、据え置き型ディスプレイを用いたシステムの間には、有意水準5%で有意差が確認できた。また、6人の被験者の、各システムの背面確認回数の結果を、箱髭図として図5-15(b)に示した。背面確認回数についても、Wilcoxonの符号付順位検定を用いて、両側検定を行ったが、有意な差は確認できなかった。

5.1.4 考察

図5-8より、属性ATUの評価に関しては、OSTHMDを用いたシステムの方が、優れていることが確認できた。一方で、属性QAと属性CAの評価に関しては、据え置き型ディスプレイを用いたシステムと、OSTHMDを用いたシステムの間には、有意差を確認することができなかった。図5-7の質問項目毎の回答スコアの分布を確認すると、属性QAに対応する質問項目のなかで、Q3（多くの改善が必要であると

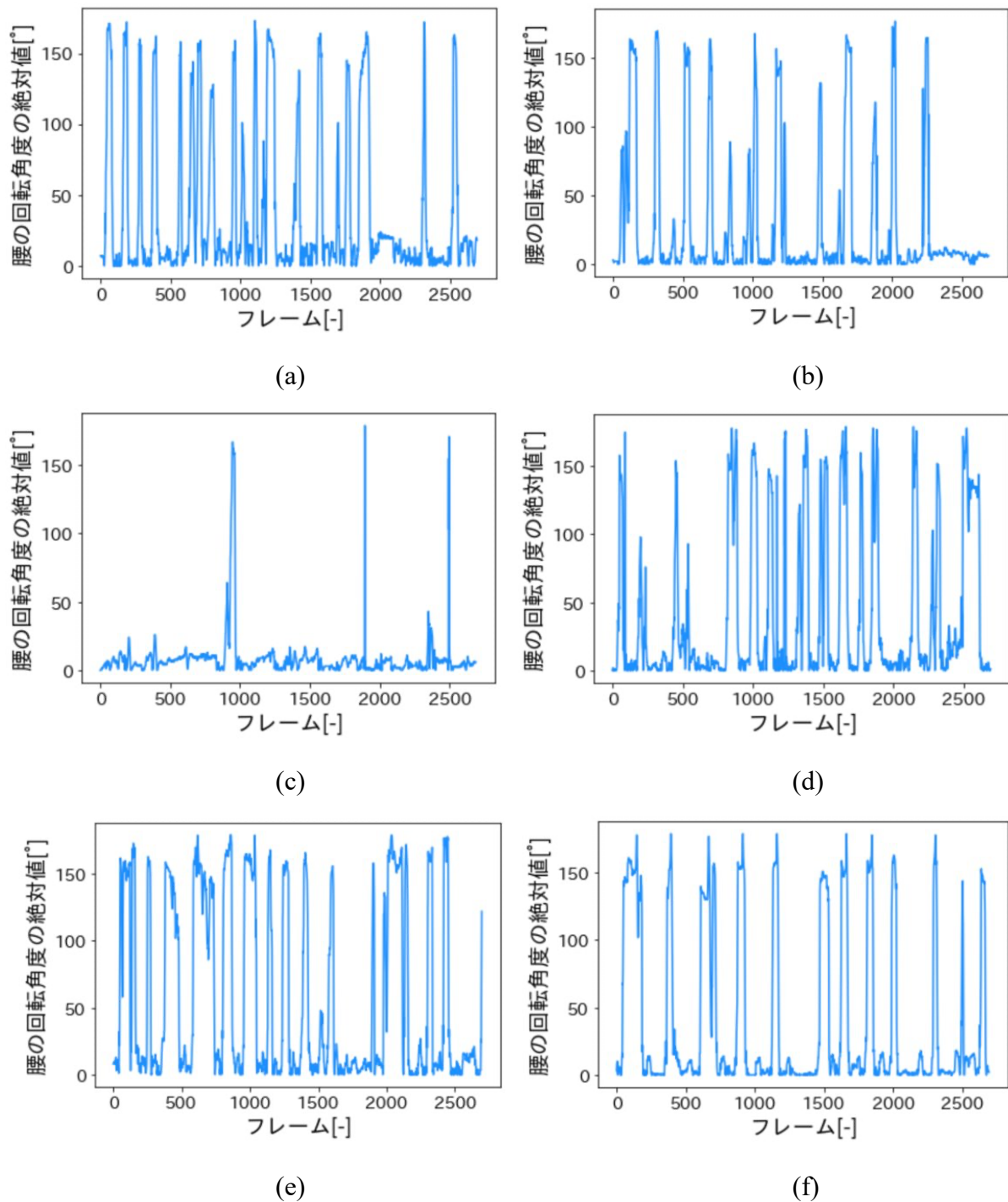


図 5-13 据え置き型ディスプレイを用いたシステム利用時のフレーム推移と腰の回転角度の絶対値についての結果：(a)被験者 1；(b)被験者 2；(c)被験者 3；(d)被験者 4；(e)被験者 5；(f)被験者 6

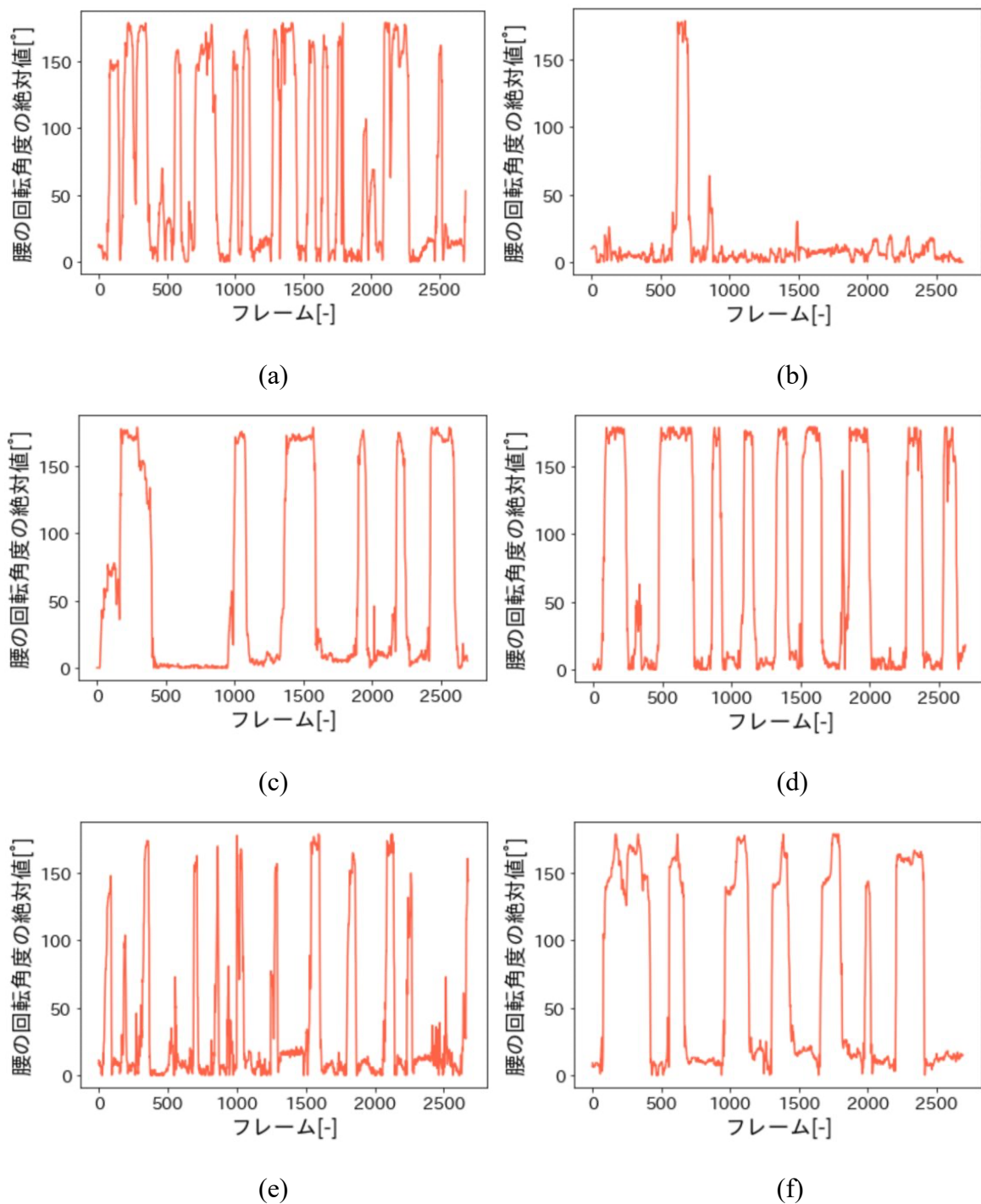


図 5-14 OSTHMD を用いたシステム利用時のフレーム推移と腰の回転角度の絶対値についての結果：(a)被験者 1；(b)被験者 2；(c)被験者 3；(d)被験者 4；(e)被験者 5；(f)被験者 6

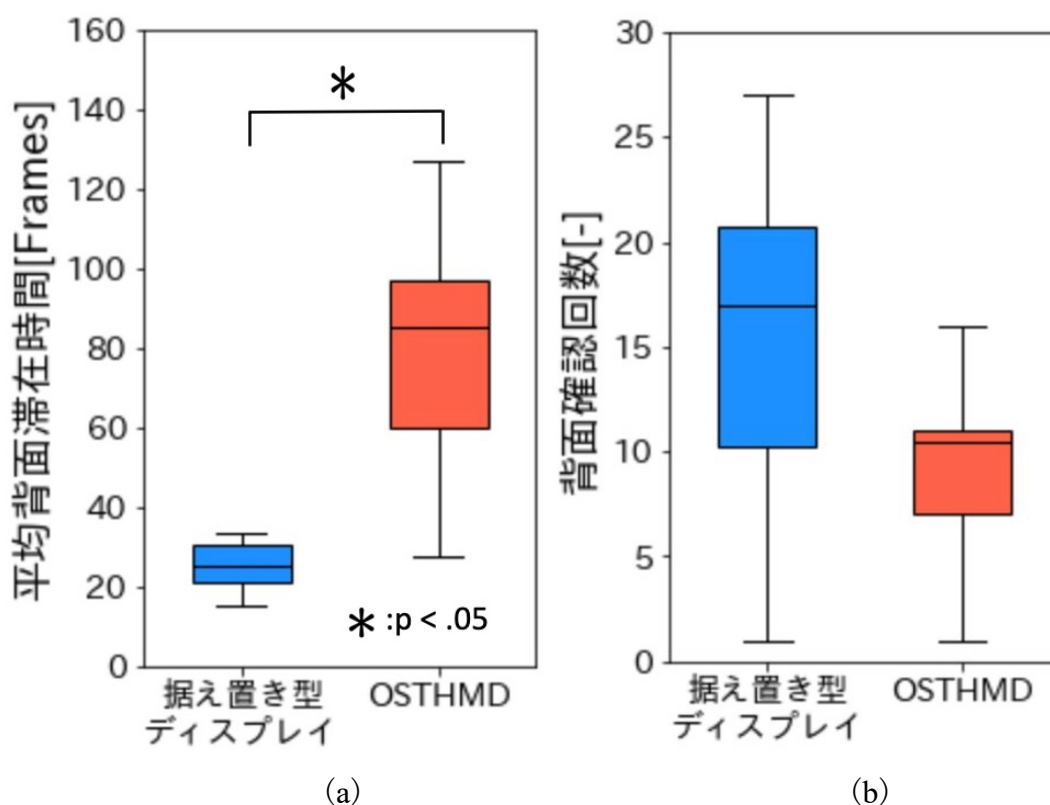


図 5-15 背面の試着結果の平均確認時間と確認回数についての結果：(a) 平均背面確認時間；(b) 背面確認回数

感じた。)と Q6 (製品を購入する際の補助として正確であると感じた。)について、OSTHMD を用いたシステムに関する回答結果が、より低いスコアに分布している様子が読み取れる。OSTHMD を、Virtual Try On システムの試着結果提示用デバイスに利用することによって、項目 Q3、Q6 の回答スコアに、悪影響を及ぼす要因としては、ディスプレイの透過に伴う試着結果の見づらさや、OSTHMD を装着することによって、顔が隠れてしまうことなどが挙げられる。前者については、後述する自由記述アンケートにおいて、複数の被験者から指摘されており、項目 Q3 および Q6 の回答スコアにも反映されていることが考えられる。後者については、自由記述アンケートのなかで、指摘されていることに加え、Yuan らの先行研究[26]においても、自分の身体領域が多く見えている場合に、バーチャル試着の結果を、実際の試着結果として感じやすい、という意見を、被験者から受けたことが報告されており、本実験においても、複数の被験者がこの点について、試着結果としての不正確性を感じてしまったことも、十分に考えられる。属性 CA に対応する質問項目の

なかでは、Q9（使用を通して、システムをコントロールできていると感じた。）について、OSTHMDを用いたシステムに関する回答結果が、より低いスコアに分布している様子が読み取れる。この回答結果の違いについて、据え置き型ディスプレイを用いたシステムは、基本的に従来の実店舗における試着形態に近いいため、使いづらさにつながる要素が少ない一方で、OSTHMDを用いたシステムは、従来の試着形態とは異なる上に、デバイスへの不慣れが原因となり、使用中に戸惑いを感じてしまった被験者がいたことが、理由として考えられる。実際に、OSTHMDを用いたシステム利用後に、Q9に対して2や3と回答した被験者には、事前アンケート内の2つの質問項目である、「HMDの利用経験」、「ARアプリケーションの経験」の回答に関して、全被験者のなかで、経験が少ない下位2人が含まれており、OSTHMDやARアプリケーションへの慣れの少なさが、Q9のスコアに反映されたことは、理由として考えられる。

図5-9, 5-10, 5-11の結果、各種の動きに関するデータについては、2つのシステムの間で、違いは確認できなかった。本実験において、バーチャル試着中の動き方に関しては、被験者に対して特に指示を与えなかったため、試着中の動きの個人差が、大きく結果に影響したと考えられる。図5-12(a)の結果から、据え置き型ディスプレイを用いたシステムでは、背面の試着結果を頻繁に確認しようとした被験者の方が、身体の回転量や捻り量が大きくなっている傾向が、読み取れる。一方、図5-12(b)より、OSTHMDを用いたシステムでは、背面の試着結果を頻繁に確認した被験者と、確認しなかった被験者の間で、回転量や捻り量に関して、相関係数に基づく違いは確認できなかった。よって、据え置き型ディスプレイを用いたシステム利用時に、背面の試着結果を確認する場合には、姿勢の維持が困難な、回転や捻りの運動を伴うが、OSTHMDを用いたシステム利用時には、方向によらず一定の姿勢で、試着結果を確認できることが示唆された。また、図5-13と図5-14より、OSTHMDを用いたシステムを利用した場合の方が、背面の試着結果を確認する時間が、長い傾向にあることが読み取れる。実際に、図5-15(a)より、据え置き型ディスプレイを用いたシステムと比較して、OSTHMDを用いたシステムでは、多くの被験者が、より長い時間をかけて、背面の試着結果を確認していた傾向が、統計的に確認できた。図5-15(b)より、背面の試着結果の確認回数に関しては、手法間で統計的に有意な差は確認できなかった。しかし、全体的にOSTHMDを用いたシステムを利用した場合の方が、背面の確認回数が少ない傾向にあることが読み取れる。以

上を踏まえて、据え置き型ディスプレイを用いたシステムでは、背面の試着結果を確認する場合に、姿勢の維持が困難な、回転や捻りの運動を伴うため、短い時間で何度も確認することになるが、OSTHMDを用いたシステムでは、常に姿勢の維持が容易であるため、あらゆる方向からの試着結果を、1回で長い時間をかけて、確認可能であることが示唆された。

5.1.4.1 自由記述アンケート

据え置き型ディスプレイを用いたシステムと、OSTHMDを用いたシステムを利用して、バーチャル試着を行なった直後に、被験者から自由記述アンケートの回答を得た。以下に、各システムについての回答を示す。

据え置き型ディスプレイを用いたシステム

- ・ 暗い色の方が本物に近そう。明るい色は不自然もしくはニュアンスを感じにくそう。
- ・ 画像の解像度が気になった。服の実際の色や生地感がわかりづらくなっていた。
- ・ 後ろを向くときに体を捻らなくても良い HoloLens の方が使い勝手が良いと感じた。色などの組み合わせを見る分には問題なさそう。HoloLens のように、反射光により本来の色が分かりにくくなることがなかった点は良かったかもしれない。
- ・ 画面が大きいので、HoloLens の手法ほど解像度に不満を感じなかった。その一方で、解像度が上がったために襟元や袖の部分の細かな不一致が気になった。リアルでの試着感に近かったが、背面に関してはディスプレイが付いて来る HoloLens を用いたシステムの方が使いやすいと感じた。

OSTHMD を用いたシステム

- ・ 色が完全再現ではない点およびバーチャル衣服の胸の突っ張り、模様の平坦さが気になった。

- 元の服と色味が近いとかなり正確に試着体験ができたが、色味が違うと別の服（例えば白のラインが入った服）のように見えてしまうと思った。
- HoloLens が反射光で虹色に見えて色が分かりづらい場合があった。丈と質感がわからないと購入までには至らない気がする。
- 柄のある服は、解像度の問題で詳細に見ることができなかった。HoloLens を被っているため服を着た自分の顔を見ることはできず現実の試着室とは少し試着感が異なった。シャツの丈が全体的に短く感じたので、複数サイズがあったらより満足したかもしれない。服をほぼネット購入しかしない身としては性能が上がればかなり欲しい機能だとは思った。
- 後ろの柄が見えるのが割と役に立つと思いました。
- わざわざ振り返ることなく、360° の外見が確認できるのがとても良いと感じました。

OSTHMD を用いたシステムの方が、背面の試着結果を確認しやすいというコメントが複数見られた。一方で、OSTHMD を用いたシステムでは、周辺環境の反射光の影響によって、バーチャル衣服の色味が異なって見えてしまう、というコメントもいくつか確認できた。また、両システムで共通するコメントとして、サイズ感、生地感、解像度等に関する不満の声が見られた。

5.2 評価実験Ⅱ

実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムの評価実験

5.2.1 実験目的

実世界の衣服との着合わせを想定していない Virtual Try On システム（以下、着合わせ想定なしのシステム）を、利用した場合と比較して、実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システム（以下、着合わせ想定ありのシステム）を、利用した場合の、使用感の違いおよびユーザが衣服に対してもつ印象の違いについて、評価することを目的として、被験者実験を実施した。

5.2.2 実験内容

5.2.2.1 概要

被験者はタスクとして、実験用に準備された実世界のズボンと一緒に着用したい T シャツ，という観点で、5 着の T シャツの順位づけを、バーチャル試着の結果を基に行った。このとき被験者は、異なる 3 つの条件下で、バーチャル試着および順位づけタスクを行った。1 つ目は、着合わせ想定なしのシステム用いた条件、2 つ目は、着合わせ想定ありのシステムを用いて、前面のみから試着結果を確認する条件、3 つ目は、2 つ目と同様のシステムを用いて、前面と背面から試着結果を確認する条件である。各条件下で、順位づけタスクを 6 試行ずつ行った。試着時間は、上限時間 4 分であり、順位づけが終了した時点で、被験者が自由にバーチャル試着を終了できるような設定とした。本実験を通して、バーチャル試着の対象とする衣服は、T シャツのみに限定した。

5.2.2.2 比較条件

本実験において、被験者が T シャツの順位づけタスクを実施した 3 つの条件について、それぞれ説明する。

1 つ目（以下、条件①）は、評価実験 I の 2 つ目の条件内で、提案システムとして用いた、OSTHMD を用いた Virtual Try On システムを利用した条件である。このシステムは、Kinect センサで撮影した背景を含んだままの情報が、試着結果として被験者に提示されるため、着合わせ想定なしのシステムとして、条件①で利用した。着合わせ想定なしのシステムの平均フレームレートは、22fps であった。

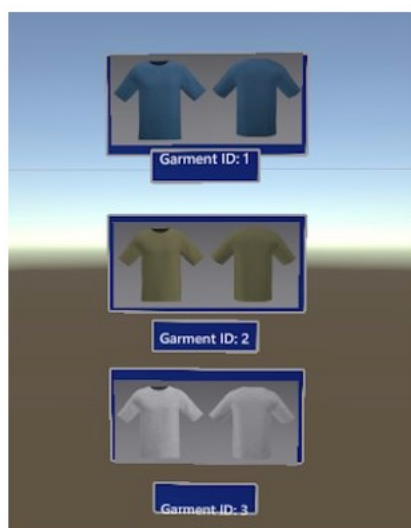
2 つ目（以下、条件②）は、着合わせ想定ありのシステムを用いて、前面から試着結果を確認する条件である。条件②は、ユーザがバーチャル衣服と実世界の衣服との着合わせの確認を行う際に、必要な身体領域のみに限定したバーチャル試着結果を、実世界の衣服に対して適切な位置に提示する方法が、ユーザのシステムの使用感および意思決定に、何らかの影響を及ぼすか、評価するための条件である。被験者は、Kinect センサと実世界のズボンの前方、約 1m 離れた初期位置に立ち、試着開始以降は、実世界のズボンが設置された前方の、自由な位置から、試着結果を確認することができる（図 5-16）。



図 5-16 条件②で用いたシステム



図 5-17 条件③で用いたシステム



(a)



(b)

図 5-18 全条件で用いたシステムに共通のユーザインタフェース：(a)衣服切り替え用ボタン；(b)制限時間と試着終了ボタン

3つ目（以下、条件③）は、条件②と同じシステムを用いて、前面と背面から試着結果を確認する条件である。第3章で説明した、提案システムとしての実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムは、ユーザが実世界に設置された衣服の周囲を回りながら、バーチャル衣服と実世界の衣服を着合わせた結果を、360° 方向から確認することができる Virtual Try On システムである。しかし、システムの実装に用いた Kinect センサの、動作範囲、解像度に関する性能の限界により、一定品質を保った試着結果を、被験者に提示することが困難であった。よって、提案システムに近いバーチャル試着体験を、被験者に提供する条件を、条件③として設定した。条件③では、第3章で説明した提案システムのように、360° 方向から連続的に、実世界の衣服との着合わせの確認を行うことはできないが、着合わせの結果を、前面と背面から確認したのちに、Tシャツの順位づけを行う。前面からの試着結果の確認方法は、条件②と同様である。背面の試着結果を確認する際には、実世界のズボンの後方、約 1m 離れた初期位置に立ち、試着開始以降は、実世界のズボンが設置された後方の、自由な位置から、試着結果を確認することができる（図 5-17）。条件②と条件③で用いた、着合わせ想定ありのシステムの、平均フレームレートは 13fps であった。

本実験では、全ての条件を通して、OSTHMD を利用しているため、試着中のユーザインタフェースは共通である。ユーザインタフェースを通して、被験者が確認できる情報は、試着結果、衣服切り替え用ボタン、制限時間、試着終了ボタンである。試着結果以外のユーザインタフェースを、図 5-18 に示す。図 5-18 の(a)は、衣服切り替え用ボタン、(b)は、制限時間および試着終了ボタンである。衣服切り替え用ボタンには、バーチャル衣服の前面と背面の画像が表示されており、リアルタイムの試着結果と合わせて、衣服の全体像を見ながら、各バーチャル T シャツの評価を行うことができる。

5.2.2.3 バーチャル試着の対象となる衣服について

順位づけタスクの対象となる、Tシャツの 3D モデルとして、5.1.2.3 で説明した、衣服モデルの作成手順に従って、5 着のバーチャル T シャツから構成される T シャツセットを、8 セット、計 40 着、準備した。1 つの T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツには、それぞれ 1 から 5 までの ID 番号が割り当てられており、1 が背面

表 5-1 順位づけタスクの各試行で用いた
T シャツセットと実世界のズボンの組み合わせ

	条件①	条件②	条件③
実世界のズボン 1	T シャツセット 1	T シャツセット 1	T シャツセット 1
実世界のズボン 1	T シャツセット 2	T シャツセット 2	T シャツセット 3
実世界のズボン 1	T シャツセット 3	T シャツセット 7	T シャツセット 7
実世界のズボン 2	T シャツセット 4	T シャツセット 4	T シャツセット 4
実世界のズボン 2	T シャツセット 5	T シャツセット 5	T シャツセット 6
実世界のズボン 2	T シャツセット 6	T シャツセット 8	T シャツセット 8

のみに固有のデザインがある T シャツ，2 が前面のみに固有のデザインがある T シャツ，3 が両面に固有のデザインがある T シャツ，4 が全体に柄がある T シャツ，5 が無地の T シャツとした。本実験では，8 セット，計 40 着のバーチャル T シャツを，表 5-1 のように，3 つの条件の各試行で用いた。また，バーチャル T シャツに合わせる 2 枚の実世界のズボンを準備し，表 5-1 のように，各試行で利用した。

表 5-1 のとおり，各条件の間で，順位づけタスクに利用する T シャツセットと実世界のズボンの組み合わせが，4 セットずつ重複している。そのため，各条件間の順位づけ結果を比較する場合には，重複した T シャツセットと実世界のズボンに関する試行の結果を用いた。例えば，条件①と条件②を比較する際には，「T シャツセット 1+実世界のズボン 1」，「T シャツセット 2+実世界のズボン 1」，「T シャツセット 4+実世界のズボン 2」，「T シャツセット 5+実世界のズボン 2」の 4 試行の結果を利用した。

5.2.2.4 取得データ

主観データとして，条件①と条件②それぞれの全試行が終了した直後に，評価実験 I で用いた被験者アンケートの回答を取得した。アンケートの質問項目および回答の分析方法等には変わりはないが，実世界の衣服に合わせて着用したい衣服を決定するための Virtual Try On システム，としての観点から，被験者の回答を得た。また，本実験におけるメインタスクの回答である，各試行内での 5 着のバーチャル T シャツに関する順位づけ結果を取得した。さらに，本実験とは別に，画像情報のみ

に基づいて、実験で用いた 8 セットのバーチャル T シャツの順位づけを行った結果を、被験者から得た。

客観データとして、バーチャル試着時の被験者の三次元関節位置、頭の位置と向き、視線の原点と向き、Unity 内部のフレームレート、衣服切り替えタイミング、順位づけタスクを終えるまでの時間を取得した。

5.2.2.5 順位づけ結果の解釈に用いた定量指標について

本実験の各試行において、被験者は、実世界のズボンに合わせて着用したい T シャツ、という観点で、5 着の T シャツの順位づけを行った。ここでは、被験者から得た順位づけ結果を、定量的な指標として解釈するための方法について説明する。

まず、順位づけ結果の数値化の前提として、単体の順位づけ結果のみを解釈することは困難であり、異なる条件の順位づけ結果と比較して、数値化を行うことによって、解釈が可能になるという点に注意が必要である。ここで、定量指標として、数値化された順位づけ結果の解釈は、こういった条件下で得られた順位づけ結果を比較したか、に依存することも重要な点である。本実験では、2 つの異なる条件下において、被験者から取得した順位づけ結果、rank1, rank2 に対して、最大順位変動量 $S_{\max}(\text{rank1}, \text{rank2})$ を定義し、定量指標として利用した。最大順位変動量 S_{\max} の具体的な数値化手順について、1 から 5 までの ID 番号が割り当てられた、5 着の T シャツの順位づけ結果を例に用いて、説明する。rank1 が 1→3→5→2→4, rank2 が 3→5→2→1→4 である場合を考えると、rank2 の各順位の、rank1 に対する順位変動は、上位から順に 1, 1, 1, 3, 0 であり、最大順位変動量 $S_{\max}(\text{rank1}, \text{rank2})$ は 3 となる。最大順位変動量 S_{\max} は、非常に単純な数値化手法ではあるが、異なる条件下で得られた順位づけ結果の変動量の大きさ、すなわち、被験者が T シャツに対して抱いた印象の変化の大きさを、直感的に把握することができる指標である。

5.2.2.6 被験者情報

本実験は、平均年齢 23.9 歳の 13 人（男性 11 人、女性 2 人）の被験者に対して行われた。半数以上の被験者が、HMD および AR アプリケーションの利用経験があった。また、Virtual Try On システムを未経験の被験者は、3 人であった。

5.2.3 実験結果

5.2.3.1 被験者アンケートの回答結果

被験者アンケートの回答結果について述べる。図 5-19 に、質問項目毎の回答結果を、箱髭図によってシステム別に示した。図 5-20 には、属性毎の回答結果を箱髭図によってシステム別に示した。図 5-19 と図 5-20 において、着合わせ想定なしのシステムに関する結果を青色、着合わせ想定ありのシステムに関する結果を赤色の箱髭図で表示した。属性毎の回答結果のシステム間の差に関して、仮説検定を適用した。今回の実験においては、被験者数が 13 人と正規性の仮定を置くに満たない人数であったため、ノンパラメトリック検定を選択した。さらに、対応ありの 2 群間の差の検定であることから、検定手法として Wilcoxon の符号付順位検定を選択し、両側検定を実施した。仮説検定の結果、全ての属性を通して、統計的に有意な差を確認することができなかった。

5.2.3.2 順位づけ結果

条件①から条件③の各試行で、被験者から得た順位づけ結果と、画像情報に基づいた順位づけ結果を用いて、最大順位変動量 S_{\max} を計算し、2 つずつの条件間で、スコアの分布を確認した。T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツ全体を対象として、計算した最大順位変動量 S_{\max} について、図 5-21 の左から、条件①と条件②のスコア分布、条件①と条件③のスコア分布、条件②と条件③のスコア分布を、箱髭図によって示した。また、T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツのなかで、視点によって見え方が変化する T シャツ (ID が 1, 2, 3 に該当) を対象として、計算した最大順位変動量 S_{\max} について、図 5-22 の左から、条件①と条件②のスコア分布、条件①と条件③のスコア分布、条件②と条件③のスコア分布を、箱髭図によって示した。さらに、T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツのなかで、背面のみに固有のデザインがある T シャツ (ID が 1, 3 に該当) を対象として、計算した最大順位変動量 S_{\max} について、図 5-23 の左から、条件①と条件②のスコア分布、条件①と条件③のスコア分布、条件②と条件③のスコア分布を、箱髭図によって示した。

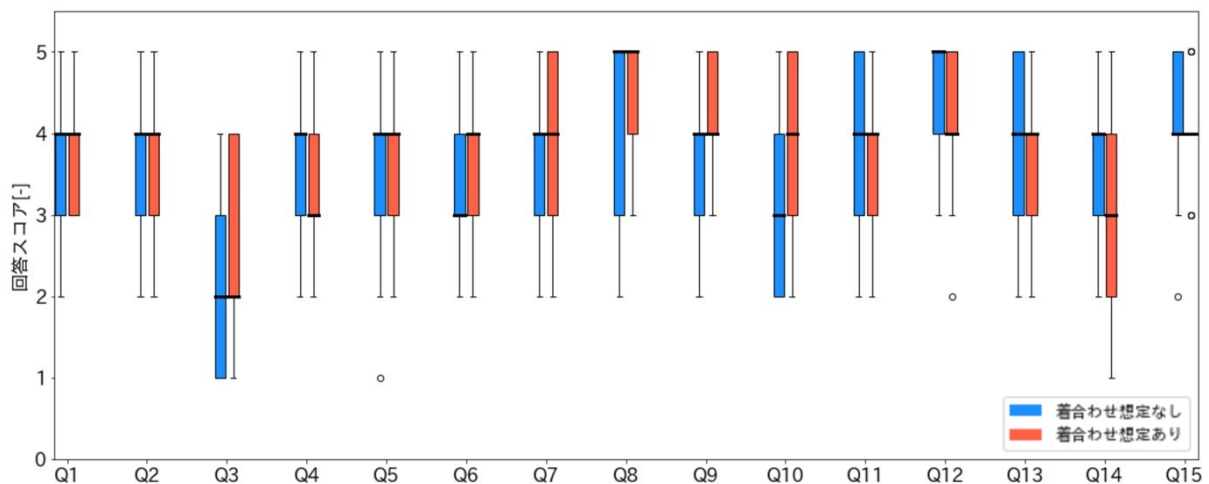


図 5-19 質問項目毎の回答結果

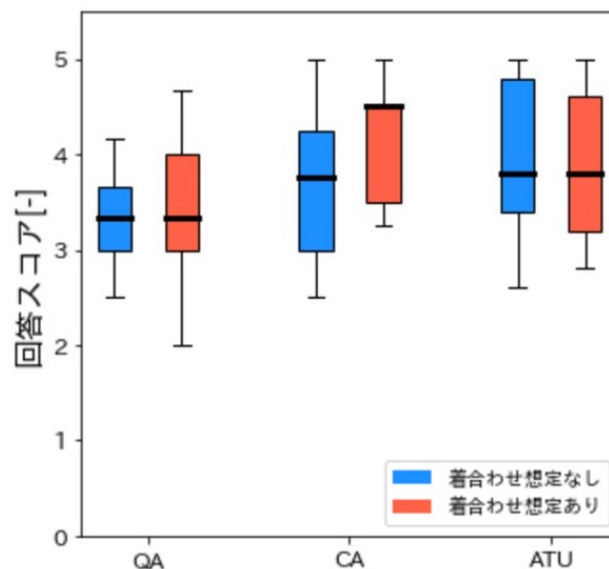


図 5-20 属性毎の回答結果

着合わせ想定ありのシステムを用いた場合に、被験者がTシャツに対してもつ印象は影響を受けるかどうか、を評価するために、条件②の順位づけ結果を基準として、条件①と条件③の順位づけ結果の、最大順位変動量 S_{\max} を計算し、比較を行った。条件②に対する条件①の順位変動は、着合わせ想定の有無と背面からの確認の有無によるものであり、条件②に対する条件③の順位変動は、背面からの確認の有無によるものであるとすると、条件②を基準として計算した、条件①と条件③の最大順位変動量 S_{\max} の差は、着合わせ想定の有無に起因するものである、として考え

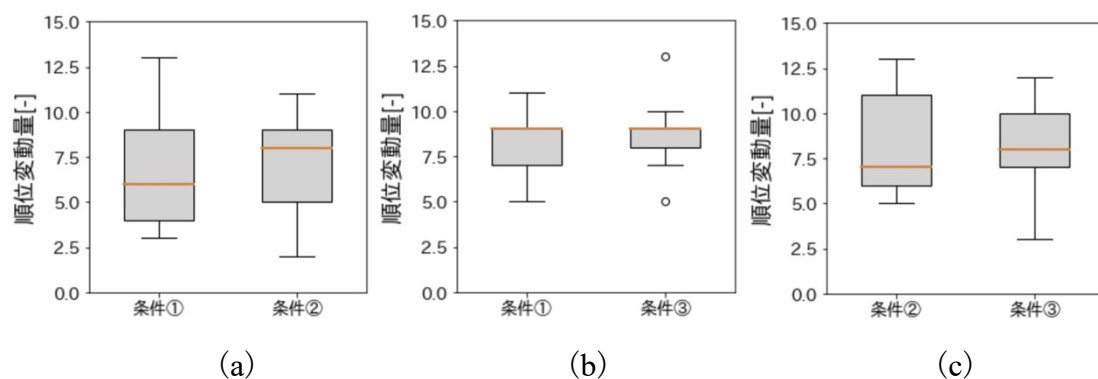


図 5-21 画像情報に基づく順位づけ結果との違い (T シャツセット全体) : (a) 条件①と条件② ; (b) 条件①と条件③ ; (c) 条件②と条件③の比較結果

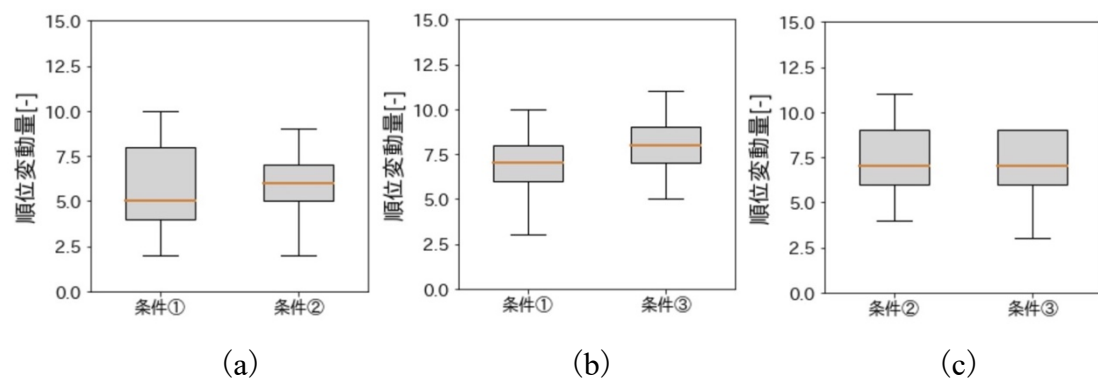


図 5-22 画像情報に基づく順位づけ結果との違い (視点によって見え方が変化する T シャツ) : (a) 条件①と条件② ; (b) 条件①と条件③ ; (c) 条件②と条件③の比較結果

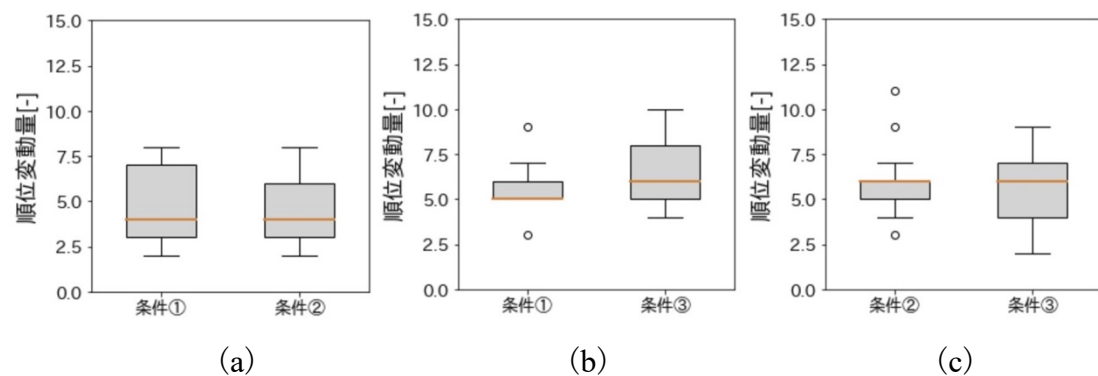


図 5-23 画像情報に基づく順位づけ結果との違い (背面のみに固有のデザインがある T シャツ) : (a) 条件①と条件② ; (b) 条件①と条件③ ; (c) 条件②と条件③の比較結果

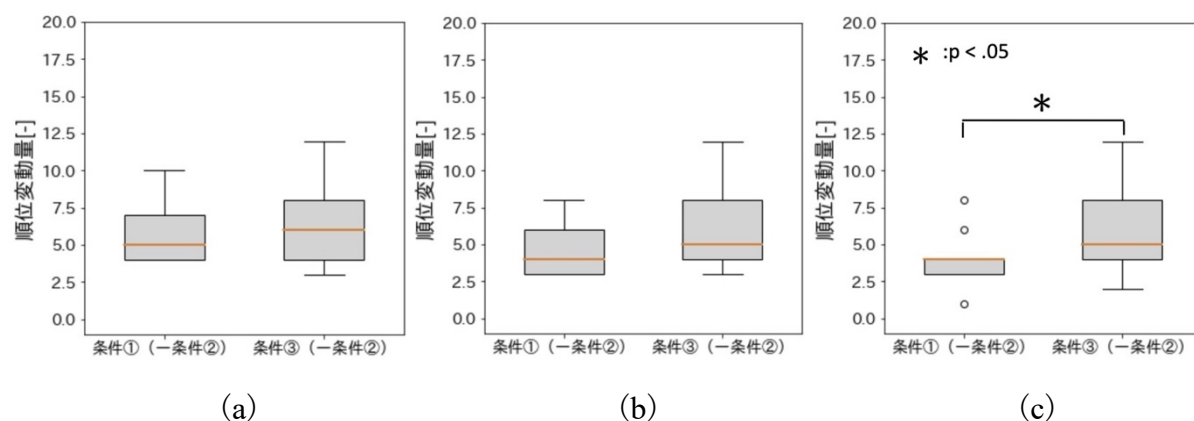


図 5-24 着合わせ想定の有無が T シャツの印象におよぼす影響：(a) T シャツセット全体；(b) 視点によって見え方が変化する T シャツ；(c) 背面のみに固有のデザインがある T シャツの比較結果

た．ここで，条件①において，前面のみから試着結果を確認した，4人の被験者の順位づけ回答結果は，除いて考えた．図 5-24 の左から順に，T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツ全体，視点によって見え方が変化する T シャツ (ID が 1, 2, 3 に該当)，背面のみに固有のデザインがある T シャツ (ID が 1, 3 に該当) を対象として，計算した最大順位変動量 S_{\max} の分布を，箱髭図によって示した．背面のみに固有のデザインがある T シャツを対象として，計算した最大順位変動量 S_{\max} の分布に関しては，2つの条件に関する箱髭図に差が見られたので，仮説検定を行った．今回のサンプル数は，13人の被験者から4人の被験者の結果を除いた，9サンプルであり，正規性の仮定を置くに満たないサンプル数であったため，ノンパラメトリック検定を選択した．さらに，対応ありの2群間の差の検定であることから，検定手法として Wilcoxon の符号付順位検定を選択し，両側検定を実施した．仮説検定の結果，背面のみに固有のデザインがある T シャツについての順位変動量に関しては，条件①と条件③の間で，5%の有意水準で有意差が確認できた．

5.2.4 考察

図 5-20 より、属性 ATU の評価については、システム間でのスコア分布の、大きな違いは確認できなかった。一方で、属性 QA と属性 CA の評価については、システム間で、スコア分布に違いが見られた。着合わせ想定ありシステムに対する属性 QA の回答スコアは、着合わせなしのシステムに対する回答スコアと比較して、分布の広がり大きい。図 5-19 の質問項目毎の回答スコアの分布を確認すると、属性 QA に対応する質問項目のなかで、Q3（多くの改善が必要であると感じた。）と Q6（製品を購入する際の補助として正確であると感じた。）に対する回答は、着合わせ想定ありのシステムの方が、高いスコアに全体の分布が寄っている様子がわかる。着合わせ想定ありのシステムでは、着合わせの試着結果を確認することに特化した機能を実装したので、着合わせ時の試着結果の正確性、という観点において、一定の評価を得ることができたと思われる。また、属性 QA に対応する質問項目のなかで、Q4（試着結果の外見を好む）に対する回答は、着合わせ想定ありのシステムの方が、低いスコアに分布が寄っている様子が読み取れる。試着結果の外見に関しては、着合わせ想定ありのシステムは、着合わせ想定なしのシステムよりも、実世界に基づいた情報とバーチャル情報の視覚的整合性が要求されるため、この点に関連する実装の不十分さが、本実験の評価につながったと考えられる。視覚的整合性の不十分さに繋がったと考えられる具体的な要素として、解像度、実世界のズボンに対するバーチャル T シャツの提示位置や大きさの精度、実世界の情報とバーチャルの情報の明るさや色味の不一致、などが挙げられる。着合わせ想定ありシステムに対する、属性 CA の回答スコアは、着合わせなしのシステムに対する回答スコアと比較して、高いスコアに分布が寄っている様子がわかる。図 5-19 の質問項目毎の回答スコアの分布を確認すると、属性 CA に対応する質問項目のなかでも、Q9（使用を通して、システムをコントロールできていると感じた。）に対する回答は、着合わせ想定ありのシステムの方が、高いスコアに分布が寄っている様子が確認できる。着合わせ想定ありのシステムでは、実世界の情報を確認する場合と同様に、ユーザが実世界の衣服とバーチャル衣服の着合わせの結果を確認できるような実装を行ったため、システムのコントロールのしやすさ、という観点において、一定割合の被験者から評価を得ることができたと考えられる。

図 5-21, 5-22, 5-23 より, T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツ全体, 視点によって見え方が変化する T シャツ, 背面のみに固有のデザインがある T シャツいずれの組み合わせにおいても, 画像に基づいた順位づけとの間に, 特筆すべき傾向を確認することができなかった.

図 5-24 より, T シャツセットに含まれる 5 着の T シャツ全体および視点によって見え方が変化する T シャツについては, 着合わせ想定の有無によって, 被験者が T シャツに対してもつ印象の変化は確認できなかった. 一方で, 背面のみに固有のデザインがある T シャツについては, 着合わせ想定の有無によって, 被験者が T シャツに対してもつ印象が変化することが, 示唆された. これは, 従来の実店舗における試着や日常生活のなかで, 自身の姿を背面から確認する機会は少ないことが, 大きく影響したと考えられる. 実際に, 着合わせ想定ありのシステムを用いて, 背面の試着結果を確認している際の被験者からは, 背面からの結果を見ることによって, T シャツに対して抱いていた元々の印象が変わった, という意見を多数得た. 本実験の結果を踏まえて, 着合わせ想定ありのシステムを利用することによって, 実店舗での試着や, 従来の **Virtual Try On** システムを用いた試着とは異なった観点に基づいて, 購買意思決定を行えることが, 示唆された. ただし, 本実験の結果によって示されたことは, 着合わせ想定ありのシステムを用いることによって, 衣服に対する印象が変化した可能性のみである. したがって, 着合わせ想定ありのシステムの利用にともなう印象の変化が, 実際の購買意思決定に与える影響の是非については, さらに踏み込んだ評価実験を, 今後実施する必要がある.

5.2.4.1 自由記述アンケート

着合わせ想定なしのシステムを利用した条件①と, 着合わせ想定ありのシステムを利用した条件②の全試行が終了した直後に, 自由記述アンケートの回答を, 被験者から得た. 以下に 2 つのシステムに対する回答結果を示す.

着合わせ想定なしのシステム

- ・細かい色の判別が難しかった.
- ・写真だけを見ているとわからない感覚を得ることができた.

- ・前と後ろを自由に確認できるのは順位つけをする役に立ちました。ただ、自分が回転しないといけないのは少し大変でした。
- ・ズボンと洋服の色味を合わせやすかったので、服の着合わせが本当に似合っているかどうかの判別がしやすかった。
- ・参考になることは間違いなかった。服屋で鏡を前に服を見ている感覚があったので、リモートショッピングではあった方が嬉しいとは思いました。
- ・画像と実際に試着する際の T シャツの色が一致しているとより使いやすくなると思いました。
- ・ズボンの色が実際と違う気がした。後ろ向きの時に、ズボンを逆側に持つのが面倒。
- ・概ねの外観がこのアプリケーションで表現できていると感じる。特に色合いのマッチングに関しては十分に評価できると思う。また、AR で服を試着できるという体験自体レアなので、ウケが良さそう。ズボンをカメラ側に回さないといけないところは改善点かなと思った。明度がある程度以上の服は、画像と試着時で色が異なって見えるものがあり、少し違和感があった。

着合わせ想定ありのシステム

- ・暗めのズボンだと判別が難しいと感じる場面がありました。
画像と試着時の差を感じる場面がありました。
- ・視野が狭いのとそもそもレンズで隠れているので、自分の顔が見えなくて本当に似合っているかどうかを判別するのが難しかったです。
- ・服単体を画像として見ることも試着状態について参考になることは間違いなかったと感じた。その一方で色味、サイズ、布の質感は実際の服が届いた時に差を感じるような気がした。特に色味は HoloLens 越しだと暗く見えるので最も気になった。
- ・試着結果と画像で光の当たり具合が異なるのが気になった。
- ・より近くで大きく試着の様子が見られるの◎
- ・上半身と下半身が分離している感覚があったので不自然に感じた。
- ・最初的手法と異なり、リアリティという面で良いと感じた。多少のリアリティでここまで変わるかと思った。元の距離で見ると視野角的に難しかったが、

自由に調節でき、180cm くらいの距離で見るとちょうど良かった。

従来のオンラインショッピングのように、画像情報のみに基づいて、意思決定を下す必要がある状況と比較すると、着合わせ想定なしのシステムを用いた場合でも、実際のイメージが湧きやすい、との意見がいくつか見られた。着合わせ想定ありのシステムでは、実験前に意図したとおり、実世界の衣服との着合わせの様子をリアルに確認することができた、という趣旨のコメントが見られた。一方で、OSTHMD を介して、実世界の情報とバーチャル情報を組み合わせて見た場合に、明るさの違いに起因して、試着結果に対して不自然さを感じてしまった、という内容のコメントを多数確認できた。この点は、Virtual Try On システムに限らず、あらゆる複合現実感技術を用いたアプリケーションにとって問題となるが、視覚情報の品質が特に重要な意味をもつ、Virtual Try On システムのようなアプリケーションにおいては、今後優先的に取り組むべき課題である。

第6章 結論

6.1 結論

本研究では，試着結果提示用デバイスとして OSTHMD を用いた，バーチャル衣服の被着用者が人間である AR ベースの Virtual Try On システムを提案した．試着結果提示用デバイスとして OSTHMD を用いることによって，バーチャル試着体験中のユーザに対して，新たな2つの機能を提供することができる．1つ目は，試着結果を 360° 方向から自由に確認することができる機能である．これは，OSTHMD を利用することによって，試着結果の提示位置を，ユーザの動きに応じて動的に変更可能である点を活用した機能である．2つ目は，実世界の衣服とバーチャル衣服を着合わせた際の，試着結果の確認を可能にする機能である．これは，OSTHMD を利用することによって，試着結果を物理的な枠内だけにとどめることなく，実世界の情報と共に，ユーザに提示することができる点を活用した機能である．

システム性能評価では，試着結果としての合成画像を生成する際の，画像合成処理における既存の問題について，原因の究明および対応策の動作検証を実施した．検証の結果，ユーザが Kinect センサに対して，360° あらゆる方向を向いた場合でも，一定品質の試着結果を，ユーザに提示可能であることが確認できた．

ユーザビリティ評価では，試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムと，実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムを評価するために，被験者実験を行った．試着結果を 360° 方向から確認可能な Virtual Try On システムについての実験の結果，使い心地や有用性に関しては，従来システムよりも優れていることが確認できた．さらに，従来システムと比較して，試着結果の確認方向に起因する，姿勢の維持が困難な捻りや回転運動をとまなわないため，特に，背面の試着結果をゆっくりと確認できる点があることが示唆された．また，実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムについての実験の結果，システムの使用感の観点では，従来システムよりも優れた点は確認できなかったが，背面に固有のデザインがある T シャツについては，従来の Virtual Try On システムとは異なる印象をユーザに抱かせることが示唆された．

6.2 今後の課題

6.2.1 OSTHMD の導入にともなう問題の改善

本研究では、Virtual Try On システムの試着結果提示用デバイスとして、OSTHMD を利用することによって、バーチャル試着における新たな機能を実現した。一方で、被験者実験等を通して、OSTHMD の導入にともなう新たな問題も明らかになった。1つ目は、実環境における反射光の影響で、試着結果の視覚品質が低下してしまう問題である。2つ目は、実世界の情報に合わせて、試着結果の提示を行う際に、実環境に基づいた情報とバーチャル情報の明るさが異なるため、正確な試着結果の提示が困難になる問題である。3つ目は、OSTHMD を装着することによって、ユーザの顔が隠れてしまう問題である。OSTHMD を用いた Virtual Try On システムによって、より質の高いバーチャル試着体験を実現するために、以上の問題は今後の課題である。

6.2.2 着合わせの想定がおよぼす影響の実用面における有効性検証

ユーザが実世界の衣服との着合わせを想定した Virtual Try On システムを利用した際に、背面に固有のデザインがある T シャツに対して、従来システムとは異なる印象をもつことが、本研究において示唆された。ただし、本研究の実験結果から示されたことは、単なる印象の変化にすぎない。そのため、着合わせ想定ありのシステムの利用を通して得た情報が、実用面において有効である保証はない。今後は、着合わせ想定ありのシステムの利用にともなう、衣服に対する印象変化が、製品購買後のユーザの満足度につながるか等について、追加の検証を行う必要がある。

6.2.3 試着に関する情報品質の向上

本研究の Virtual Try On システムでは、試着時の視覚情報の再現のみを実装した。ただし、色味の相性を最低限確認できる程度の品質にとどまっており、衣服のより正確な色味、サイズ、生地感の再現など、改善の余地は多大にある。また、試着時の視覚情報の再現以外にも、広義の触覚情報についての再現も、非常に重要であり、具体的には、衣服の手触りや着心地の再現などが挙げられる。いずれの情報も、衣類製品に関する購買意思決定を下す場合に、ユーザにとって非常に重要な手がかりであるため、より高品質なバーチャル試着体験を実現するためには、今後取り組むべき課題である。

謝辞

本研究に取り組んだ2年間、指導教員である小川剛史准教授には、多大なご支援、ご協力をいただきました。研究テーマの決定から遂行に至るまで、学生の考えを最大限尊重していただいたお陰様で、伸び伸びと大学院生活を送ることができました。研究室配属当初は研究活動に関して真の素人でしたので、研究を進めていくなかで、数えきれないほどの困難に遭遇しました。しかし、途中で行き詰まった際には、研究室ミーティング外の時間を使って、些細な悩みごとまで、親身になって相談に乗っていただきました。約2年間の研究活動を通して、新しく意味のあることを発見することの難しさを実感できましたし、それ以上に、自律性を持って研究に取り組むことの楽しさを知ることができました。小川研での約2年間の経験は、今後の人生において貴重な財産になると思います。小川研に来て良かったです。ありがとうございました。

研究室メンバーにもお世話になりました。小川研同期の坪内君、長谷川君、森島君、タンさんには、小川研配属当初より仲良くしていただきました。研究に関する様々な助言をしていただきましたし、研究室で一緒になった際には、研究以外の会話を通して盛んに交流することができて、嬉しかったです。D1のパクさんには、修士生の経験では到底思いつかないような視点から、研究に関する様々なアドバイスをいただきました。M1の伊延君、角南君、菫澤君、宮澤君は、コロナウイルスの影響もあり、ミーティング外で交流できる機会は限られていましたが、献身的に被験者実験に協力してくれたこと、短い時間の中でも仲良く接してくれたこと、本当に感謝しています。

最後にはなりますが、修士の学生生活2年間を含め、これまで私を支えてくれた両親にも、感謝の意を述べたいと思います。ありがとうございました。

発表文献

国内会議（査読なし）

1. 北野 壮一，小川 剛史. “Virtual Try On のための衣服画像を用いた衣服モデル作成手法に関する一検討”，情報処理学会 第 182 回 CGVI 研究発表会，2021.
2. 北野 壮一，小川 剛史. “オンラインショッピングにおける購買体験を支援する拡張現実感技術を用いた Virtual Try On システム”，日本バーチャルリアリティ学会 第 74 回サイバースペースと仮想都市研究会，2022. (発表予定)

参考文献

- [1]経済産業省 商務情報政策局 情報経済課, “令和元年度 内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業（電子商取引に関する市場調査）”
- [2]Goolsbee, A. D. and Klenow, P.J.:INTERNET RISING, PRICES FALLING: MEASURING INFORMATION IN A WORLD OF E-COMMERCE, NBER Working Paper No.24649, 2018.
- [3] UNCTAD, “COVID-19 has changed online shopping forever, survey shows”, <https://unctad.org/news/covid-19-has-changed-online-shopping-forever-survey-shows>, 2020.1.10
- [4] Digital Commerce 360, “Charts: How the coronavirus is changing ecommerce”, <https://www.digitalcommerce360.com/2021/02/19/ecommerce-during-coronavirus-pandemic-in-charts/>, 2020.1.10
- [5]山田裕貴, 金森由博, 三谷純, 福井幸男: 体型を考慮した衣服画像の変形による画像ベース仮想試着システム, 情報処理学会研究報告, Vol.2014-CG-154, No.8.
- [6]関根真弘, 杉田馨, フランクペルベ: 仮想試着における体型推定を用いた衣服画像合成技術, 東芝レビュー, Vol.70, No.5, 2015.
- [7]Srinivasan, K., Vivek, S.:Implementation Of Virtual Fitting Room Using Image Processing, In Computer, Communication and Signal Processing(ICCCSP), 2017 International Conference, pp. 1-3, IEEE, 2017.
- [8]Shah, K., Pandey, M., Patki, S., Shankarmani, R.:A Virtual Trial Room using Pose Estimation and Homography, In Proceedings of the 2020 4th IEEE International Conference on Intelligent Computing and Control Systems(ICICCS), Madurai, India, 13-15 May 2020, pp. 685-691.

- [9]Han, X., Wu, Z., Wu, Z., Yu, R., Davis, S, Larry.:VITON: An Image-based Virtual Try-on Network, In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 7543-7552, 2018.
- [10]Wang, B., Zheng, H., Liang, X., Chen, Y., Lin, L., Yang, M.:Toward Characteristic-Preserving Image-based Virtual Try-On Network, In Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV), pp. 589-604, 2018.
- [11]Raj, A., Sangkloy, P., Chang, H., Hays, J., Ceylan, D., Lu, J.:SwapNet: Image Based Garment Transger, In Computer Vision-ECCV2018-15th European Conference, Munich, Germany, September 8-14, 2018, Proceedings, Part XII, pp. 679-695, 2018.
- [12]Dong, H., Liang, X., Shen, X., Wang, B., Lai, H., Zhu, J., Hu, Z., Yin, J.:Towards Multi-purpose Guided Virtual Try-on Network, In IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV, 2019.
- [13]Dong, H., Liang, X., Shen, X., Wu, B., Chen, B, C., Yin, J.:FW-GAN:Flow-navigated Warping GAN for Video Virtual Try-on, In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision(ICCVC), pp. 1161-1170, 2019.
- [14]Veneruso, V, S., Catarci, T., Ferro, S, L., Marrella, A., Mecella, M.:V-DOOR: A Real-Time Virtual Dressing Room Application Using Oculus Rift, In Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces, pp. 1-3, 2020.
- [15]Sekhavat, A, Y.:Privacy Preserving Cloth Try-On Using Mobile Augmented Reality, IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA, Vol.19, No.5, 2017.
- [16]Liu, Y., Liu, Y., Xu, S., Yuan, J., Sun, X., Cheng, K., Masuko, S., Tanaka, J.:3D Virtual Try-On System Using Personalized Avatars:Augmented Walking in the Real World, In the 13th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions(AHCI), 2020.
- [17]Xu, S., Yuan, J., Sun, X., Liu, Y., Liu, Y., Cheng, K., Masuko, S., Tanaka, J.:Augmented Reality Fashion Show Using Personalized 3D Human Models, In Human Interface and the Management of Information, Yamamoto, S., Mori, H.(Eds), Designing Information. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12184, Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-50020-7_31.
- [18]Giovanni, S., Choi, C, Y., Huang, J., Khoo, T, E., Yin, K, K.:Virtual Try-on using Kinect and HD camera, In Motion in Games, M, Kallmann., K, Bekris.(Eds.), Lecture Notes in Computer Science, vol. 7660, Springer, pp. 55-65, 2012.

- [19]Yousef, A, M, K., Mohd, J, B., Omari, A, M.:Kinect-Based Virtual Try-on System: A Case Study, IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology(JEEIT), Amman, Jordan, pp. 91-96, 2019.
- [20]Erra, U., Scanniello, G., Colonnese, V.:Exploring the effectiveness of an augmented reality dressing room, Multimedia Tools and Applications, 77(19), pp. 25077-25107, 2018.
- [21]Kusumaningsih, A., Kurniawati, A., Yuniarno, M, E., Hariadi, M.:User Experience Measurement On Virtual Dressing Room Of Madura Batik Clothes, Proceedings of the International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology(SIET), vol. 2018-January, pp. 203-208, 2018.
- [22]Kotan, M., Oz, C.:Virtual Dressing Room Application with Virtual Human Using Kinect Sensor, Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol. 5, pp. 322-326, 2015.
- [23]ROGGE, L., KLOSE, F., STENGEL, M., EISEMANN, M., MAGNOR, M.:Garment Replacement in Monocular Video Sequence, ACM Transactions on Graphics, Vol.34, No.1, Article.6, 2014.
- [24]Yoon, S, J., Kim, K., Kautz, J., Park, S, H.:Neural 3D Clothes Retargeting from a Single Image, arXiv preprint arXiv: 2102.00062, 2021.
- [25]Hayashi, Y., Masuko, S.:AteGau: Projector-Based Online Fashion Coordinate System, CHI'13 Extended Abstracts, ACM Press, pp.973-978, 2013.
- [26]Yuan, M., Khan, R, I., Farbiz, F., Yao, S., Niswar, A., Foo, M, H.:A Mixed Reality Virtual Clothes Try-On System, IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA, Vol.15, No.8, 2013.
- [27]Liu, Y., Liu, Y., Xu, S., Cheng, K., Masuko, S., Tanaka, J.:Comparing VR- and AR-Based Try-On Systems Using Personalized Avatars, Electronics, Vol. 9, No. 11, pp. 1-25, 2020.
- [28]Solem, E, J.(2013) : 実践コンピュータビジョン, 相川愛三 (訳) , オライリー・ジャパン
- [29]Chen, X., Zhou, B., Lu, F., Wang, L., Bi, L., Tan, P.:Garment Modeling with a Depth Camera, ACM Transactions on Graphics, 34(6):203, 2015.

- [30]Pons-Moll, G., Pujades, S., Hu, S., Black, M.:ClothCap: Seamless 4D Clothing Capture and Retargeting, ACM Transactions on Graphics, 2017.
- [31]Scholz, V., Stich, T., Magnor, M., Keckeisen, M., Wacker, M.:Garment Motion Capture Using Color-Coded Patterns, Computer Graphics Forum 24, 3, pp. 439-448, 2005.
- [32]White, R., Crane, K., Forsyth, D, A.:Capturing and Animating Occcluded Cloth, ACM Transactions on Graphics 25, 3, pp.881-889, 2006.
- [33]Bhatnagar, B, L., Tiwari, G., Theobalt, C., Pons-Moll, G.:Multi-Garment Net:Learning to Dress 3D People from Images, In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 5420-5430, 2019.
- [34]Zhou, B., Chen, X., Fu, Q., Guo, Kan., Tan, P.:Garment Modeling from a Single Image, In Computer Graphics forum 32, 7, pp.85-91, 2013.
- [35]Yang, S., Amert, T., Pan, Z., Wang, K., Yu, L, B, T., Lin, M, C.:Detailed Garment Recovery from a Single-View Image, arXiv preprint:1608.01250, 2016.
- [36]Xu, Yi., Yang, S., Sum, W., Tan, Li., Li, K., Zhou, H.:3D Virtual Garment Modeling from RGB Images, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR), pp. 37-45, 2019.
- [37]Hu, M, K.:Visual Pattern Recognition by Moment Invariants, IRE Trans. Information Theory, Vol.8, pp. 179-187, 1962.
- [38]服部雄一, 中澤篤志, 町田貴史, 竹村治雄: 3次元Huモーメント不変量を用いた時系列ボリュームデータの圧縮, 情報処理学会研究報告, 2006-CVIM-154(20).
- [39]OpenCV, “輪郭に関する更なる関数”, http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_imgproc/py_contours/py_contours_more_functions/py_contours_more_functions.html#contours-more-functions, 2022.1.10.
- [40]OpenCV, “構造解析と形状ディスクリプタ”, http://opencv.jp/opencv-2svn/py/structural_analysis_and_shape_descriptors.html, 2022.1.10.

付録 A 衣服モデル生成手法の定量評価

第3章で述べた衣服モデル生成手法について、定性評価を実施した。

A.1 定性評価

定性的な評価として、構築した線形モデルへの各寸法の入力値を個別に変化させた場合に、出力される T シャツの 3D モデルの形状変化を確認した。ただし、線形モデルの構築には、30 個の T シャツの 3D モデルとそれに対応する寸法値から構成されるデータセットを利用した。図 A-1 より、線形モデルの入力となる寸法値を個別に変化させた場合に、出力された T シャツの 3D モデル上の該当部位の形状が適切に変化している様子が確認できる。

A.2 まとめ

検討した手法を用いて、T シャツの画像から抽出可能な、寸法値に関する情報を基に、T シャツの 3D モデルの三次元形状構成を実現できる可能性が示された。また、本検討では、T シャツのような比較的単純な形状の衣服を対象としたが、今後は、その他の種類の衣服にも汎用可能な手法であるか、検証を行いたい。

本検討では、衣服モデルの作成手法のなかでも、特に三次元形状の構成に焦点を当てたが、Virtual Try On システムにおける利用を考えた場合、他の点についても考慮すべきである。まず、衣服の外観に関する情報としては、三次元形状の他に、表面の模様等にも重要である。そのため、衣服の 3D モデルの表面上へのテクスチャマッピングを、オンライン上の衣服画像等を基に、人の手作業に依らず実現する手法が理想である。また、リアルタイムアプリケーションとして、バーチャル試着を実現するためには、衣服の 3D モデルを、ユーザの動きに合わせて変形させる必要がある。そのためには、衣服の 3D モデルを動かす際に、制御対象となる骨格を埋め込むためのリギングや、リギングによって埋め込んだ骨格と衣服の 3D モデルを構成する各頂点の関連づけを行うウェイトイングなどの作業も必要である。現状では、リギングやウェイトイングなどの作業も、人の作業に依存するところが

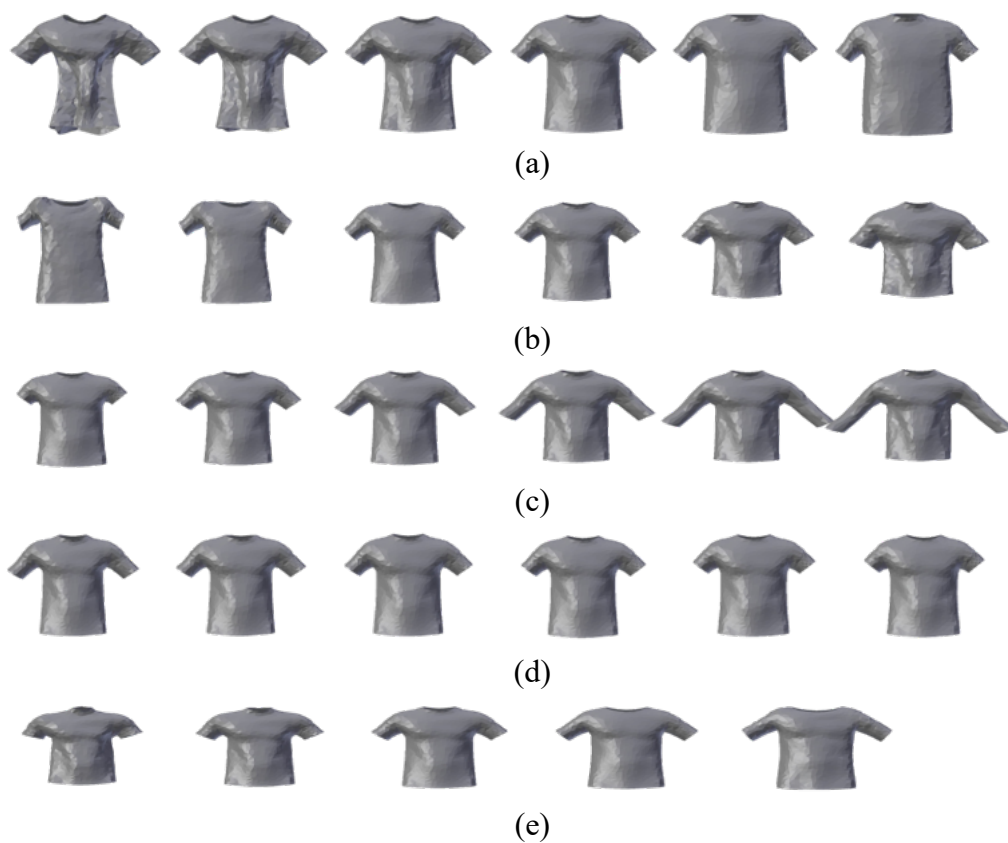


図 A-1 入力寸法値を個別に変化させた際の T シャツモデルの形状変化についての結果：(a)身幅；(b)肩幅；(c)袖丈；(d)袖幅；(e)襟幅

多く、さらなる Virtual Try On システムの普及に向けては、自動化できることが望ましい。