

コンシューマ・システム論文

人が柔軟性を有する実体物とのインタフェースを行うための
マーカ視覚認識のみによる力覚フィードバック方式宇佐美 真^{1,a)} 杉村 博¹ 一色 正男¹

受付日 2016年9月30日, 採録日 2017年2月27日

概要: バーチャルリアリティ (VR) は, 技術の進化にともない市場急成長が期待されている. ヘッドマウントディスプレイの高機能化に代表されるように, 視覚に向けた映像出力の技術が実用化されてきた. 次なる VR への要求として手や指を使ったアクションを VR 映像上のコンテンツにフィードバックするインタフェース技術の重要性が認識されている. しかし, 既存手法におけるジェスチャのようなアクションを認識する方式は物理的反力がないため映像変化と, 手や指の感覚齟齬に起因する違和感が発生しやすい. そこで, 柔らかい実体物 (柔軟物) は, 外力を加えられると形状変化するという点に着目した. 指で押し込まれた周辺の歪みを観測することから力覚を推定し, 指が感じる反力として提示する方式を検討する. 実体物と重ねて表示されるバーチャル映像に力覚インタラクションの結果を同調して反映することで, 視覚と力覚が整合すると考えられる. その結果, 違和感が縮小すれば VR コンテンツの臨場感向上の効果が期待できる. そこで本稿では指の感じる反力を提示するために, 柔軟物の弾力性を活用する. 柔軟物が押し込まれた周辺の歪曲度合いを視覚認識するため, 柔軟物の表面に形状自由度特性を有する 2 次元 L 字型のマーカ装着を施した力覚提示装置を開発した. この装置が指で押し込まれるときに発生する形状変化をカメラで視覚認識することで力覚量を推定し, VR システムにフィードバックする方式を提案する. 指の押し込みと同調して発生するマーカの歪曲度合いを観測するための実装を行い, 実験では XY 座標軸におけるマーカ位置変位量からユークリッド距離を求めることで柔軟物の歪曲度合いを推定し, 力覚量に相当する数値をシステムにフィードバックすることが可能なことを確認した.

キーワード: バーチャルリアリティ, VR, 力覚フィードバック, 力覚提示, マーカ

A Method of Force-sensation Feedback by Visual Marker Recognition
in Order for Human to Interface with Soft-material ObjectsMAKOTO USAMI^{1,a)} HIROSHI SUGIMURA¹ MASAO ISSHIKI¹

Received: September 30, 2016, Accepted: February 27, 2017

Abstract: Virtual Reality (VR), rapid growth of the market is expected due to the evolution of technology. Image output technologies are commercialized for the sense of vision as represented by highly featured head-mounted displays. An importance as a next requirement of VR is recognized, which is the interface technology to feed back the action using hands and fingers into content on VR images. However, in an existing method to recognize actions such as gestures, since there is no physical reaction force, a sense of discomfort is likely to occur due to inconsistency of the image changes and the finger, hand sense. We focus attention on a soft-material object (soft object), which is distorted by external forces. We study a method to estimate force-sensations by observing the perimeter distortions where the soft object is pushed down by a finger, and to display a reaction force sensed by the finger. It is assumed that the sense of vision and the force-sensation are consistent by reflecting the result of force-sense-interactions, synchronized with displayed virtual images to be overlapped with real objects. As a result, the discomfort is reduced, and an effect of improved realism in VR content is expected. Therefore, in this paper, in order to display the reaction force which is sensed by the finger, we develop a force display device by utilizing the elasticity of the soft object. The device is equipped with a two-dimensional L-shaped marker, which incorporates shape-flexibility-characteristics on the surface of the soft object in order to visually recognize the distortion degree of perimeter where is pushed by the finger. We propose a method that is fed back to the VR system by estimating force-sensations quantity by a camera, which recognizes shape-changes occur to be in the force display pushed by the finger. We implemented a method to observe the distortion degree of the marker to be generated synchronously with pushing down the finger. In the experiment, the distortion degree of soft object was estimated by calculating the Euclidean distance from the displacement quantity of marker positions in the coordinate axis at XY, and confirmed that it was possible to feed numerical values which is equivalent to force-sensations back into the system.

Keywords: virtual reality, VR, force-sensation feedback, force display, marker

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) の技術がゲームを中心に教育や観光などの分野でも導入が進み、新しいサービスが続々と登場しており市場も飛躍的に拡大すると予測されている。PC ベースの VR システムである Oculus Rift [1] が本格的 VR システムとして実用化され、Google Cardboard [2] に代表されるスマートフォンをヘッドマウントディスプレイ (HMD) に装着して使う簡易型 HMD 方式の登場で、身近にあるデバイスを活用して容易にシステム構築できるようになってきたことから、家庭やモバイルで使用するコンシューマ利用においても VR 体験可能な環境が整ってきた。これまで、VR システムでは HMD のヘッドトラッキング情報を映像にフィードバックする方式が普及し、視覚に対するコンテンツ表現が先行して実用化されてきた。

今後、HMD 上のコンテンツを体験するとき、あたかも目の前に存在するように感じられる映像上の物体に対し、触る、押す、掴むといった触覚をともなうインタラクションの欲求発生は人の自然な反応とみられる。それらが実装されることでゲームコンテンツなどの臨場感が高まると考えられるが、視覚表現に比べて実体物との触覚インタラクションは実用化の遅れが認識されている。触覚インタラクションを実現するには、バーチャル映像上の物体とのインタラクション結果を VR システムにフィードバックする必要があり、触覚を伝える物理的インタフェース手段が必須と考えられる。本稿では五感における広義の「触覚」の 1 部とされる「力覚」に着目する。

人気ある VR コンテンツの 1 つとしてホラーゲームが存在する。VR ホラーゲームは人が HMD を装着して体験する際、人に恐怖感を与える仕掛けを 360 度全方位の映像に施すことが可能なことから、仕掛けに人が対峙するときヘッドトラッキング情報を 360 度映像に活用できる点において VR に適したコンテンツである。HMD に装着されたスマートフォンのカメラで、Augmented Reality (以降 AR) への応用として AR 用途に広く用いられるビジョンマーカである AR マーカ [3] の認識を行う。ジェスチャを、指先に着けられた AR マーカの認識でトラッキングしながらシステムへフィードバックする方式の実施例がある (BotsNew VR) [4]。ジェスチャによりゲーム上の映像とインタラクションしながらゾンビとの戦いや、生死の区別がつかない臥位状態の人をジェスチャで押ししたり触れたりすることでゲームが進行する。このとき、指で押すアクションにともない AR マーカの視覚認識で動きが反映されたとしても、ジェスチャだけでは実体物とのインタラクション

のような反力が感じられないため違和感が発生する。

上述したホラーゲーム例においては、反力の必要な物体は人やゾンビであるが実世界に存在する物体の形状や硬さは様々であり、着衣、ゴム、スポンジ素材などは柔らかい物体 (柔軟物) が多種多様に存在する。対象が剛性を有する物体 (剛体) の場合、動的に形状が変化しないため物体の視覚認識は AR マーカ装着の従来手法で実現されるが柔軟物の場合、形状が動的に変化するため特定物体を形状だけから認識し続けることは容易ではない。

そこで指を柔軟物に押し込んだとき、形状が動的に変化した場合でも認識が継続できる形状自由度特性を有するマーカを利用する方式を検討する。変形状態を装着された形状自由度を有するマーカの歪曲量からカメラの認識画像により把握できれば、指に反力を感じさせながらマーカの歪曲量に基づいた力覚提示が可能になると考えた。提示された力覚推定値を、バーチャル映像にフィードバックし、視覚と力覚の統合がなされることでゲームコンテンツの臨場感向上が期待できる。

本稿では、家庭やモバイルで活用できるコンシューマ向け VR 用途を想定して論述する。人と実体柔軟物とのインタラクション時に、バーチャル映像上での視覚と、反力として感じる力覚の不整合に起因する VR 体験時の違和感縮小を目的とする。目的実現のために力覚提示装置を開発し、カメラによる視覚認識で取得された力覚推定値を、VR システムに含まれる描画プログラムへフィードバックすることで、バーチャル映像の変化へ反映する方式の提案および、各種実験結果について報告する。

2. 関連研究

力覚フィードバック手法は、力覚提示装置の開発とともに多数の研究がなされており、ゲームのようなエンタテインメント目的だけでなく、医療、教育など様々で分野にわたっており、柔軟物とのインタフェースに関しても研究がなされている。本章では、方式による分類を行いながら、関連する研究について論述する。

文献 [5] では、人の感覚の中で、物を押ししたり引いたりするときの抵抗覚と、物を持つときの重力によって生じる重量覚を、深部圧覚と分類している。深部感覚に刺激を与えることが力覚提示 (フォースディスプレイ) と定義されており、力覚提示と触覚提示 (ハプティクスディスプレイ) は、ほぼ同義語として用いられるが、本稿では力覚提示と表現する。さらに、文献 [4] では、力覚提示の構成手法として下記 1) から 3) の方式にまとめている。また a) 接地型、b) 非接地型という分類の方法もある。

1) 道具媒介型方式とは、ペンやボールなどの把持部を媒介にして力覚提示を行う。VR に応用されたものとして代表的なものは SPIDAR [6], [7] がよく知られている。人が接触する部分に糸を用いるため軽量に作れる

¹ 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

a) michaelusami0730@gmail.com

一方、糸は推力を発生できないためサイズが大きくなり、接地型であるためモバイル用途には不向きな方式である。

- 2) エグゾスケルトン (外骨格) 型とは、人の体、腕、手や指に装着する形態でアクチュエータ付きの機構を持っており、たとえば、各指に独立の力を提示しながら仮想物体を掴んだり押ししたりする感触の提示が可能である。文献 [8] では、人の作業感覚を力覚フィードバックすることができる人間装着型インタフェースが提案されている。ウェアラブル装置であり非接地型に分類されるが、この方式は装置が大がかりであり着脱が容易でないためストレスを感じやすく家庭用やモバイル用途に向いているとはいえない。
- 3) 対象指向型とはインタフェースデバイス自体が変形や移動することで、仮想物体の形状を模擬する方式である。体に装着物がないので、人体にストレスが低いというメリットが考えられる。

文献 [9] では、対象指向型に分類される Haptic Screen 方式が提案されている。映像ディスプレイの下部にセンサと直動アクチュエータが取り付けられた方式で、映像に直接触れる感覚が得られる点を特徴とするが、大がかりな装置が必要で接地型に分類されるため、モバイルや家庭用途に活用するのは難しいとみられる。

Google 社が発表した Daydream [10] は、モバイル VR 用プラットフォームで、ワイヤレスの専用コントローラが付属され、スマートフォン内蔵の HMD を装着した状態で VR システムをボタン、ジョイスティックでコントロールして結果を映像に反映させることができる。これは、非接地型に分類され、コントローラ上の物理ボタンの抗力は一種の力覚提示装置といえる。しかしながら、柔軟物の力覚提示とフィードバックには対応していない。

文献 [11] では、シリコンの柔軟シートを用いた視覚触覚ディスプレイ方式が提案されており、VR システムを利用して医師が患者の身体や患部といった柔らかい物質に関して、形状、弾性などの感触をシステムにフィードバックすることを目的としている。対象指向型に分類される、この方式ではシートの両サイドに配置されたアクチュエータがシートを引っ張る方向にバイアス張力を加え続け、指をシートに押し込むときのめり込み感により柔軟物を押すことに近い感触が提示可能な点で優位性があるが、アクチュエータなど大がかりな仕組みが必要であり、接地型であるため可搬性も考慮されておらずモバイル性を考慮したコンシューマデバイスとして実現するのは難しいとみられる。

1章で参照した AR マーカを視覚認識でトラッキングする手法 [4] では AR マーカが剛体に装着されることしか想定されておらず、形状が変化する柔軟物の力覚フィードバックはできない。

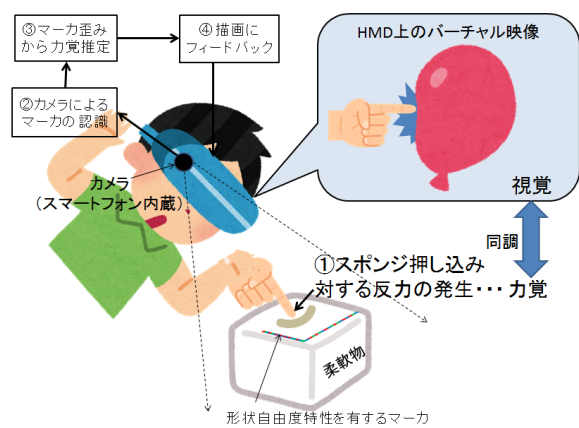


図 1 力覚フィードバックシステムの概要
Fig. 1 Overview of force-sensation feedback system.

3. 提案手法

本章では、人の柔軟物との力覚インタラクション結果を提示し、システムにおけるバーチャル映像に反映させるための力覚フィードバック手法と、それらを実行する VR システムについて提案する。1章で記述したホラーゲームの例のように、人が柔軟物を手に持つ、または把持する状態においてバーチャル映像上の物体に相当する実体柔軟物を指で押し込むことにより反力を感じさせる状況を想定する。

柔軟物を押し込んだときに指から加えられる力に応じて形状が変化する。そこで、押し込まれた周辺の形状変化をカメラで視覚認識することで指が柔軟物に対して反力を感じながら、力覚提示ができるのではないかと考えた。本稿では、柔軟物に形状自由度特性を有するマーカを装着し、マーカをスマートフォンなどのカメラで視覚認識することで、装着されたマーカの歪曲度合いから力覚を提示する装置を開発する。力覚の推定結果を VR システムに含まれる描画プログラムを経由し、バーチャル映像にフィードバックする方式を提案する。なお、本稿ではモバイルや家庭用といったコンシューマ用途を想定するため、コンシューマグレードのデバイスのみでシステム提案を行う。

本稿で使用する用語の説明を下記に示す。

- 「押し力」とは、柔軟物が指で押し込まれたときの力を意味する (単位: N)。
- 「反力」とは、本稿においては、指で柔軟物を押し込んだときに押し力と同時に発生する人の受容感覚を定性的表現として使用するものとする。
- 「押し下ストローク」とは、柔軟物が押し込まれた距離の変位を意味する (単位: mm)。

図 1 に本章で提案する力覚フィードバックシステムと、視覚との整合に関する概要を示す。

- ① 体験者がスポンジを指で押し込むことで、スポンジの押し込まれた周辺が歪曲してマーカが変形する。
- ② スマートフォンに内蔵されたカメラでマーカが認識さ

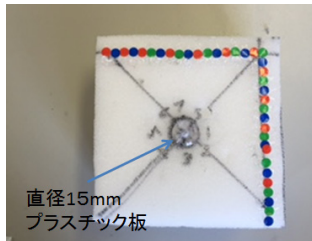


図 2 スポンジ素材
Fig. 2 Sponge material.

れる。

- ③ マーカの歪み度合いから力覚を推定する。
- ④ 指が押し込んだ動作に相当する力覚推定値を描画プログラムにフィードバックし、HMD のバーチャル画像の変化として反映する。

上記の①のときに体験者は指を押し込むことで反力を感じている。③で反力に相当する力覚が推定されて、④でバーチャル映像に押し込みに対応する変化が同調して視覚にフィードバックされる。そこで視覚と力覚の整合により VR システムの臨場感向上効果が見込まれる。

3.1 力覚提示装置で用いる柔軟物の選定

実体物とインタラクションする可能性がある体の部位は手、指、足などに存在する。まず使用頻度が高いとみられる手の親指の力覚に着目して提案と実験を行う。

指の力覚インタフェースを実現するための力覚提示装置に使用する柔軟物の選択条件として、可搬性を考慮して軽いこと、様々な対象柔軟物の形を模して成形するための加工性、指の柔軟物への押す力に対して適当な弾力性を持つこと、およびコンシューマ用途を想定し入手性の容易さを考慮してポリエチレン、ポリウレタン素材のスポンジを候補にあげる。

スポンジを人の親指で押し込む際、親指の形状や大きさには個人差があるので、それを考慮する必要がある。また、指など押し込む側の素材が柔軟性を持つと表面触覚に相当する摩擦の影響が出てくるため、力覚との切り分けが難しくなる。本稿では力覚のみの提示に着目する。そこで、スポンジ（押し込まれる側）と押し込む側の素材の間に発生する摩擦の影響を抑制するために、図 2 のようにスポンジ上に剛体樹脂素材である円形プラスチック板を装着して測定を行う。圧力 Pa は、式 (1) のように円形面積の 2 乗あたりのニュートン力 (N) で現すことができる。

$$Pa = N/m^2 \tag{1}$$

実験の再現性を得るために定型サイズの剛体プラスチック板を使用して、押下ストロークの変化に対する押す力の関係を測定するときの面積を一定にする。指の押し込みにもないスポンジが押し込まれたときの中心における押下ストロークをスケールで測ることで、特定素材における押



図 3 カラービット (CB)
Fig. 3 Colorbit (CB).

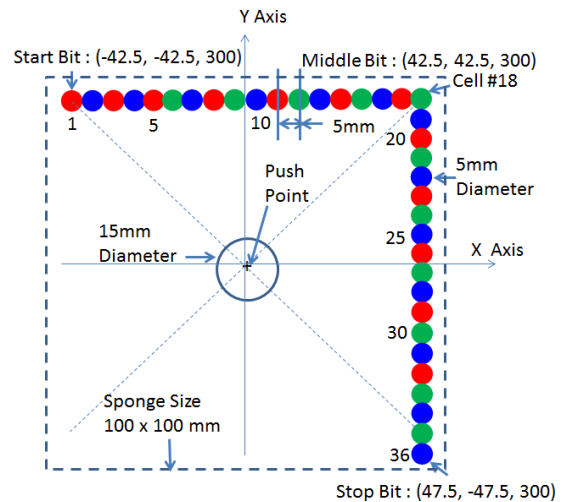


図 4 L 字マーカの設計
Fig. 4 Design of L-shaped marker.

す力と押下ストローク量の実験で明らかにする。

3.2 力覚提示装置の開発における視覚認識マーカ

スポンジが押し込まれた周辺の歪曲にとまらぬ形状変化をカメラで認識するために、形状自由度特性を持つマーカとしてカラービット (CB) [12], [13] と呼ばれるデータタグ方式を活用する。CB は、文献 [14] で論述されるとおり、形状を自由に变形することが可能で、複数タグの同時認識性を有し、赤青緑のセルと呼ばれる構成要素を連結することでビット列を構成しコード化する特徴を持つ。QR コード [15] などに代表されるデータタグや、幅広く AR 用マーカとして使用されている ARToolKit [16] では位置を基準にビット配列を構成し視覚認識するが、CB では、図 3 のように赤青緑セルの色遷移を 1 または 0 のビット列として先端セルから後端セルまで順番に読み取っていくため、視覚認識は位置や形状に依存しない。

これらの特徴を利用して図 4 にスポンジ素材に装着する CB を 90 度の角度を持って L 字型に変形し、3 次元姿勢推定することを考慮して 2 次元化を行ったマーカ (L 字マーカ) の設計図を示す。

また各セルの大きさを同じにして、スポンジ素材の周辺に並べることにより、手や指でマーカが視覚認識に対して隠れてしまうというオクルージョン問題を小さくできるようにした。CB はデータタグであるため、マーカとして使用されたときでも複数同時に区別して視覚認識することが可能である。さらにデータタグとして付帯情報を紐づけて

おくことでマーカーから力覚提示装置の各種属性を理解することも可能である。

L字マーカーの周りに多彩な色の印刷がなされていたとしても、条件を満たしてコードとして成立しない場合はマーカーとして認識させないため混色して誤読を起す懸念がないのも、この方式の利点と考える。ただし、マーカーは他の印刷に対して、クワイエットゾーンと呼ばれる無彩色のエリアを周辺に配置してマーカーとそれ以外の色を区別する必要がある。図4においては、各セルの周辺が白色のクワイエットゾーンとして動作する。セルの一部は、エラー訂正ビットとして割り当て、36個のセルがチェックサムの条件を満たさない限りマーカーとして成立しないようにして誤読対策とする。複数セルの集合体を、1つのマーカーとして成立させるため画像上でマーカーが歪曲したとしてもマーカー認識が成立している限り各セルの変位量計測がマーカー全体の3次元姿勢推定と同調して継続できる。

3.3 力覚提示装置の提案

1章では、実体物と力覚インタラクションを行うには人との物理的インタフェースが必要であると説明した。このとき実体物と人のインタラクション時に発生する力覚量を提示する装置は、力覚提示装置と呼ばれる。2章で比較した他の力覚提示方式は、アクチュエータなど電源が必要な動力を使うアクティブ方式が主流である。一方、スポンジの弾性を活用して力覚提示を行う本稿のような方式は、電子制御をとまなわないパッシブ方式の力覚提示装置としてPassive Force Display (PFD)と表記する。2章で記した分類では、対象指向型に分類され、接地型および非接地型の両方で使うことが可能である。

スポンジ素材平面にL字マーカーを装着することで、対象指向型の力覚提示装置(スポンジ型PFD)を構成する。指で押し込まれたスポンジ素材の歪曲度合いを、L字マーカーを構成する各セルの位置変位として視覚認識する。スポンジ素材に押し込まれる力によってセルの位置が変位するため、セル位置の変化量を、相当する力覚量として提示する方式を提案する。

スポンジ型PFDは、片手でのインタラクションを想定し親指で押し込む動作の容易性を考慮して100×100×50mmのサイズとし、100×100mmのポリウレタンスポンジ平面にL字マーカーに装着する。図4のようにL字マーカーを36個のセルで構成し、赤、緑、青それぞれのセルサイズはすべて直径5mmの円形とする。100mmのスポンジ端とマーカーの間にクワイエットゾーンを設けた。またL字マーカーの90度、折れ曲がり部分でセルが衝突して混色しないように円形セルを採用する。

カメラのイメージセンサ表面と正対し、レンズの主点とL字マーカーの中心位置座標が一致する状態を図5に示す世界座標系でマーカー全体の回転Rotation(0, 0, 0)、並進

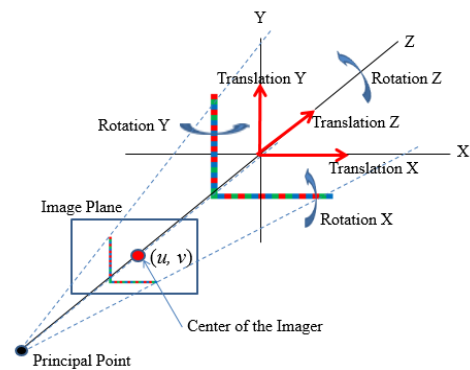


図5 世界座標系
Fig. 5 World coordinate system.

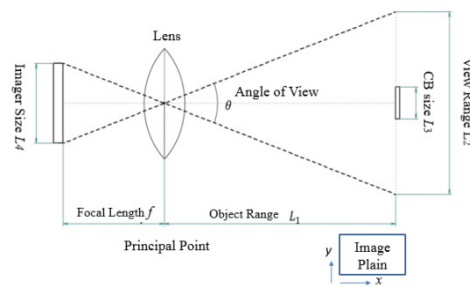


図6 ピンホールカメラモデル
Fig. 6 Pin-hole camera model.

Translation(0, 0, 300)と定義する。並進のZ=300は、カメラとマーカーの距離が300mmを意味する。ここでは、スポンジが指の押し込みにより歪曲したときにおけるセル位置の変位測定を想定する。このとき図4において、仮説として指で押しポイントを押し込んだとき、36セル中における、セル番号1, 18, 36などに比べて、9, 10付近のセルはY軸マイナス方向へ、26, 27付近のセルはX軸マイナス方向への位置変位が大きいのではないかと考えた。そこで、指によりスポンジを押し込む前の各セル位置と、押し込んだ後の変位した位置の差を、スマートフォンのカメラに内蔵されるイメージセンサ上におけるピクセル座標の変化として認識し2次元平面における各セルの位置変位を観測する。

3.4 L字マーカーと視覚認識と姿勢推定

36セルで構成されるL字マーカーにおける各セルの位置推定と、マーカーおよび、マーカーが装着されたスポンジ型PFD(以降、PFDと記述する)の姿勢推定は以下の手順で行う。

まず、カメラがL字マーカーを探して認識し、スマートフォンに実装されたデコードソフトウェア(デコーダ)でL字マーカーを切り出してデコードしたのち、各セルの位置を求めることで、カメライメージセンサ上における、L字マーカーの3次元姿勢の推定値および、各セルそれぞれの2次元座標値を得る。なお焦点距離(fx, fy)(単位:ピクセル)は、図6に示すピンホールカメラモデル[17]を使って

レンズ画角から式 (2) と式 (3) によりデコーダが計算して求める。

$$f_x = \frac{L_4x}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \quad (2)$$

$$f_y = \frac{L_4y}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \quad (3)$$

主点 (Cx, Cy) は、イメージセンサの中心として式 (4), (5) (単位: ピクセル) で定義される。

$$c_x = \frac{L_4x}{2} \quad (4)$$

$$c_y = \frac{L_4y}{2} \quad (5)$$

デコーダに L 字マーカのセルサイズ, セル数を入力することで各セルの位置座標 (X, Y) 値が返されるようにプログラム実装する。本稿の方式では, 柔軟物の押下ストロークによる力覚フィードバックに着目して論述するが, PFD をコントローラと見立てると PFD 自体の並進と回転の 6 軸姿勢情報の取得も可能である。OpenCV [18] を用いて, L 字マーカの 3 次元姿勢推定が可能であることは, 筆者らの研究文献 [14] で確認されている。L 字マーカの場合, 図 4 に示す先頭ビットに相当する 1 番セル, L 字型折れ曲がり部分に配置される 18 および, 最終ビットの 36 番セルの 3 ポイントの位置が分かればマーカが装着された PFD 自体の 3 次元姿勢推定が可能である。

また, L 字マーカは, 文献 [19] に述べられているように, 複数同時認識も可能であるため, 複数の PFD を, 1 つのカメラで認識することも可能であり, 1 人が両手それぞれに PFD を持つ, または, 複数人数が持つ PFD による提示結果を同時に視覚認識することも可能である。

3.5 VR システムのフィードバック方式

本稿で提案する適用例を図 7, システム構成を図 8 に示す。紙とプラスチックレンズで構成される簡易カードボード型 HMD, カメラを内蔵したスマートフォン, L 字マーカが装着された PFD および実装されたソフトウェアのみで構成される。VR ゲームシステムでの応用システムフロー例を図 9 に示す。

VR ゲームは人のアクションをとまなうことが多いが, 特殊な状況を除くと, 安全性に配慮して椅子に座った状態での使用が推奨される。没入状態では現実世界に存在する実体物を視認することができないため, 実際のゲームをスタートする前に, カメラをビデオスルーモードにセットし HMD 装着時に現実世界が視認できるようにする。次に, PFD 上の L 字マーカをカメラが撮像し実装されたソフトウェアで認識された時点で没入モードに遷移する。このとき, マーカのデコードが行われると同時にマーカにおける 36 個の各セル位置を推定する。

次に, L 字マーカの前頭である 1 番セル, マーカの折れ



図 7 適用例

Fig. 7 Example of application.

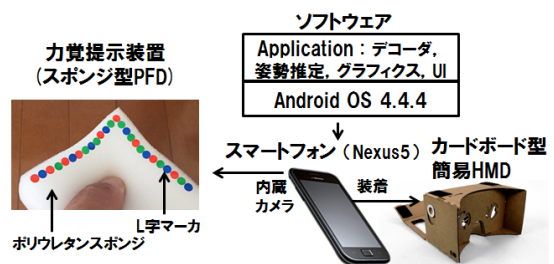


図 8 システム構成

Fig. 8 System structure.

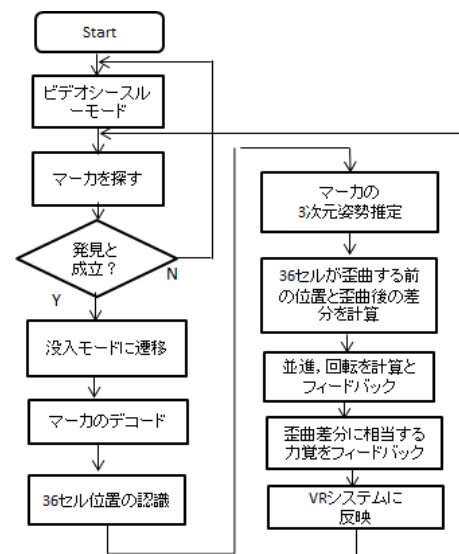


図 9 VR システムフロー

Fig. 9 VR system workflow.

曲がり地点の 18 番セル, 後端である 36 番セルの 3 セル重心から OpenCV の関数を用いてマーカの並進, 回転値を計算し PFD 全体の 3 次元姿勢推定を行うことで, 柔軟物に重ねあわせて HMD 上にバーチャル映像を表示するためにカメラとマーカの位置関係を表す 3 次元姿勢情報を取得する。また, PFD の中心を指で押し込んだとき, スポンジの歪曲にとまなう 36 個のセル重心を X, Y 座標値の変化として取得し, 変化量を力覚推定値としてユークリッド距離に変換する。

押下ストローク量とセル位置変位量の関係は柔軟物の素材に依存するため事前に計測しておくものとする。L字マークは3.2節で説明したとおり、データタグの要素を有するためPFDの素材に応じた属性情報を事前にコンピュータに記憶させておくことで、セル配列情報からPFDの区別と属性情報の紐付けを可能とする。

PFDの3次元姿勢を理解させるために回転と並進値、およびユークリッド距離で表現される力覚推定値をVRシステムのコンピュータ内に実装される描画プログラムにフィードバックする。描画プログラムはHMD上のバーチャル映像に姿勢と力覚推定の変化を反映する。

VRシステムでの描画処理後、図9のルーチンがルーピングされて途切れなくL字マークが認識されるようにする。L字マークがカメラ認識範囲から外れたとき、没入状態からビデオシースルーモードに遷移するようにする。

体験者はPFD（この場合スポンジにマークを装着した実体物）を押し込むとき反力を感じる。同時にHMDに装着されたスマートフォンのディスプレイパネルに描画されるバーチャル映像が歪曲する動きとして視覚で受容されるため、視覚と力覚の整合により違和感の縮小がもたらされVRシステムの臨場感向上効果が見込まれる。このシステムでは、実空間における柔軟物の姿勢推定と、柔軟物を指で押し込んだときの反力に相当する力覚推定値が1個のカメラで認識されるため、姿勢と力覚の認識が同調して行われることも特徴である。

3.6 他の応用想定例

3.5節ではVRゲームでの想定システムを論述したが、以下の1), 2), 3)に他の応用想定例を示す。

1) 触診など医療技術のトレーニング

医師が触診や開腹時に内臓をさわることを人体ではなく、柔軟性を有する模型で行うトレーニングシステムへの応用が考えられる。皮膚や内臓に見立てた柔軟性を有する模型にマークを装着して、物体を指で押し込む反力を感じながら、力覚推定値を描画プログラムにフィードバックすることで、HMDに表示される内臓などを表現したコンピュータグラフィックスの動きに反映する。人体の代わりに模型を使うことで、トレーニングを容易にする可能性がある。

2) ロボットアームの制御

ロボットアームが柔軟物を潰さずに加減しながら掴んだり押ししたりする作業の実用化は容易ではない。そこで、マークの歪曲量の推定から力覚が推定できた場合、ロボットが柔軟物に対して適切な力加減を持って作業できる可能性がある。視覚認識の場合オクルージョンの問題があるが、マークを複数装着することで問題は軽減できるとみられる。

3) 従来式のゲームコントローラやマウスなどに代わるコ

ンピュータとのインタラクション装置への適用

柔軟物をコンピュータに対するコントローラと見立てることで、従来式の入力デバイスと異なるインタラクション方式の創出が期待できる。人がコントローラとインタフェースするとき、指などに反力を与えながら人の微妙な力覚情報をコンピュータにフィードバックできる可能性がある。さらに、スポンジのような素材のPFDは軽量でかつ、ケーブルや電源を必要としないため手に持ってコントローラを操作するとき3次元姿勢推定値を使って6軸の姿勢制御を可能とし、さらに力覚推定を含めることで多様な人の感覚を表現してコンピュータにフィードバックする新しいインタラクション装置の実現が期待できる。

4. 実験

本章では、まず柔軟物として使用するスポンジ素材を検証し選択する。L字マークをスポンジに装着し、指でスポンジを押し込んだときの押下ストロークにともなうマークの歪曲度合いを、マークを構成する36個のセルの位置変化として計測する。柔軟物に対する視覚認識方式で力覚提示が行われ、力覚フィードバックが可能であることを確認する。

L字マークが歪曲していないときにおける6軸の回転、並進値を取得し、3次元姿勢推定は3章で述べた手法により行い実験時におけるPFDをカメラのイメージセンサと正対させるための位置調整に利用する。

4.1 PFDとしてのスポンジ弾力特性

指でスポンジを押し込むとき力覚をともなってマークの歪曲度合いを計測する実験に適した素材を選択する必要がある。そこで実験で使用するための素材を複数検討した。ポリウレタン素材（図10-A）とポリエチレン素材（図10-B）を比較すると、ポリウレタン素材では指の押し込みに柔軟かつ均一に素材が変形しているが、ポリエチレン素材では指の押し込みにともなう均一性が低いことが分かったため本稿の実験ではポリウレタン素材を採用し、持ちやすさを考慮して大きさを100×100×50mmとする。また、3.1節で説明したようにPFDの中心に押し込む場

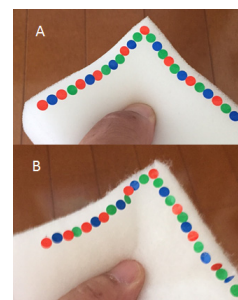


図10 ポリウレタンとポリエチレンの比較

Fig. 10 Comparison of polyurethane and polyethylene.

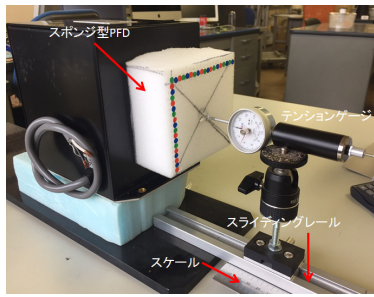


図 11 スポンジ柔軟度の測定系

Fig. 11 Measurement environment of sponge softness.

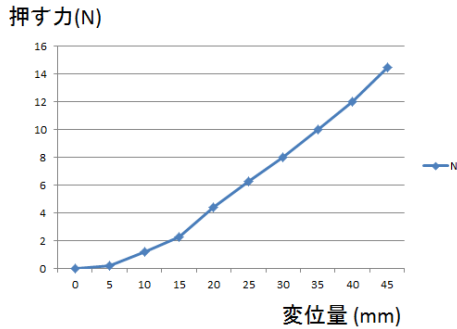


図 12 スポンジ柔軟度の測定結果

Fig. 12 Measurement result of softness of sponge.

所 (プッシュポイント) としてプラスチック板を装着する。親指の爪の指先方向に平行な 2 分の 1 サイズのポイントで指幅を 10 人計測して平均をとったところ 21.4mm であった。そこで指幅の 70% が押し込みに寄与すると近似して直径 15mm の円形プラスチックを使うことにする。

スポンジ素材を押し力に対する形状変位量を明らかにする目的で、押下ストローク量と押し力の関係を計測するために図 11 の実験装置を用意した。PFD とテック社製のテンションゲージ PPN-705-20 を設置して PFD のセンターポイントを押し込んだときのスポンジ素材の押下ストロークと押し力の関係を測定した。

プッシュポイントには直径 15mm のプラスチック製の円形板を装着しテンションゲージは円形板の中心をスポンジ型 PFD の平面に対してプッシュ装置で鉛直方向に押し込むようにした。5mm 間隔でスポンジを押し進め、そのときのニュートン力 (N) 値を計測した結果を図 12 に示す。横軸はスポンジの押下にもなう変位量 (押下ストローク)、縦軸には押し力を示す。5N 程度の力を加えてスポンジが変形し始めることが分かり、その後は、変形にもなう押下ストローク量に対して、おおよそニアに N 値が変化した。この実験結果から使用したスポンジ素材における、N 力あたりの押下ストローク量が確認できた。なお、ポリウレタンスポンジ素材は、イノアックコーポレーション社製、商品名は、カラーフォーム ECZ, CAS No. 9009-54-5 を使用した。

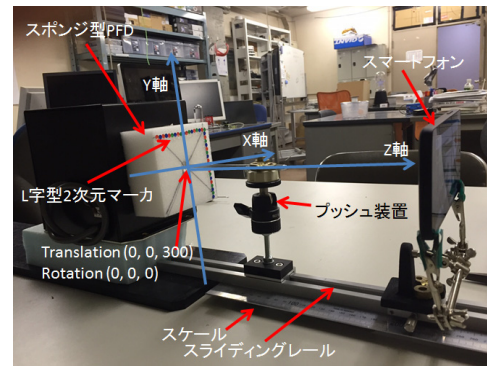


図 13 実験装置

Fig. 13 Experimental equipment.

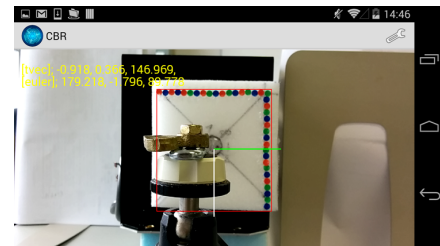


図 14 押ししていないときの状態 (0 mm 変位)

Fig. 14 Before pushing sponge (0 mm stroke).

4.2 PFD 歪曲度合の視覚認識

PFD が指で押し込まれたときの歪曲度合いを L 字マーカの構成要素である 36 個セルの位置変位から推定する目的で図 13 の実験装置を用意した。押下ストロークにともなう各セルの X, Y 方向の位置変位を測定した。実験装置では Nexus5 スマートフォンを装着し実験台に固定することで世界座標系においてマーカの姿勢が並進 (0, 0, 300), 回転 (0, 0, 0) になるように調整した。並進 Z 値の示す 300 はマーカが歪曲していない状態でマーカとカメラの距離が 300mm であることを示す。スマートフォンのカメラ画角を図 6 に示すピンホールカメラモデルで推定したところ水平 58 度、垂直 36 度であった。カメラのピクセル数は水平 1280、垂直 720 に設定した。このとき、1 ピクセルあたりの分解能はピンホールカメラモデルを用いて水平 0.25 mm、垂直 0.27 mm と計算される。

図 13 の実験装置に装着されたスケールで押下ストロークを測り、カメラで L 字マーカを視覚認識しデコーダおよび OpenCV を含め、スマートフォンに実装したソフトウェアで各 36 セルの位置変位量を測定した。図 14 に示すスマートフォンのスクリーンショットは、押下ストローク 0mm 時の状態である。その後、5mm ごとに 35mm まで 36 セルの X, Y 方向における位置変位量を測定した。図 15 に押下ストローク 35mm 時のスクリーンショットを示す。スポンジの周辺にグラフィクス表示した赤い枠線は、コード条件を満たし L 字マーカとして成立したときに表示されるようにプログラムした。また、世界座標にお

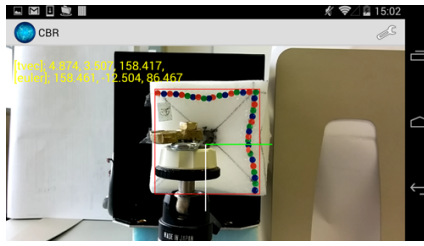


図 15 35 mm 押し込んだときの状態
Fig. 15 Pushing 35 mm in stroke.

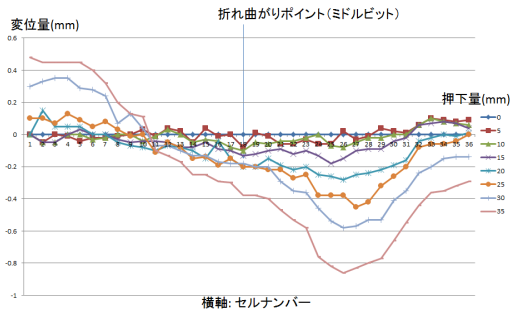


図 16 X 軸方向のセル位置変位
Fig. 16 Displacement in X axis.

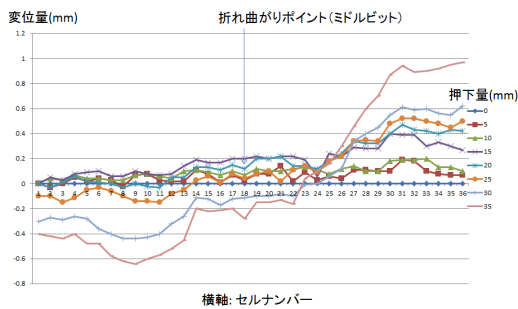


図 17 Y 軸方向のセル位置変位
Fig. 17 Displacement in Y axis.

るセンター位置を示すために黄色と緑色で構成される L 字型のグラフィクスも同時に表示した。図 14 と 15 を比較すると 35 mm ではスポンジに加えられた力から L 字マークに明らかな歪曲が確認された。

4.3 セル位置変位量の測定結果

スポンジの歪曲量と押す力の相関を評価する目的で 36 セルそれぞれの X, Y 方向の位置変位量の測定を行った結果を図 16 に X 軸方向, 図 17 に Y 軸方向として示す。押す力と押下ストローク量は図 12 の実験結果から 5 N 以上で比例するものとして近似する。

横軸は左から順番にセルの番号を示す。1 から 18 番セルまでは X 軸と平行にセルが並んでおり, 19 から 36 番セルまでは Y 軸と平行にセルが並んでいるため, 18 と 19 番セルの間で L 字マークが 90 度折れ曲がる。縦軸には 5 mm 単位で押下ストロークを変化させながら PFD を押し込んだときのセルの位置変位量を表す。

図 16 の結果から 19 から 36 番セルの間において 26 番セル付近に極小値が観測された。これは, 19 から 36 番セルが Y 軸と平行に配列されているため X 軸方向の位置変位が顕著にみられたものと考えられる。押下ストローク量が, 10 mm までは明確な位置変位が観測されないが 15 から 35 mm では押下ストロークに相当する押す力と位置変位量に明確な相関がみられた。相関がみられた押下ストローク範囲である 20 mm を有効領域とすると, 視覚認識の最小計測限界が 0.25 mm (水平) であることから, 分解能は 80 段階あることが分かる。また, 1 番セル付近においても位置変位が観測された。1 番セルが X 軸方向に位置変位しているのは 1 と 18 番セルの間隔が縮小しているとみられ, 0 と 35 mm の押下ストロークにともなう位置変位を比較すると 35 mm の押下ストローク時に 0.48 mm 縮小しており 0.53% の位置変化量であった。

図 17 の結果に着目すると 1 から 18 番セルの間において, 9 番セル付近に極小値が観測された。これは 1 から 18 番セルが X 軸と平行に配列されているため Y 軸方向の位置変位が明確にみられたものと考えられる。ストローク量が 20 mm までは明確な位置変位が観測されないが 25 から 35 mm では押下ストロークに相当する押す力と, 位置変位量に相関がみられる。相関がみられる押下ストローク範囲である 10 mm を有効領域とすると視覚認識の最小計測限界が 0.27 mm (垂直) であることから分解能は 37 段階あることが分かった。また, 36 番セル付近においても位置変位が観測された。36 番セルが Y 軸方向に変位しているのは 19 と 36 番セルの間隔が縮小しているとみられ 0 と 35 mm の押下ストロークにともなう位置変位を比較すると 35 mm の押下ストローク時に 0.96 mm 縮小しており 1.0% の位置変化量である。

図 16 と図 17 を比較して, X 軸と Y 軸における傾向の相違に着目すると X 軸方向の 26 番セル付近よりも Y 軸方向の 9 番セル付近の位置変位が明らかに小さいことが分かる。これは, 図 14 のスクリーンショットを目視することでも確認できる。一方, 1 と 36 番セル付近を比較すると, Y 軸方向の位置変位が大きい。これらの結果から, このスポンジ素材には組成に起因する配向特性や, それにともなう切り出し方向による歪曲度合いの違いがあるとみられる。

図 18 では, X, Y 変位量をユークリッド距離で表現してみた。1 から 18 番に比べて, 19 から 36 番セルの方が押下ストロークの有効範囲が明らかに広いことが観測される。このスポンジ材料が Y 軸方向に対して柔軟であると評価された。

本章での実験結果から, PFD を視覚認識することで, 押し込まれた周辺の歪曲度合いが数値化され, その分解能が求められたため, 力覚推定値としてシステムにフィードバックできることが確認された。

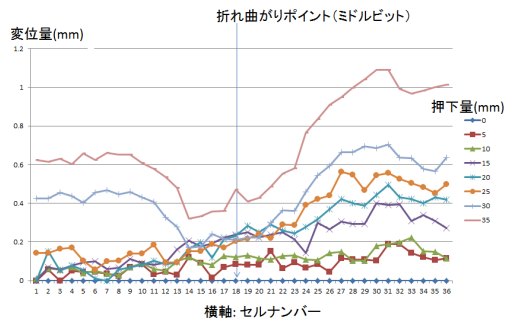


図 18 ユークリッド距離による評価
Fig. 18 Evaluation by Euclidean distance.

5. 考察

PFDF方式はバッテリーやケーブルが不要、可搬性が高いためモバイル用途に適すと考えられる。また、体に大きかりな装置を着けたり外したりといった負荷や手間がかからないため人へのストレスが低く、一般コンシューマ用途に活用しやすいと考えられる。

PFDFのプッシュポイントとして装着されたプラスチック円形板の素材については、人の指の弾力性に近いとされるシリコンやソルボセイン素材 [20] の採用も考えられるが、押し込む側と押し込まれる側の両方に柔軟素材を使うと、表面触覚に相当する摩擦の影響が出てくるとみられ、押し側の力覚量に特化した推定が難しくなると考えられる。そこで本稿では、押し込む側の力覚提示に着目し、押し込まれる側の柔軟物素材の違いに依存する特性を比較評価することは将来の課題とする。

押し込む側と押し込まれる側の摩擦の影響を抑えるために押し込む側のプッシュポイントには剛体のプラスチック板を使用した。この場合、押し込まれる側の素材が変更されたときでも、押し込む側の力覚推定値を素材ごとに比較しやすいとみられる。

押し込む側の観点においては、より人の指と弾性が近い素材としてシリコンやソルボセインをプッシュポイントの素材に採用する評価も今後必要と考えられるため、将来の研究課題とする。

本稿では、PFDFを押し込むときゲームでの適用として最も使用頻度が高いとみられることから、代表して親指での実験を行った。他の指では形状の違いにより押し込み時の接触面積が異なるため、押下ストロークに対して推定される力覚値も異なることが予想される。今後、他の指への適用を検討する場合、形状の違いに応じて接触面積を考慮する必要がある。このとき、たとえば人差し指で押し込むことが決められている場合は、親指で押されたときと同じ力覚推定値がフィードバックさせるようにキャリブレーションする方式が考えられる。

もう1つの考え方として、親指と人差し指で接触面積の相違を事前に理解しておくことにより、押す力を一定にし

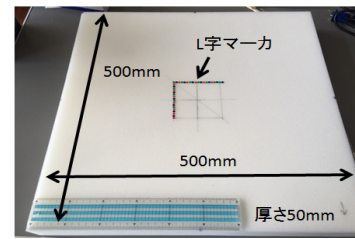


図 19 無限平面に相当するスポンジ
Fig. 19 Sponge corresponding to infinite plane.

たときの力覚推定値を比較することで、どの指で押し込まれたかをコンピュータが推定する方法として活用できる可能性がある。

複数本の指の力覚をPFDFの活用で推定することは難易度が高いと考えられる。セル位置変位をきわめて精緻に認識する必要があるためカメラの高解像度性が必要条件であり、さらに、機械学習などの手法を用いて大量の押し込みデータを蓄積・分析することで多様なパターンでの指の押し込みに対応できる可能性がある。他の指や複数本の指への適用は将来の研究課題とする。

カメラによる視覚認識では、一般的にオクルージョン問題が避けられないが、細長くセルを配列できる特徴を有するCBをマークとして活用した。スポンジ型PFDFの周辺部にL字形状に細長くセルを配列することでオクルージョンが起りにくくするよう工夫した。また、複数のスポンジ型PFDFを、1つのカメラから同時に認識できるため、複数人数でPFDFを操作しながらゲームを楽しむような用途も想定されることが適用範囲の拡大に貢献できると考えられる。

本稿では直方体のスポンジ型PFDFを用いたが実世界には様々な形状を持つ柔軟物が存在するので、L字マーカの形状自由度特性を活用して、実体物の形態を模した形状でPFDFを作成するためにボリューム曲面を有するボール形状、円形物体など異なる形状物体での評価を行うことは今後の課題と考える。100 × 100mm (押し込む面) のスポンジ型PFDFを使用した時、無限大平面にL字マーカが装着されたときとスポンジ自体に周辺歪曲がみられる100 × 100mmサイズでは、マーカ歪曲度合いに違いがみられる可能性が高い。そこで、図19のように500 × 500 × 50mmサイズの同素材スポンジを用意した。中心にはL字マーカを装着して10N (35mmの押下ストロークに相当する力) でスポンジを押し込んだときスポンジ周辺に形状変化はまったくみられなかった。つまり、500 × 500 × 50mmサイズのスポンジではマーカの歪曲に対して周辺歪曲がみられないため、マーカ装着面は無限大平面と見なすことができる。そこで、厚さ50mmを一定にして縦横サイズを小さくしながらスポンジを10Nの力で押し込んだときの周辺長さを計測した結果を図20に示す。横軸はスポンジ型PFDFのサイズ、縦軸は押し込む前と、押し込んだときの

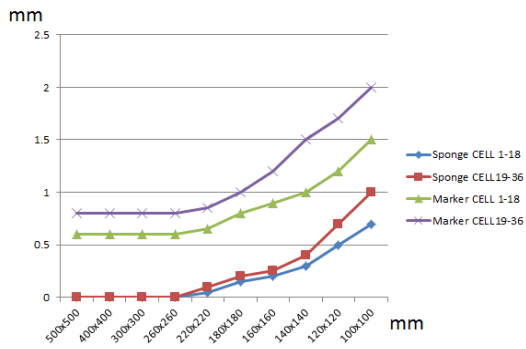


図 20 スポンジサイズと変位量
Fig. 20 Displacement in varied sponge sizes.

セル位置変位量の差分を示す。Marker CELL 1-18 は 1 から 18 番セルの中心間長さ，Marker CELL 19-36 は 19 から 36 番セルの中心間長さ。また，セル中心間長さと同様なスポンジ辺の長さを Sponge CELL として示す。結果から 260 × 260 mm より小さくなると，セル間長さの縮小にともないスポンジ辺の長さの縮小がみられる。この結果はセル位置の変位量に相当するスポンジを押す力から，スポンジの大きさが，限定された範囲で推定できることを示している。実世界に存在する実体物の大きさは様々である。柔軟物の大きさ情報を VR システムに反映させることで，実体物のサイズを VR 映像上の物体サイズとして表示するという新しいコンテンツ表現手法が創出できる可能性を示している。

6. おわりに

バーチャル映像上の柔軟物を指のジェスチャで押したとき，映像に歪みのような変化が生じたとしても指に反力が感じられない場合，視覚と力覚の不整合から違和感が発生するという問題に着目した。柔軟実体物に装着された形状自由度特性を有するマーカー (L 字マーカー) を利用して，カメラの視覚認識で力覚提示を行う装置 (PFD) を開発した。マーカーの構成要素である 36 個のセル位置変位量から力覚を推定し VR システムの描画プログラムにフィードバックする方式を提案した。

実験においては，指を柔軟物に押し込んだとき反力を発生させるためにスポンジ素材を採用し，指で押す力と押し込まれる量 (押下ストローク) の関係を計測して柔軟物の弾力性を数値化した。指で押し込まれた周辺に発生するスポンジの歪曲度合いに連動して変化する，各セルの XY 座標軸における位置変位量をカメラで認識し計測した。セル位置の変化量をユークリッド距離に変換することで，力覚フィードバックに必要な力覚推定値が求められること，および，推定値の分解能を実験で確認した。本稿での成果を VR システムに応用することで，指の押し込みから推定される力覚と，バーチャル映像の変化を受容する視覚の整合が体験者の違和感縮小をもたらす VR システムの臨場感向

上効果が見込まれる。加えてコンシューマグレードのデバイスのみを利用する本稿のシステムは，家庭やモバイル用途での VR 普及に貢献できると考えられる。

さらに，5 章の考察で述べたように，本稿で開発した PFD を用いると，VR 用途に限らずロボットアームや義手などが柔軟物とインタラクションを行うときの力覚提示にも応用可能とみられるため継続して研究を進めたい。

参考文献

- [1] Oculus Rift, available from (<https://www3.oculus.com/en-us/rift/>) (accessed 2016-08-21).
- [2] Google Cardboard, available from (<https://vr.google.com/cardboard/http://www.samsung.com/jp/product/gearvr/#gear-vr/>) (accessed 2016-08-21).
- [3] 神原誠之：基礎 1：拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論，情報処理，Vol.51, No.4, pp.367-372 (2010).
- [4] BotsNew VR, available from (<http://botsnew.com/>) (accessed 2016-08-21).
- [5] 岩田洋夫：ハプティックインタフェース，計測と制御，Vol.38, No.6, pp.391-396 (1999).
- [6] 佐藤 誠，平田幸広，河原田弘：仮想作業空間のためのインタフェース・デバイス—SPIDAR，情報処理学会研究報告グラフィクスと CAD (CG)，Vol.1989, No.109, pp.87-94 (1989).
- [7] 田島寛之，季 雨農，赤羽克仁，佐藤 誠：6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について，情報処理学会インタラクション 2014，pp.676-681 (2014).
- [8] 中井章人，國井康晴，橋本秀紀：7 自由度人間装着型 Haptic Interface の開発，日本ロボット学会誌，Vol.17, No.8, pp.1126-1133 (1999).
- [9] 岩田洋夫，市ヶ谷敦郎：Haptic Screen，日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，Vol.1, pp.7-10 (1996).
- [10] Daydream, available from (<https://vr.google.com/daydream/>) (accessed 2016-08-21).
- [11] 古川 剛，井上健司，前 泰志，田窪朋仁，新井健生：柔軟シートを用いた遭遇型の視覚触覚ディスプレイに関する研究，日本機械学会コンファレンス 2008，No.8-4, pp.1-4 (2008).
- [12] Kimura, A. et al.: United States Patent, No: US 8,113,432 B2 (2012).
- [13] Colorbit-Reference, available from (http://www.colorbit.jp/en/wp-content/uploads/2010/05/colorbit-reference_EN2.pdf) (accessed 2016-08-21).
- [14] 宇佐美真，杉村 博，三浦喬平，一色正男：人の動作に対してグラフィクスを高速かつシームレスに追従させる 3 次元 AR マーカーの開発，情報処理学会論文誌コンシューマ・デバイス&システム，Vol.5, No.4, pp.1-9 (2015).
- [15] QR コードドットコム，入手先 (<http://www.qrcode.com/>) (参照 2016-08-21).
- [16] ARToolkit, available from (<https://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>) (accessed 2016-08-21).
- [17] Hoiem, D.: Projective Geometry and Camera Models, *Computer Vision*, CS 543 / ECE 549, University of Illinois 2011, pp.1-57.
- [18] The OpenCV Reference Manual Release 2.3, available from (<http://www.opencv.org>) (accessed 2016-08-21).
- [19] Usami, M., Miura, K., Sugimura, H. and Isshiki, M.: 3D augmented reality marker expands workable fields of virtual reality action games, *IEEE 4th GCCE*, pp.306-310 (2015).
- [20] 飯田一郎，野呂影勇：肌評価技術のモデル化に関する研

究, 人間工学, Vol.33, No.3, pp.141-149 (1997).



宇佐美 真 (正会員)

神奈川工科大学大学院博士後期課程工学研究科電気電子工学専攻在籍. 株式会社リコー在籍. Ricoh THETA の開発に従事.



杉村 博 (正会員)

神奈川工科大学創造工学部ホームエレクトロニクス開発学科准教授. ホームネットワークや HEMS に, 人工知能技術を応用する研究に従事.



一色 正男 (正会員)

神奈川工科大学教授. 2012 年～JSCA-HEMS タスクフォースチェアマン. ECHONET コンソーシアム標準化に貢献.