

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の検討

宇佐美真^{†1} 杉村博^{†1} 一色正男^{†1}

バーチャルリアリティ(VR), 拡張現実(AR)は期待の大きい技術である。そこで、人の力覚や触覚とバーチャル世界をインタフェースすることは、VR, AR システムの臨場感を高めると考えられる。しかしながら、様々な形状、素材、柔軟性を持つ実体物に、人の触覚や力覚にて働きかけないことには、その情報を得ることが出来ないという難しさが存在する。現実世界には、実体物として、人の皮膚、着衣、または、スポンジ、ゴムといった日用品などの柔軟性を有する素材が、多々存在する。手や指は、敏感な触覚や力覚を持っており、これらの柔軟物とのインタフェースは極めて重要な要素である。本稿では、指の柔軟物に対する力覚を認識し、VR, AR システムにフィードバックすることに着目した。そこで、柔軟物を指の力で変形させる量を測定するために、物体に歪曲自由度特性を持つマーカを装着し、カメラの視覚認識のみで柔軟物の歪曲度合を推定する方式を提案する。指の押下にもなう、柔軟物の歪曲度合をシステムにフィードバックするためのコントローラを開発し、素材にはポリウレタン性のスポンジを選択し、マーカを装着した。スポンジに装着されたマーカの歪曲度合の変位と、指で押す力、及び、押すときのストローク量の相関を測定し、インタフェースの有効性を検証した。本方式では、コントローラには、ケーブルも電源も不要とし、手に持って容易に操作することに優位性がある方法にて、人が柔軟物に対し、力覚を感じながら、バーチャル世界とインタフェースする手段を実現した。

Study of a Feedback Method for Force Sensing by Only Visual Recognitions so that Human can Interface with Real Objects which are Made from Soft Materials

MAKOTO USAMI^{†1} HIROSHI SUGIMURA^{†1} MASAO ISSHIKI^{†1}

Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) is promising technologies. Then interfacing in between haptic force sense of human and virtual world enhances presence of VR, AR system. However it is difficult to obtain feedback information without forcing real objects by human haptic force sense, which the objects have various shape, material and flexibility. There are various types of soft material objects such as human skin, clothes and commodities such as sponges and rubbers in the real world. Since hands and fingers of human are really sensitive, and have haptic and force senses, it is a very important factor to interface with these soft objects. In this paper, we focus recognitions of finger force sense to soft objects, and feedback the response information to VR, AR system. Then in order to measure distortion quantity of soft objects forced by the finger, we propose a method to estimate distortion level of soft objects only by camera's visual recognition of an attached marker on the object. We develop a controller to feedback distortion level by the force of finger strokes to the system, and select polyurethane sponge material with the marker to structure the controller. Then we prove effectiveness of interface method by evaluating correlations of distortion level by the marker, push force of finger and finger stroke to push. In this method, the controller does not require any cable, battery, and can be manipulated by hand easily. As a result we achieve the interfacing method between virtual world and real world where human can feel force sense to soft objects.

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR), 拡張現実 (AR)は、ゲームや教育など、様々な分野に期待される技術である。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着することで、バーチャルに作り出された画像を没入状態、または、現実世界に拡張させた状態にて画像視聴することが可能になる。体験場所に存在する実体物と人間の力覚や触覚を VR, AR システムに対してフィードバックすることが、インタラクティブ性を向上し臨場感を高める上で重要であるため、実体物にインタフェースする手法が研究されており、VR ゲームにおけるゲームコントローラは典型的なインタフェースの例と言える。

人間が感覚で得る情報には視覚情報のような比較的受動的で遠隔的なものと、触覚や力覚情報のような能動的で近接的なものが存在する。後者については、人の感覚で、様々な形状、素材、柔軟性を持つ実体物に働きかけないことには、その情報を得ることが出来ないという問題点があ

げられる。実際にその情報を取得しようと物体に働きかけないことには、その情報を得ることは出来ない。

世の中に存在する実体物として、人の皮膚、着衣、スポンジ、ゴムといった日用品など、様々な柔軟性を有する素材で作られた物が存在する。手や指は、敏感な触覚や力覚を持っており、人の感覚をシステムにフィードバックする観点で、柔軟性を有する実体物(柔軟物)とのインタフェースは極めて重要な要素と考えた。そこで物体に対する人の力覚情報をバーチャル画像の世界における視覚フィードバックすることにより、力覚とバーチャル世界での視覚情報をリンクすることが重要であると考えた。文献[1]では、世の中は柔軟物であふれており、柔軟物の操作とモデリングについて論述されており、機械システムにおける柔軟物センシングの重要性が強調されている。

そこで人の皮膚や着衣、または、スポンジ、ゴムなど柔軟物を VR, AR システムにて、手や指で操作または押下するようなインタラクションを実現するのは容易ではないが、微妙な指の押下によるアナログ量をカメラの視覚認識

^{†1} 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

のみでセンシングして、VR、ARシステムにフィードバックする方式により応用範囲拡大と臨場感向上ができるのではないかと考えた。

また、文献[2]によると、人の手や指の力覚インタフェース方式には、接地型と非接地型に分類されるとされている。接地状態及び非接地状態の両方への応用可能性も検討したい。特に非接地で手持ち操作を伴う場合、軽さも重要な課題となる。応用例として、図1は、ポリウレタン性スポンジを指で押下したときのマーカの歪曲度を VR 用 HMD に装着されたカメラで視覚認識することで、人の指の力覚を VR システムへフィードバック可能なゲームコントローラとしての活用を想定してみた。スポンジ製のコントローラに電子制御が含まれず、軽量で、電池不要、かつワイヤレス式であるため、家庭やモバイル用途に利便性があると考えられる。また、VR 用途の場合、人は没入状態にあり、体験中はコントローラを視認することはなく、見た目のデザインに対しての配慮を低くすることが出来るため、コントローラの開発自由度が高まる可能性もある。

図2は、接地型力覚インタフェースの応用として、指圧技術の教育用を想定している。AR HMD を装着した人が、シャツに印刷されたマーカを AR HMD に付属するカメラで視覚認識し、マーカの歪曲量が AR システムに反映されることで、AR 画面では、人の筋肉の動きをバーチャル画像で表示するとともに、力覚を感じながら指の押下量に相当する力の数値を同時に見ることを想定する。人体にセンサなどを取り付けるリスクや負担を避けることが可能であるとともに、AR HMD とマーカが印刷されたシャツだけで容易に実現可能であるため、低コスト性を備えた教育用システムとして利便性が高いと考える。

本稿では、指の柔軟物に対する力覚を認識し、VR、AR システムにフィードバックしバーチャル世界へ反映するという目的に着目する。指の押下にとともなう、柔軟物の歪曲度を推定し、システムにフィードバックするという課題に対して、マーカの歪曲量をカメラの視覚認識のみで推定する方式と、マーカを装着したスポンジコントローラを開発した。力覚をとめない柔軟物を指で押す力、及び、押すときのストローク量とマーカの歪曲量の相関を評価し、インタフェースの有効性について論述する。

2. 従来手法

VR ゲーム分野において、没入型 HMD システムで先行している例として Oculus Rift[3]が挙げられる。Oculus Touch[4]のように電子制御されたゲームコントローラを接続することで手や指の動きをゲームに反映する実施例があるが、柔軟物の操作に対応していない。

Leap Motion[5]は手のジェスチャーなどを光学式センシング技術で認識するデバイスであり、Oculus Rift に接続して、前面に装着することでユーザインターフェースとして使用できる。しかし、物理的な操作物が存在しないため、人が物体を操作しているというリアルな力覚がない点に課題がある。

視覚認識によるマーカ方式の観点においては、AR 用途向け2次元マーカ方式として ARToolKit[6]が物体の姿勢推定に幅広く応用されているが、ARToolKit のマーカは正方形で作成され、物体が歪曲することが想定されていない点に課題がある。

文献[7]では、複数の AR マーカで物体平面の姿勢推定を実現しているが、手や指により歪曲された場合に有効な方式ではないため、マーカを柔軟性のある物体への適用は困難である。

文献[8]では、色情報を基にした、検出しやすくボケにロバストな符号化マーカ方式が提案されており、提案カラーマーカ方式が解像度ボケに関しての有効性が述べられているが、マーカ形状は円形のみ最適化されており形状自由度特性がないため、マーカの装着物の歪曲には対応しておらず、柔軟物への適用は困難である。

文献[9]で、カメレオンコードと呼ばれる色情報を用いる符号化マーカ方式が比較されているが、この方式は符号化ビットを表すカラーセルの枠の形状を基準にマーカを成立させるため、ARToolKit と同様にマーカ形状の歪曲に対して自由度やロバスト性を持たないため、柔軟性物への適用は困難である。

文献[10]では、形状自由度特性を持つカラービット(CB) [11, 12] と呼ばれる1次元カラーコードの一種をマーカとして活用して、高速動作物体の視覚トラッキング特性について論じているが、実体操作物の操作中の歪曲について記述がない。

文献[13]では、非接地型力覚インタフェースについて、ワイヤの皮膚感覚刺激による方式が述べられている。電子制御をとまなうため、この方式の場合、指のアクションから刺激が生じるまでの応答性を最小化することが難しく、電源が必要な点でも課題がある。

文献[14]では、非接地型のグローブを用いた触覚、力覚インタフェースを実現している。この場合、グローブを介して物体を触ったり押下したりする観点で、直接、手や指が実体物に接触できないという課題がある。また、文献中にショッカクキューブ[15]と呼ばれるスポンジを使った柔軟コントローラの活用が書かれており、スポンジが力覚をセンシングする素材として有効であるが、この方式の場合、人の肌などに装着して肌の変位を測るような認識は出来ない。



図1 VRシステムとコントローラ
Fig.1 Controller in VR system

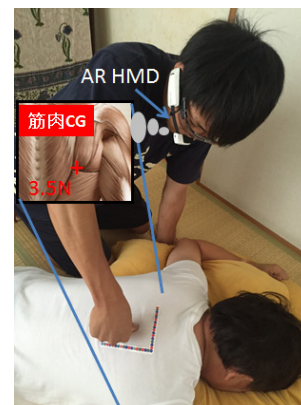


図2 指圧教育用 AR システム
Fig. 2 AR system for educations of massage

†1 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology

3. 提案手法

本章では、カラービット(CB)と呼ばれる形状自由度特性を有するカラーコードをマーカとして活用し、柔軟物へ装着することでマーカの形状変化に伴う、歪曲量を視覚認識し、指の力覚をともなう柔軟物への押下力、押下ストローク量とマーカ歪曲による位置変位の相関を推定し、VR、ARシステムへフィードバックする手法について述べる。

3.1. 柔軟性を持つコントローラの素材について

接地性の観点から、軽いこと、また、指の押下における圧力への力覚を感じながら、十分な押下ストロークが得られる柔軟物としてスポンジを検討した(スポンジコントローラ)。適用性の観点から日常品として広く使われており低コストで入手性の良いポリエチレンとポリウレタン素材を候補とした。スポンジを人の親指で押下する際、人の親指の形状、大きさには、ばらつきがあるので、それを考慮する必要がある。本稿では、再現性を重視し、図3のようにスポンジ上に円形プラスチックを置いて測定を行うことにした。圧力 P_a は、数式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。

$$P_a = N/m^2 \quad (1)$$

スポンジ押下の変位量をスケールで測ることで、スポンジの変位量に対する柔軟性の計測が可能で、かつ、素材ごとの柔軟性を前もって把握することで、指の押下にともなう変位量から押下圧力を推定することが可能である。

3.2. 歪曲量検出のための視覚認識マーカの提案

図4には、スポンジコントローラに装着するCBをL字型に変形をし、2次元化したマーカ(L字型2次元マーカ)の設計図を示す。L字型2次元マーカで活用するCBは、形状自由度特性を有する1次元コードであり、セルと呼ばれる各RGB色の配列をビット列としてコード化されるため位置や形状に依存せず形状が歪曲してもコードとして成立する特徴を持つ。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字型2次元マーカの中心位置座標が一致する状態を、図5に示す世界座標系にて、マーカ全体の回転 Rotation $(0, 0, 0)$ 、並進 Translation $(0, 0, 0)$ と定義する。赤、緑、青それぞれのセルサイズは全て直径5mmの円形とする。ここでは、スポンジが指の押下により歪曲したときのセル位置の変位測定を想定しており、図4のようにL字型2次元マーカを36個のセルで構成した。この時、図4において、仮説として、指でプッシュポイントを押したとき、36セルの中でも、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するのではないかと考えた。そこで、スポンジを押下する前における各セルの位置と、押下後の変位したポイント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方式を提案する。

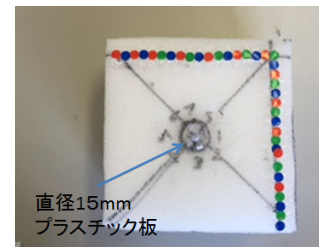


図3 スポンジコントローラ
Fig.3 Sponge Controller

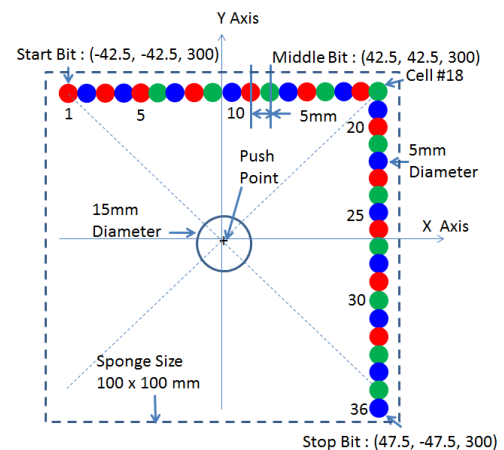


図4 L字型2次元マーカの設計
Fig.4 Design of L-shaped 2D marker

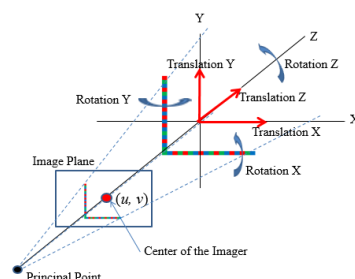


図5 世界座標系とマーカの位置関係
Fig.5 Relative position between marker and world coordinate system

また、スポンジコントローラにカラフルな色をした多種多様な印刷がなされていたとしても、コードとして成立しない場合は、マーカとして認識させないため、それぞれのセルがマーカ以外の印刷色と混色して誤読を起こす懸念がないのも、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マーカの周辺に配置して、マーカ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るため、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として成立しないようにして誤読対策とした。複数のセルの集合体を、ひとつのマーカとして成立させるため、画像上にてマーカが歪曲したとしてもマーカ認識が成立している限り、各セルの変位量の計測が、マーカ全体の3次元姿勢と同期して継続できる。セルがマーカとして個別に分離している場合、全てのセルの位置を画像処理にて誤読に注意しながら認識する必要があり、計算コストが高くなり、また、マーカ全体の姿勢と同期して認識することは困難である。本方式では、全てのセルにより、ひとつのマーカを構成するが、ビット列は無限に伸ばすことが可能で、ビットの配列によりコードを区別できるので、複数コードの同時認識も容易である。CBをL字型に変形させてスポンジコントローラの周辺部に細長く配置することで、指の押下による視覚認識のオクルージョンを防ぐために、L字型2次元マーカの形状を採用した。このとき、視覚認識のみでスポンジを指で押下したとき力覚をもって押下によるスポンジの変位量を、L字型2次元マーカの歪曲量から推定できるのではと考えた。

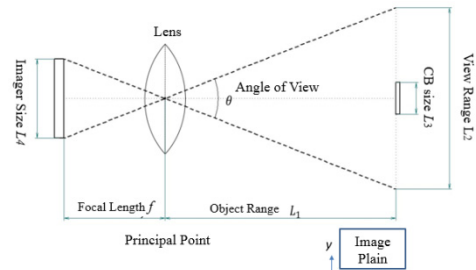


図6 ピンホールカメラモデル
 Fig.6 Pin-hole camera model

デコーダに、L字型2次元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した。本稿では、スポンジコントローラは動かないものとして、マーカのスポンジ表面の歪曲に関する変位量のみ測定を行うが、世界座標系におけるマーカ姿勢とカメライメージセンサ上のピクセル座標の関係性を計測することにより、スポンジ平面からカメラまでの距離と平面がカメライメージセンサと正対していることを確認する目的として Rotation 値も利用する。L字型2次元マーカの場合、図4に示す先頭ビットに相当する1番目セル、L字型折れ曲がり部分に配置される18番目セル及び、最終ビットに相当する36番目セルの3ポイントの位置が分れば、文献[10]も述べられているとおり OpenCV[17]を利用することで Translation, Rotation 値による物体の3次元姿勢推定が可能である。

3.3. L字型2次元マーカと各セル位置の視覚認識

L字型2次元マーカは36セルで構成されるが、各セルの位置をカメラで視覚認識し、マーカの姿勢を推定するには、カメラがL字型2次元マーカを探して認識し、スマートフォンなどのカメラ機能を持つデバイスに内蔵されたデコードソフトウェア(デコーダ)にてL字型2次元マーカを切り出してデコードし、デコーダは切り出したL字型2次元マーカより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字型2次元マーカの3次元姿勢の推定値及び各セル、それぞれの2次元座標値を得る。

デコーダは図6に示すピンホールカメラモデル[16]を使ってレンズ画角から焦点距離(f_x, f_y)を単位ピクセル毎に式(2)と式(3)から求める。

$$f_x = \frac{L_4 x}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \quad (2)$$

$$f_y = \frac{L_4 y}{2} \div \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \quad (3)$$

主点(C_x, C_y)は、イメージセンサの中心として数式(4)(5)として単位ピクセル毎に定義される。

$$c_x = \frac{L_4 x}{2} \quad (4)$$

$$c_y = \frac{L_4 y}{2} \quad (5)$$

3.4. 想定VRシステムのワークフロー

本稿で想定するVRシステムは、図2の適用例のように紙とプラスチックレンズで出来た簡易カードボード型HMD、スマートフォン、L字型2次元マーカが装着されたスポンジコントローラのみで構成され、VRの適用をゲームとする。

VRゲームは人のアクションをとまなうことが多いが、通常は安全性に配慮して、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コントローラなどの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、スマートフォンの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カメラ画像で視認できるようにする。

次に、スポンジコントローラに装着されたL字型2次元マーカが認識された時点で没入VRゲームモードに遷移するが、この時点でスポンジコントローラへの指による押下はないものとし、各セルの位置を計測しておく。カメラの視覚認識により図5の世界座標系における Translation, Rotation 値を計算しL字型2次元マーカの3次元姿勢推定を行う。取得された Translation 値は、L字型2次元マーカ自体の並進量を示し、スポンジコントローラ全体の並進量と一致する。このとき各セルの位置変位をスポンジコントローラが押下される前後の差分として測定することで、指によって押下されたスポンジコントローラの歪曲量に伴う押下力と比例した押下ストローク量が推定される。人は、指に力覚を感じながら、押下ストロークにとまなないHMDの画面に結果がフィードバックされる仕組みである。

このとき、HMD を装着する人の頭も方向が変化し、Translation, Rotation 値に影響を及ぼすが、スマートフォン内で、人の頭の動きはヘッドトラッキング情報を基に計算し、補正できると考えられるが、本稿では人の頭の動きは検討対象外とする。

このルーチンがルーピングされて途切れなく L 字型 2 次元マーカが認識されるようにする。2 次元 L 字型 CB がカメラ認識範囲から外れたとき、没入 VR ゲーム状態から、ビデオシースルーモードに遷移するようにする。

世の中に多数存在する柔軟物と指がインタラクションするときに力覚を感じながら VR ゲームにフィードバックできることを想定する。柔軟物は、人の皮膚、着衣や日用品であるスポンジ、ゴムなどが候補として考えられる。風船のようなポリウム曲面を持った物体や、球体の柔軟物にも対応可能である。

4. 実験

本章では、柔軟物としてスポンジ素材を選択し、スポンジを指にて力覚を感じながら、押下することを想定して、スポンジの特性検証、押下量によるスポンジ形状変化をカメラによる L 字型 2 次元マーカの視覚認識でマーカを構成する各セルの位置変位を推定することにより、柔軟性を持つスポンジコントローラが VR システムなどにおいて、柔軟物に対して人間の力覚をフィードバックする方式を実験し、有用性について検証を行う。

4.1. 柔軟コントローラとしてのスポンジの特性

人の指でスポンジを押下するために最適な素材を選択し、スポンジコントローラとして実験で使用する柔軟性を有するとされる素材を検討した。ポリウレタン素材(図 8 の A)とポリエチレン素材(図 8 の B)を比較すると、ポリウレタン素材では指の押下に柔軟かつ均一に素材が反応しているが、ポリエチレン素材では、指の押下にもない、均一に凹みが生じないことが分ったため、本稿の実験ではポリウレタン素材をスポンジコントローラとして採用し、片手で持ちやすさを考慮して大きさを 100 x 100 x 50mm とした。

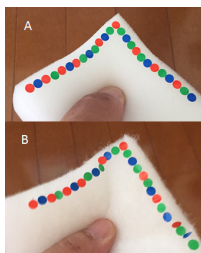


図 8 ポリウレタンとポリエチレンの比較
Fig.8 Comparison of polyurethane and polyethylene

再現性を得るために、スポンジコントローラの中心に装着したプラスチック板は、人の親指における爪の指先方向に並行な 2 分の 1 地点での指幅を 10 人計測して平均をとると、21.4mm であったため、その 70%が押下に寄与すると近似することにして、直径 15mm の円形プラスチックを使うことにした。

スポンジ素材を押したときの柔軟度を明らかにする目的

で、変位量と押す力の関係を計測するために、図 9 の実験装置を用意した。スポンジコントローラと、テクロック社製のテンションゲージ PPN-705-20 を設置してスポンジコントローラのセンターを押したときのスポンジ素材の変位量(以降、スポンジを押すときの変位量を、ストローク量と記述する)と押すときの力(N 値)を測定した。センターポイントには、直径 15mm のプラスチック製の円形板を置き、テンションゲージは円形板の中心をスポンジコントローラの平面に対して鉛直方向に押すようにした .5mm 間隔でスポンジを押しいき、その時のニュートン(N)値を計測した結果を図 10 に示す。3 N 程度の力を加えてスポンジが変形し始めることがわかり、その後は、変形にともなうストローク量に対して、おおそりニアに 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の押す力あたりにおけるストローク量が確認できた。

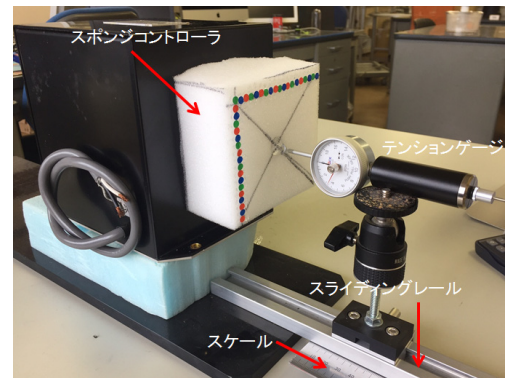


図 9 スポンジ柔軟度の測定系
Fig.9 Measurement environment of softness of sponge

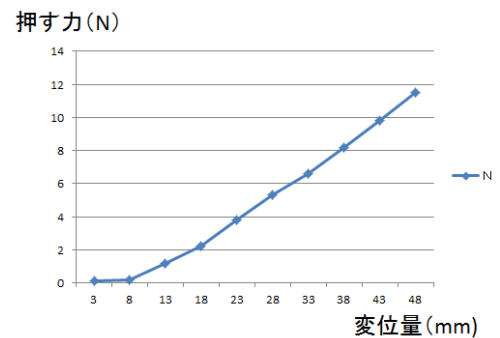


図 10 スポンジ柔軟度の測定結果
Fig.10 Measurement result of softness of sponge

4.2. スポンジコントローラの形状変位の測定

スポンジコントローラが指で押下されたときの变形特性を推定する目的で、図 11 の実験装置を用意し、スポンジ素材に、図 4 で設計した 36 セルで構成される L 字型 2 次元マーカを装着し、加えた力にともなう L 字型 2 次元マーカに含まれる各セルの X, Y 方向の位置変位を測定した。実験装置では、図 1 の没入型 VR 用途を想定して Nexus5 スマートフォンを装着

し、実験台に固定し、世界座標系において、マーカの姿勢が Translation (0,0,300)、Rotation (0,0,0)になるように調整した。Translation Z 値の示す 300 は、マーカが歪曲していない状態にて、マーカとカメラの距離が 300mmであることを示す。

スマートフォンカメラの画角を図 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 x 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 0.25mm、垂直 0.27mm と計算される。

実験装置に装着されたスケールで、ストローク量を測り、スマートフォン内蔵カメラで L 字型 2 次元マーカを視覚認識し、デコーダ及び OpenCV を利用したスマートフォンに内蔵したソフトウェアにて、各 36 セルの位置変位量を測定した。図 12 のスマートフォンのスクリーンショットは、変位量 0mm 時の状態である。その後、5mm おきに 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 13 に 35mm 変位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ックス表示した赤い枠線は、条件を満たし、L 字型 2 次元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、世界座標におけ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 字型のグラフィックスも同時に表示した。図 12 と 13 を比較すると、35mm ではスポンジに加えられた力から L 字型 2 次元マーカに歪曲が確認された。

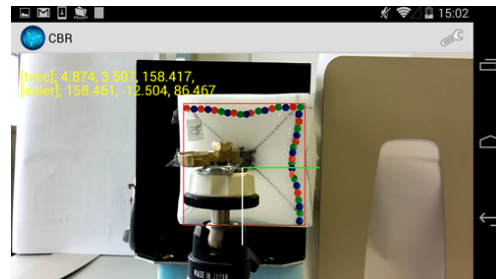


図 13 35mm 押したときの状態
Fig. 13 Pushing 35mm in stroke

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 個のセルそれぞれの X、Y 方向の位置変位量の測定を行った結果を図 14 に X 軸方向、図 15 に Y 軸方向として示す。押す力とストローク量は図 10 の実験結果から比例するものとする。

横軸は、左から順番にセルの番号を示す。1 番セルから 18 番セルまでは、X 軸と並行にセルが並んでおり、19 番セルから 36 番セルまでは、Y 軸と並行にセルが並んでいるため、18 番セルと 19 番セルの間で L 字型 2 次元マーカが 90 度折れ曲がる。縦軸は、5mm 単位ストロークでスポンジを押したときのセルの位置変位量を表す。

図 14 の結果に着目すると、19 番セルから 36 番セルの間において 26 番セル近辺に極小値が観測された。これは、19 番セルから 36 番セルが Y 軸と並行に配列されているため、X 軸方向の変位が明確に見られたものと考えられる。

ストローク量が、10mm までは明確な変位が観測されないが、15mm から 35mm では、押下量に相当する押す力と、変位量に明確な相関がみられる。相関がみられるストローク範囲である 20mm を有効領域とすると、視覚認識の最小計測限界が 0.25mm(水平)であることから、分解能は、80 段階あることがわかった。また、1 番セル付近においても変位が観測された。1 番セルが X 軸方向に変位しているのは、1 番セルと 18 番セルの間隔が縮小しているとみられ、0mm と 35mm ストロークの変位数値を比較すると、35mm ストローク時に 0.48mm 縮小しており 0.53%の変化量である。

図 15 の結果に着目すると、1 番セルから 18 番セルの間において、9 番セル近辺に極小値が観測された。これは、1 番セルから 18 番セルが X 軸と並行に配列されているため、Y 軸方向の変位が明確にみられたものと考えられる。ストロークが、20mm までは明確な変位が観測されないが、25mm から 35mm では、押下量に相当する押す力と、変位量に明確な相関がみられる。相関がみられるストローク範囲である 10mm を有効領域とすると、視覚認識の最小計測限界が 0.27mm(垂直)であることから、分解能は、37 段階あることがわかった。また、36 番セル付近においても変位が観測された。36 番セルが Y 軸方向に変位しているのは、19 番セルと 36 番セルの間隔が縮小しているとみられ、0mm と 35mm ストロークの変位数値を比較すると、35mm ストローク時に、0.96mm 縮小しており 1.0%の変化量である。

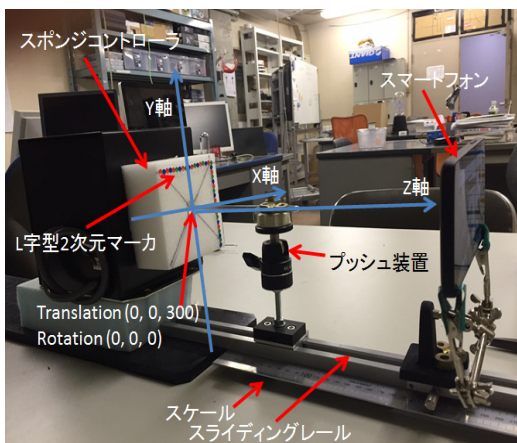


図 11 実験装置
Fig. 11 Experimental equipment

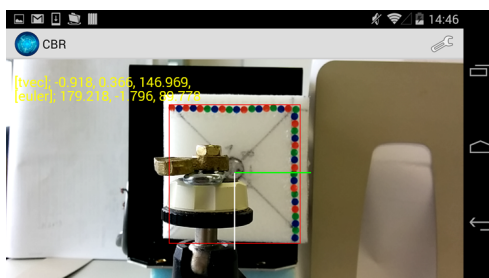


図 12 押していないときの状態 (0mm 変位)
Fig.12 Before pushing sponge (0mm stroke)

図 14 と図 15 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 番セル付近の変位が明らかに小さいことがわかる。これは、図 13 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 番セルと 36 番セル付近を比較すると、Y 軸方向の変位が大きい。これらの結果から、このスポンジ素材には、配向特性や、それともなう切り出し方向による歪曲度合の違いがあるとみられる。

図 16 では、X,Y 変位量をユークリッド距離で表現してみた。19 番から 36 番セルの方が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る。

これらの結果から、このスポンジ素材において、ストローク有効範囲内において、スポンジ押下力とストローク量の相関がみられた。したがって、本方式により、柔軟物を指で押下するときに力覚を感じながら、ストローク量と押下力を推定し、VR, AR システムにフィードバックできると判断される。

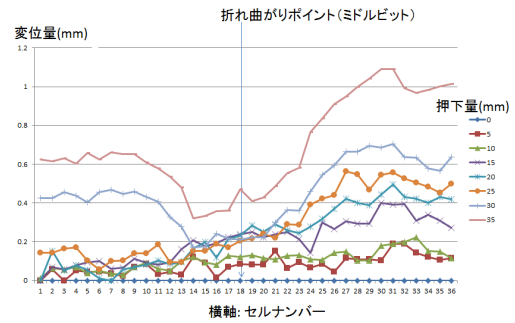


図 16 ユークリッド距離による評価
Fig. 16 Evaluation by Euclidean distance

5. まとめ

本稿では、期待される VR, AR 技術における、実体物とのインタフェースに関する課題解決の手法として、柔軟性を持つ実体物に対して、直接、手や指による力覚を感じながら押下ストローク量を推定し VR, AR システムにフィードバックするために、コントローラに装着されたマーカの歪曲度合を、カメラの視覚認識のみで実現する方式を提案した。そこで、実体物への人間の力覚をインタラクティブに反映し、システムの臨場感を増すことを目指した。柔軟物として、ウレタン製スポンジに歪曲自由度を有する L 字型 2 次元マーカを装着したスポンジコントローラを開発した。結果として、ストローク量と各セルの位置変位の相関を評価し、ストローク量の有効範囲、測定の分解能力を確認し、開発したスポンジコントローラと認識方式が、現実世界での柔軟物への人のインタラクションと、バーチャル世界とのインタフェース方法として有用であることを確認した。

将来の方向として、本稿では、柔軟物のセンターポイントを押下する実験を行ったが、押す場所による特性の違いの評価、また、指を押下するだけでなく、横方向にスライドさせる動きについても評価したい。そのためには、より複雑で精密な相関評価が必要とみられる。そこで、セルの重心変位に関する分解能に関しては、カメラ解像度に影響を受けやすいゆえ、より高解像度で測定することで測定精度やストロークの有効範囲を拡大できると考える。

本稿では、AR, VR 用途を対象に検討を行ったが、本方式は、研究を進めることで、視覚認識対象の柔軟物にケーブルや電源が不要な特徴から、ロボットアームと人のインタラクションなどにも応用が可能と考えられる。そのときの課題のひとつは視覚認識のオクルージョンであるが、本方式では、複数マーカのビット配列を変えることにより区別できるため、対象柔軟物に複数の L 字型 2 次元マーカを印刷することで、オクルージョン問題を最小化する方式を検討したい。

参考文献

- [1] 平井慎一: “柔軟物操作” 日本ロボット学会誌 Vol. 16 No.2 pp. 136-139 (1998)
- [2] 内川恵二: 講座 “感覚・知覚の科学 3 聴覚・触覚・前庭感覚”, 朝倉書店 (2008).
- [3] Oculus VR, Oculus Rift: <https://www.oculus.com/en-us/rift/> (2016).
- [4] Oculus VR, Oculus Touch: <https://www3.oculus.com/en-us/touch/> (2016).
- [5] G. Marin, F. Dominio, P. Zanuttigh: “Hand gesture recognition with

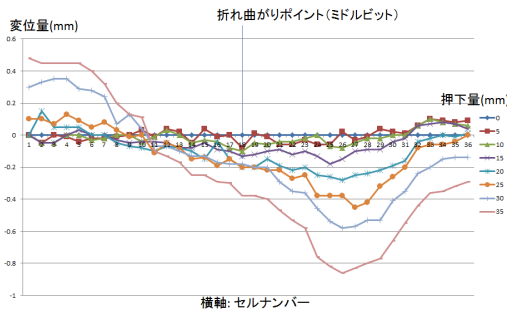


図 14 X 軸方向の変位
Fig. 14 Displacement in X axis

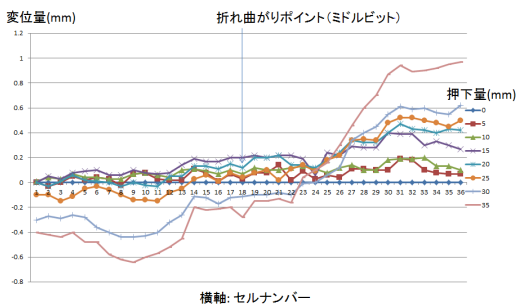


図 15 Y 軸方向の変位
Fig. 15 Displacement in Y axis

- leap motion and kinect devices” Image Processing (ICIP), IEEE International Conference, pp.1565-1569 (2014).
- [6] W. Piekarski., B.Thomas: “Using ARToolKit for 3D hand position tracking in mobile outdoor environments Augmented Reality Toolkit”; The First IEEE International Workshop, pp.102-102 (2002).
- [7] 植松裕子, 齋藤英雄: “任意位置姿勢に配置された複数平面マーカの統合によるオンライン AR システム”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 6, pp.909-919 (2006).
- [8] N.Kobori, D.Deguchi, T.Takahashi, I. Ide, H.Murase: “検出しやすくボケにロバストな符号化マーカの提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 画像工学, Vol.114, pp.19-24 (2014).
- [9] 遠藤広行: “新しいコードの活用例 カメレオンコード”, 月刊自動認識, 日本工業出版, 東京, pp.6-11 (2007).
- [10] 宇佐美真, 杉村博, 三浦高平, 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, 5 巻, 4 号, pp.1-9 (2015).
- [11] A. Kimura et al: United States Patent, No: US 8,113,432 B2 (2012).
- [12] B-Core, Colorbit Reference:, http://www.colorbit.jp/en/wp-content/uploads/2010/05/colorbit_reference_EN2.pdf (2010).
- [13] 青木 孝文, 三武 裕玄, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: “指先装着型接触感提示デバイス” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.14, No.3, pp.421-428 (2009).
- [14] 小川 雅也, 本田 克弥, 佐藤 啓宏, 工藤 俊亮, 大石 岳史, 池内 克史: “タスクモデルを用いたヒューマノイドロボットの遠隔操作システムの開発”, 生産研究 Vol. 68 No. 2 p. 107-113, (2016) .
- [15] ショッカキューブ: <http://www.touchence.jp/cube/> (2016) .
- [16] D. Hoiem: “Projective Geometry and Camera Models”, Computer Vision CS 543 / ECE 549 University of Illinois , pp.1-57 (2011).
- [17] OpenCV.org, The OpenCV Reference Manual Release 2.3, www.opencv.org (2011).