



手指による空中立体映像との触覚インタラクション

松林篤¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

概要: 本稿では、手指を使用して空中立体映像とインタラクションを行うことのできるシステムを提案する。手指の位置をデプスセンサで計測し、映像上の物体に触れた位置に超音波による振動触覚を提示することで、ユーザーは実際に触れているかのように物体を操作することができる。さらに、物体に触れた際の指の断面形状に応じて超音波の収束位置を変化させることでより強く物体の面の位置や角度を認識させることが可能となる。

キーワード: AR/MR, 触覚, インターフェース

1. はじめに

3D ディスプレイ, ヘッドマウントディスプレイ技術の発展と共に, 立体映像とインタラクションを行うシステムが近年関心を集めている。3D 映像上の物体を, 現実の物体と同じように操作するシステムは, 医療手術, 自動車運転等のシミュレーションに利用できるばかりではなく, 2D ディスプレイでの操作が直感的ではない 3D モデリング等の操作性を大きく向上させる可能性を持つ。

このようなシステムにおいて, 立体映像上の物体に触れた時, その位置に触覚フィードバックを提示することが可能であれば, ユーザーは物体の物理的特性についての情報を与えられ, インタラクションの幅は更に広がると考えられる。触覚提示デバイスとしては, PHANTOM[1] のようなペン状のものや, GhostGlove[2] のようなグローブ型のものが知られているが, これらは裸眼立体視ディスプレイの映像に影響を与える点や, ユーザーに不要な装着感を与えるという点で問題が生じる。この問題を解決する, 非接触で人体に触覚フィードバックを提示可能な手法がいくつか提案されている。Sodhi らは, ボルテックスリングと呼ばれるリング状の空気流を用いた触覚ディスプレイを提案している [3]。また, 超音波の音響放射圧を利用した, より高い空間, 時間分解能を持つ手法が提案されている [4][5]。

本稿では, 超音波を利用し, 空中立体映像と触覚フィードバックを伴うインタラクションを行うシステムを提案する。このシステムは, デプスセンサで取得した手の位置や形状の情報を利用して指が触れた際の物体の動きをシミュレートし, それと同時に接触位置に超音波による触覚フィードバックを提示することで, ユーザーが実際に触れているかのように物体を操作することを可能にする。例えば, 図 1 のように物体を掴んで自由に移動させることができる。本システムでは超音波焦点を作り出す位置を, 指が物体の面に触れた際の接触面形状に応じて変化させる。指と物体の

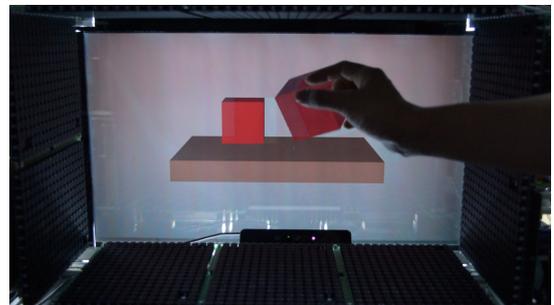


図 1: 空中立体映像に触れ, 自由に操作することができる。

接触面の周囲を回転するように超音波焦点を移動させることで, 接触面が広がるにつれて指に提示される圧力の分布が広がり, 物体表面の形状をより明確に認識することが可能となる。この触覚フィードバック手法が, 面の角度, 位置認識に及ぼす影響を評価する被験者実験を行った。実験の詳細については第 4 節で述べる。

2. 関連研究

超音波を利用して空中像と触覚を伴うインタラクションを行うシステムがいくつか提案されている。門内らによって提案された Haptomime[6] は, マイクロミラーアレイを利用して空中に結像させたディスプレイに触れて操作するシステムであり, 指の位置をセンシングすることでディスプレイに触れた点への触覚提示を可能にしているが, 映像は 2D であり表現力に制限がある。牧野らの提案する HaptoClone[7] は, 2 枚のマイクロミラーアレイを利用して生成した 3D 立体像とのインタラクションを可能にしているが, 立体像は現実の物体を空中に結像させたものであり, 自由に生成した仮想物体とのインタラクションが可能というわけではない。

これらのシステムでは, 手や指の位置をセンシングし映像との接触位置に超音波焦点をつくりだすことで触覚を提示している。一方で, 超音波音圧分布を制御することで 3 次元形状を持つ触覚像を作り出す手法が井上らによって提案されている [8]。この手法はセンシングを必要としない

Atsushi Matsubayashi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda

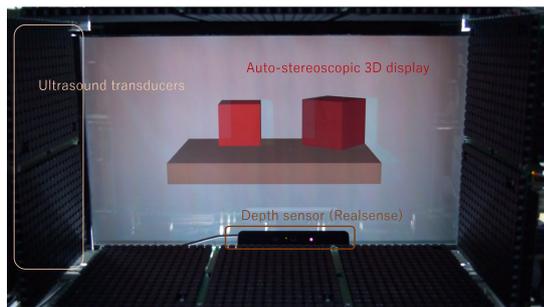


図 2: システムの構成

め、センシングの遅延の影響を受けないという利点を持つが、空間分解能は低く物体に触れた感覚を表現することは難しい。井上らはまた、指の形状を考慮した指表面の音圧分布制御手法を提案している [9]。指形状のセンシングとこの手法を組み合わせることで物体に触れた時の指表面の圧力分布を再現できると考えられるが、計算コストが高くリアルタイムでの使用は困難である。本稿で提案するシステムでは、面の位置や角度情報をユーザーに伝えることのできる計算コストの低い触覚フィードバック手法を用いる。

3. システムの構成

本システムは、図 2 に示されるように裸眼 3D ディスプレイと、デプスセンサ、多数の超音波振動子から構成される。デプスセンサで取得した手の形状をもとに物体接触時の物理シミュレーションを行い、その結果を 3D ディスプレイに反映させる。それと同時に超音波振動子を制御し、接触位置に触覚フィードバックを生じさせる。

3.1 手の形状のセンシング

本システムでは、RealSense (Intel Corporation) を利用して、手の形状を取得する。RealSense は、構造化した光パターンを投影して深度を計測するデプスセンサであり、近距離の物体形状をリアルタイムに取得することができる。

図 3 に示されるように、RealSense で取得したデプス画像から、背景部分を切り出しバイラテラルフィルタ [10] による平滑化を行う。処理後のデプス画像から、カメラの内部パラメータを利用し 3 次元空間に投影を行うことで、手の形状を示す点群が得られる。この点群が仮想物体内部に存在するとき、手が物体に触れているとみなし、その点群の動きに応じて物体の位置、角度を変化させることで物体を操作している感覚をユーザーに与える。複数の指での操作に対応するため、物体内部の点群は、点群間の距離に基づいてクラスタリングされ、個々のクラスタごとに物理シミュレーション、触覚提示の処理が行われる。

3.2 物理シミュレーション

手が接触した際の物体動作のシミュレーションは、god-object と呼ばれる媒介物体を用いた手法 [11] に基づいて行われる。仮想物体内部に存在する点群の重心を指先位置とみなし、図 4 のように物体内部にはじめて指が侵入した際の指先位置に god-object を配置する。その後は指が物体を離れるまで、指先位置の変化に応じて物体に力が加わる。現在の指

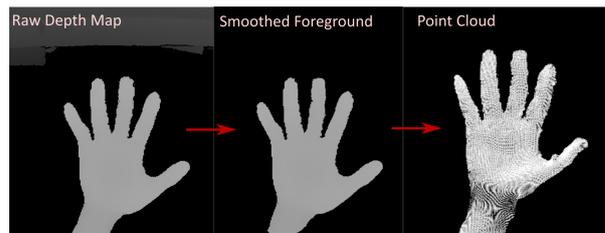


図 3: デプスセンサで取得した画像から背景を除き平滑化した後に 3 次元空間に投影する

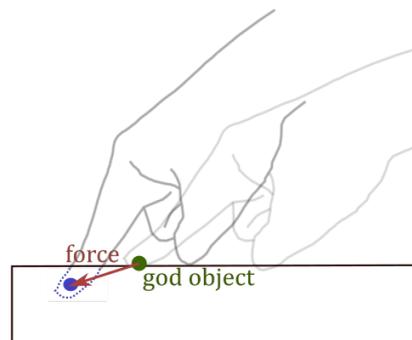


図 4: 指の貫通方向に応じて、物体に力が付加される。

先位置を $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$, god-object の配置された位置を $\mathbf{x}_g \in \mathbb{R}^3$ とすると、力 \mathbf{f}

$$\mathbf{f} = K(\mathbf{x} - \mathbf{x}_g) + D(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_g)$$

が、位置 \mathbf{x}_g に加わる。ただし、 $[\cdot]$ は時間微分を表し、 K は距離に関する比例定数、 D は相対速度に関する比例定数である。本システムでは、更に複数の sub-god-object [12] を god-object 周囲に配置することで、指先周りの回転に対するトルクを加え、図 1 のように安定して物体を把持することを可能にしている。

3.3 超音波による触覚フィードバック

センシングシステムから得られる手指と仮想物体の接触位置に触覚フィードバックを付加する。図 2 のように多数の超音波振動子を操作領域の周りに配置し、各振動子の位相を制御することで超音波の焦点をつくりだす。焦点が人体表面で遮られると、非線形効果である音響放射圧が発生し振動触覚が提示される。 n 番目の振動子の位置が $\mathbf{x}_n \in \mathbb{R}^3$ であるとき、その振動子での位相を

$$\phi_n = 2\pi \frac{f}{c} \|\mathbf{x}_n - \mathbf{r}\|$$

とすれば、各振動子から伝搬する音波の位相が揃い、位置 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$ に超音波の焦点を生成することができる。ただし、 c は音速、 f は超音波の周波数であり、本システムにおいては $f = 40000$ [Hz] である。

この焦点を指と物体の接触面形状に応じて移動させることで、仮想物体の面の広がり表現する。図 5a のように点群から物体表面付近にあるものを取り出し、それらを楕円で近似する [13] ことで手指と物体の接触面を推定し、楕円上を周回するように焦点を移動させる (図 5b)。人間の皮膚は 1kHz 程度までの振動しか知覚することができない [14]

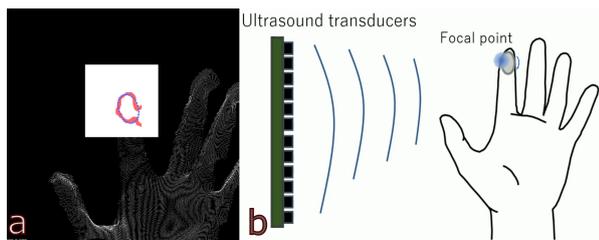


図 5: a) 物体表面付近の点群 (赤) を楕円 (青) で近似し、接触面形状を推定する。b) 指と物体の接触面の周囲を回転するように、超音波焦点を移動させる。

が、周期的に焦点を回転させることで効率的に知覚可能な振動触覚を指先に提示しつつ、指表面に音圧分布の広がりを作り出すことが可能である。焦点が周回する楕円の半径が大きくなるにつれて指先に生じる圧力の分布が広がるため、指を仮想物体内に押し込むにつれて接触面積が触れていく感覚をユーザーに提示することができる。本システムでは、焦点の周回周期を 100Hz とした。

4. 実験

物体を精確に操作する上で、現在触れている面と指の相対的な位置関係や、面の法線方向の角度を明確に認識することが重要であると考えられる。本システムにおいて、触覚フィードバックの付与が面の位置、角度の認識を向上させるかを検証するという目的で被験者実験を行った。

4.1 実験手順

はじめに、3D ディスプレイ上に図 6a のように面を表示させ、面に触れた際の触覚フィードバックに慣れる時間を被験者に 2 分程度与えた。このとき、被験者はキーボード操作により面の角度と位置を自由に変更し、それに応じた触覚フィードバックの変化を感じ取ることができる。その後、被験者は触覚情報のみから面の位置、角度を推定するタスクを繰り返す。図 6b のように、被験者には触れることのできる面と、3D 映像として視ることのできる面が別の位置に提示される。被験者は触覚フィードバックに合致するように、3D 映像上の面の位置と角度をキーボード操作により変更する。操作終了後の 2 つの面の差から、どの程度、面の位置や角度を推定できているかを評価する。3D 映像上の面は 5cm 四方の正方形であるが、触覚が提示される面は 1cm 半径の円盤であり、被験者が面の情報を知覚するために指を動かすことできる範囲は限られている。

第 3 節で説明した焦点を接触面周囲で回転させる手法と、接触面の中心に一点だけ焦点を生成する手法の両方で以上の手順を行い、両手法の比較を行った。各被験者は、各手法についてタスクを 20 回ずつ行い、各手法について角度、位置の差の平均を算出した。面の角度の変化は、目線に対してのロール方向に限定し、触覚で表される面の角度は各タスクで -45° から 45° の間でランダムに変化させた。面の位置は鉛直方向の動きに限定し、各タスクで 2cm の範囲でランダムに変化させた。疲労や慣れの影響を軽減するため、10 名の被験者 (男性 5 名, 女性 5 名) のうち 5 名は、焦点

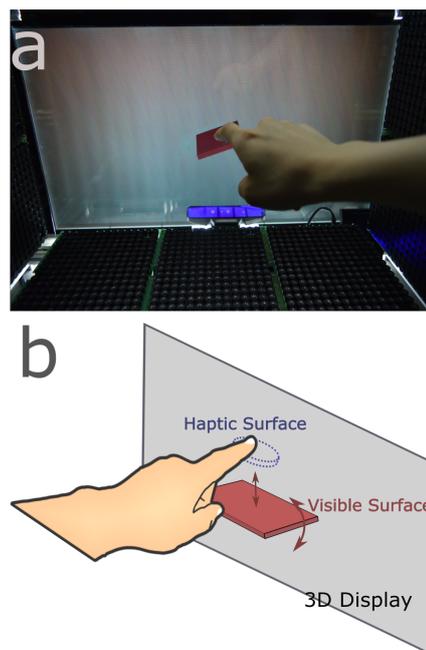


図 6: 実験設定: a) はじめに被験者は 3D ディスプレイに映し出される面に触れ、触覚フィードバックに慣れる。

b) 被験者は、触覚フィードバックから面の位置と角度を推定し、それに合うように 3D ディスプレイに映し出される面を操作する。

表 1: 外れ値データ

	一点	回転
角度誤差平均	24.50°	26.72°
位置誤差平均	4.2mm	2.7mm

を回転させる手法でのタスクを先に行い、他の 5 名は一点の焦点のみを生成する手法でのタスクを先に行った。

4.2 結果

位置、角度推定誤差を 20 回のタスクで平均したものを評価値とした時の、各手法での被験者間での評価値平均と標準偏差は図 7 のようになった。ただし、被験者一人のデータを外れ値として除外している。この被験者の推定誤差平均を表 1 に示す。この被験者は、タスクを行う際に指先ではなく指全体で面に触れていたため、適切な触覚フィードバックが提示されず、位置角度の推定が正しく行えなかったものと思われる。

角度推定の結果では、焦点を回転させる手法が一点のみ生成する手法に比べ平均値が小さく、有意水準 5% の t 検定において有意差があるという結果が得られた。推定誤差は 7.02 と小さく、本システムにおいて触覚フィードバックから面の角度を推定可能であることが示唆される。一方で、位置推定の結果では、回転手法と一点手法の間の差は小さく、有意水準 5% の t 検定において有意差は存在しない。しかし、推定誤差はどちらも 5mm 程度であり、触覚フィードバックから面の位置が推定できると考えられる。ただし、本

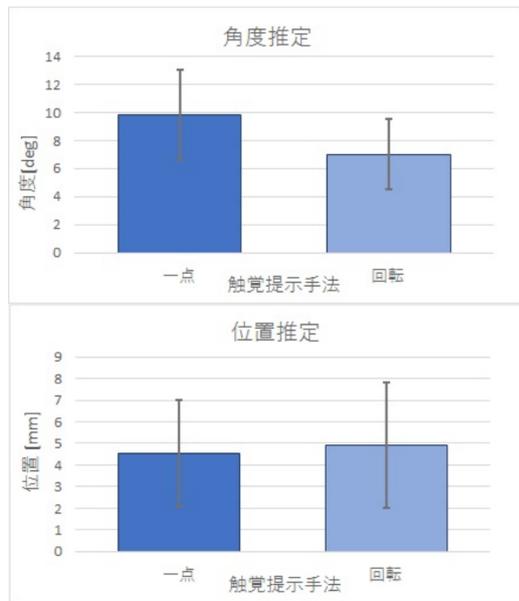


図 7: 被験者 9 人の角度, 位置誤差の平均と標準偏差

実験では回転, 平行移動共に 1 自由度の変化のみを推定している. 自由度が増加した際にも, 位置, 角度の認識が可能であるかを検証する必要がある.

5. まとめと課題

本論文では, 体に何も装着せずに立体映像との触覚を伴うインタラクションを行うシステムを提案した. センシングされた指の位置, 形状に応じて仮想物体に力を付加すると同時に超音波触覚フィードバックを提示することで, ユーザーが現実と同じように物体操作を行うことを可能にする. 更に, 超音波焦点を指の物体への接触面の周囲を回転するように移動させることで, ユーザーは仮想物体に触れたときに面の広がりを感じ取ることができる. 行った被験者実験の結果は, このような触覚フィードバック手法が, 面の位置, 角度推定において有効であることを示唆している. 今後は, 更に実験を行い触覚による面の角度, 位置推定が実際にどのような物体操作を容易にするのかを検証する必要がある.

また, 手法を改良することで, 面の位置, 角度以外にも様々な情報を超音波触覚フィードバックを通じてユーザーに提示することができる可能性がある. 例えば, 接触面周囲を回転させる焦点の強度を角度に応じて変化させることで, 面に水平な特定の方向からの力を指先に付加し, それにより摩擦力を表現できる可能性がある. また, 物体に対する指の相対速度に応じて焦点の振幅に変調をかけることで, 面のすべりをユーザーに認識させることができるかもしれない. それらを含め, 超音波触覚を現実の物体に触れた時の感覚により近づけることが, 当面の課題となるだろう.

謝辞

本研究で用いた立体ディスプレイは, 筑波大学掛谷英紀准教授から貸与されたものである. また, 本研究の一部は, 科研費 16H06303 の支援を受けたものである.

参考文献

- [1] G. Bianchi, B. Knoerlein, G. Szekely, and M. Harders, "High precision augmented reality haptics," in Proc. EuroHaptics, 2006, pp. 169-178.
- [2] K. Minamizawa, S. Kamuro, S. Fukamachi, N. Kawakami, and S. Tachi, "Ghostglove: haptic existence of the virtual world," in Proc. SIGGRAPH, 2008, pp.134.
- [3] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, and A. Israr, "Aireal: Interactive tactile experiences in free air," in Proc. SIGGRAPH, 2013, 134:1-134:10.
- [4] T. Carter, S. A. Seah, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "Ultrahaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces," in Proc. UIST, 2013, pp. 505-514.
- [5] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda. "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, pp. 155165, 2010.
- [6] Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda "HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen," in Proc. UIST, 2014, pp. 663-667.
- [7] Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue, and H. Shinoda, "HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback," in Proc. CHI, 2016. pp. 1980-1990
- [8] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, "Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram," in Proc. World haptics, 2015, pp. 362-367.
- [9] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, "Mid-Air Ultrasonic Pressure Control on Skin by Adaptive Focusing", in Proc. Eurohaptics, 2016, pp. 68-77.
- [10] S. Paris, and F. Durand, "A Fast Approximation of the Bilateral Filter Using a Signal Processing Approach," *International Journal of Computer Vision*, vol. 81, pp. 24-52, 2009.
- [11] C. B. Ziles and J. K. Salisbury, "A constraint-based god-object method for haptic display," in Proc. IROS, 1995, pp. 146-151.
- [12] A. Talvas, M. Marchal, and A. Lecuyer, "The god-finger method for improving 3D interaction with virtual objects through simulation of contact area," in Proc. 3DUI, 2013, pp. 111-114.
- [13] R. Halir and J. Flusser, "Numerically stable direct least squares fitting of ellipses," in Proc. WSCG, 1998, pp. 125-132.
- [14] P. J. J. Lamore, H. Mujiser, and C. J. Keemink, "Envelope detection of amplitude-modulated high-frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, no. 4, pp. 1082-1085, 1986.