

触力覚情報伝送のための遠隔硬さ計測

中妻 啓*、藤原 正浩*、篠田 裕之*

Remote Compliance Measurement for Haptic Information Transmission

Kei Nakatsuma*, Masahiro Fujiwara*, and Hiroyuki Shinoda*

This paper proposes a method of remote compliance pattern measurement for one-to-many haptic communication. One typical application is a haptic TV broadcasting system. When many users share one object remotely through broadcasting and/or internet, we cannot employ a conventional master-slave haptic transmission system. We propose a new approach for a remote, non contact, and real time surface compliance distribution measurement for these applications. Our method utilizes an ultrasound phased array. Ultrasound convergent beam pushes a surface of an object and displacement of the surface is obtained. In this paper, we describe our proposed method and report some fundamental experiments and their results.

キーワード：硬さ計測、遠隔計測、触覚情報伝送

Keywords : Compliance Measurement, Remote Sensing, Haptic Information Transmission, One-to-many Haptic Communication.

1. はじめに

本稿では1対多の触力覚情報伝送を前提とした物体表面の硬さ分布計測法の基礎的検討について述べる。

触力覚を用いた遠隔コミュニケーションは、従来の視覚・聴覚に基づくコミュニケーションを拡張するものと考えられ盛んに研究がなされている。災害救助活動や遠隔手術においてロボットや機器の操作者に触力覚フィードバックを提示したり、離れた場所にいるユーザ同士が触覚を共有することで互いの存在をより強く感じたりするなど触力覚コミュニケーションは広く応用を持つ。

既に医療分野においてロボット手術は実用化されており、これに触力覚フィードバックを付加する技術が提案されている[1]。また、棒の回転を共有するinTouch[2]や、離れた場所にある2体のぬいぐるみロボットの動きを共有するRobotPhone[3]など、触力覚を利用して離れた場所にいるユーザをより身近に感じることができる装置が実現されている。

触力覚は動作に伴って生じる感覚でありユーザの動きに応じた感覚提示が必要であるが、従来の触力覚伝送では上記システムや[4]など1人のユーザが1体のロボットや装置、あるいはもう1人のユーザと接続されることを前提としているため主にマスタ・スレーブシステムを採用することで違和感の無い感覚伝送を実現していた。そのため、対象物体の持つ硬さや表面粗さといった触覚情報の計測についても、手と同期して動くロボットハンドなどに取り付けた触覚センサにより実際に触れて測定することができる。

一方テレビ放送など情報の受け手が同時に多数い

る場合、ロボットハンドなどで多数のユーザの動きを同時に再現して対象物体に触れることはできない。そのため従来とは異なるアプローチが求められる。

我々はこうしたテレビ放送などの1対多のコミュニケーションにおいて触力覚情報を伝送する技術に注目している。触力覚に限らず感覚伝送には、計測・記録、伝達、再生のためのシステムが必要であるが、本稿ではまず物体の持つ触力覚情報計測について述べる。

触覚情報には硬さの他、物体の形状や温度、表面粗さ(テクスチャ)などがある。どの情報も物体を認識する上で重要な要素であるが、本稿ではそのうち物体表面の硬さについて論じる。なお硬さには様々な定義が存在するが、本稿で対象とする硬さは我々が手や指で物体に触れたり押し付けたりする時に感じる反力、すなわちバネ性とする。

物体の硬さやその分布の計測法は既に研究がされている。ここまで述べたように1対多のコミュニケーションという我々の目的のためにはマスタ・スレーブシステムでユーザの手と同期して動くロボットハンドや機器により物体に直接触れてその反力をフィードバックすることができない。また、遠隔診療や遠隔外科手術といった応用を考えると、ロボットハンドなどで直接患部に触れることは誤作動や感染の危険があり、非接触で患部の硬さや触感といった情報が得られることが望ましい。

さらに、テレビの生放送などリアルタイムのコミュニケーションを考えれば、個々のユーザに提示する触力覚情報を決定するために物体表面の硬さ分布を瞬時に計測した上でこれをモデル化することが求められる。

以上の考察から、1対多の触力覚コミュニケーションで必要とされる触力覚情報計測の仕様を以下にま

* 東京大学

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
The University of Tokyo
7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

とめる。

- 1) 非接触・遠隔計測
- 2) 実時間計測
- 3) 面（分布）計測

以降の章では、以上の仕様を満たすための手法として、超音波収束ビームを用いて音響放射圧により物体表面を加圧し、その変形を取得する手法について紹介し、基礎実験の結果を報告する。

2. 提案する硬さ計測法の原理

物体の硬さを測定する最も基本的な方法は、対象となる物体に力を加えて変形させその変形を測定するというものである。プローブを用いて加圧する方法は[5]などで用いられているが、我々の目指す装置では非接触に加圧することが必要である。従来、物体に非接触に力を加える方法としては[6]などのようにエアジェットが用いられてきた。一方、我々は広範囲の硬さ分布を高速に取得するため超音波フェイズドアレイを用いて生成した超音波収束ビームによる音響放射圧を利用する。この音響放射圧を制御するデバイスとして、我々は空中超音波触覚ディスプレイ（Airborne Ultrasound Tactile Display, AUTD）[7]を用いる。

超音波が空中を伝搬する際、空中に音圧とは別に定常な圧力が発生する。これは音響放射圧と呼ばれ、超音波のエネルギー密度を $E [J/m^3]$ として

$$P = \alpha E$$

と記述される。ここで、 P は音響放射圧の強度（Pa）である。すなわち、音響放射圧の強度は音波のエネルギーに比例する。

AUTDは物体の無い空中に触感を提示するためにこの音響放射圧を利用している。AUTDは40kHzの超音波を出力する振動子を多数基板上に配置した超音波振動子アレイである（図1）。各振動子の振動の位相を制御することで、空中の任意の位置に超音波の収束ビームを作る。空中にかざした手の位置に焦点位置を合わせることで、人が感じる触感を提示することに成功している。また、空中映像と組み合わせたVR、インターフェースアプリケーションの開発も行われている[8]。

第1章で我々が目指す硬さ計測の仕様として

- 1) 非接触・遠隔計測
- 2) 実時間計測
- 3) 面（分布）計測

の3点を上げた。AUTDを本稿で提案する硬さ計測の対象物体表面への加圧デバイスとして利用する際の特長を以下に述べる。

第1の仕様である非接触・遠隔計測であるが、AUTDによって生じる音響放射圧は焦点位置で1.6 gf程度の力を発生させエアジェットと同様に非接触で物体表

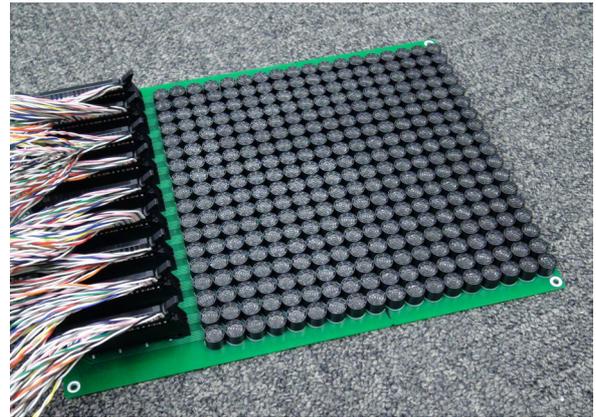


図 1: 空中超音波触覚ディスプレイ（Airborne Ultrasound Tactile Display）の超音波振動子アレイ部。アレイを構成する各振動子の位相を個別に制御することで、空間中の任意の位置に超音波の収束ビームを形成する。

面に圧力を加えることができる。また、焦点における音響放射圧の強度及び焦点径は超音波が減衰しない範囲において振動子アレイの遠方でも一定に保たれる。なお、40kHzの超音波の空中における振幅減衰は1mでおおよそ1dBと見積もれる。このことから、測定系と対象が数十cm離れているような遠隔計測にも用いることができる。

次に第2、第3の仕様である実時間計測及び面計測であるが、加圧点の変位を測定するという点では提案手法も1回の測定では1点のみしか計測できない。しかし、AUTDによる加圧点は超音波フェイズドアレイにより形成された超音波収束ビームの焦点である。この焦点位置は振動子アレイの位相制御により、アレイの前面領域内であれば3次元空間中で任意に変更できる。さらに、振動子アレイの位相制御は電子的に行われるため、プローブなどの機械的な動作より高速に焦点位置を物体表面上で移動することができる。

この特長は実時間・面計測が可能になるだけでなく、より高度な計測に利用することも期待できる。焦点位置の移動や強度の制御は全て、制御回路とPC間のデータのやり取りにより行われる。焦点に生じる圧力は音響放射圧によるものであり、超音波の出力強度に時間的な変調を与えることで任意の周波数で物体表面を振動させることが可能である。例えば、静的に押し付けたときの反力を測定するだけでなく弾性体の持つ周波数特性を取得したい場合などに応用ができる。

以上より、AUTDを用いて物体の形状に応じて3次元的に焦点位置をスキャンすることで高速に対象表面を加圧し変形させることが可能である。この変形を各加圧点で測定することで、対象物体の表面硬さ分布を面的に、高い時間分解能で取得する。

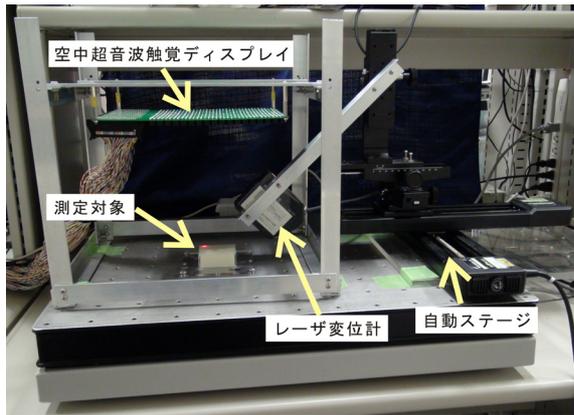


図2: 実験システムの構成。

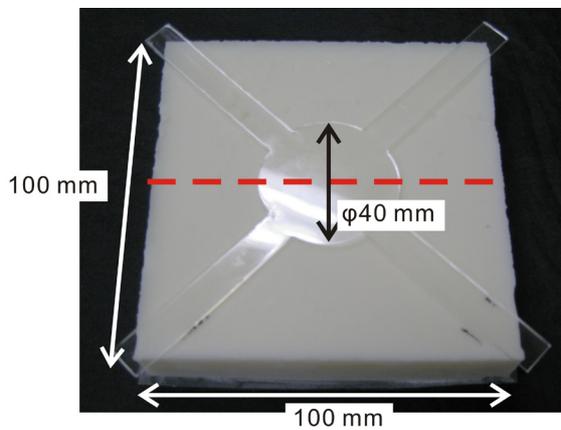


図3: 実験に用いた弾性体試料。(上): 50 mm x 50 mm x 20 mm のアクリル容器内で人肌のゲルを固めた試料。(下) 100 mm x 100 mm x 20 mm で人肌のゲル (硬度 5) を固め側面を固定していない試料。

3. 実験

本稿では2章に述べた遠隔硬さ計測法を実現するための基礎データとして、AUTDによる弾性体表面の加圧点のスキャンとその際生じる変位の測定実験について報告する。

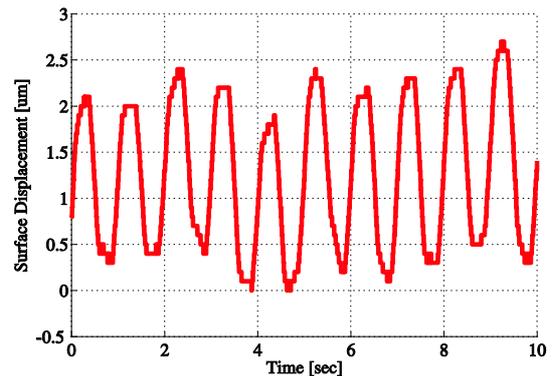
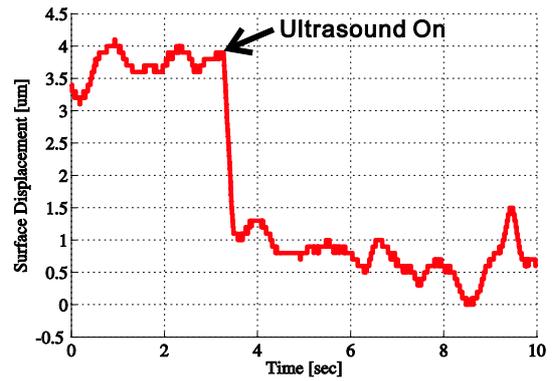


図4: 図3下の試料中心を加圧した際の表面変位の様子。(上): 超音波をある時刻から出力し続けたときの変位。(下): 超音波出力に1 Hzの矩形変調をかけたときの、表面変位の時間変化。

実験のセットアップを図2に示す。測定対象となる弾性体には「人肌のゲル」(エクシールコーポレーション製)を用いた。人肌のゲルの硬度0, 5, 15の3種類のタイプを50 mm x 50 mm x 20 mmのアクリル容器の中で固めたものを測定対象(以下、試料と呼ぶ)とした(図3上)。また、100 mm x 100 mm x 20 mmの型に入れて硬度5の人肌のゲルを固め側面の枠を取った試料も用いている(図3下)。

AUTDは試料表面から200 mmの位置に配置した。今回用いたAUTDは18 x 18 = 324個の超音波振動子を持つ。超音波の周波数は40kHzであり、形成される焦点の直径はおよそ10 mm、焦点に生じる力は1.6 gF程度である[7]。

試料の表面変位の測定にはレーザ変位計 LK-G80 (キーエンス製)を用いた。測定点の直上に変位計を配置すると超音波の伝搬を妨害するため、試料表面から45°の角度から変位を測定するよう設置した。このため測定された変位は試料表面の垂直方向変位とは異なるが、本稿で示す結果では角度についての補正は行っていない。

レーザ変位計は自動XYステージ上に取り付けた。AUTDによる焦点位置に合わせてレーザ変位計を機械的に移動させることで、加圧点の変位を測定してい

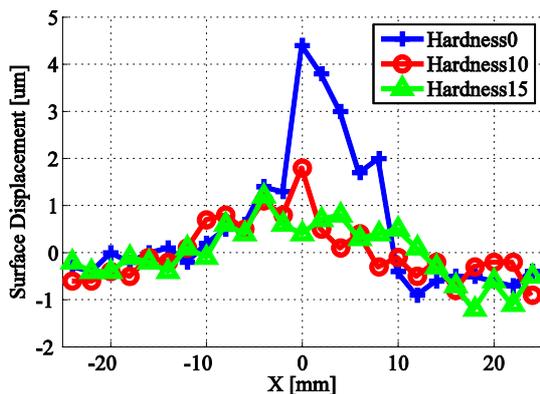


図5: 図3上の試料中央 ($X = 0$ mm) を加圧した時の試料表面の変形の測定結果。測定点は試料中央を通る直線上の2 mm 間隔の点。

る。

まず、図4に図3下の試料中心をAUTDで加圧した際の加圧点の変位の様子を示す。図4上は、超音波が出力したときの表面変位の様子、図4下は超音波出力に1 Hzの矩形変調をかけたときの表面変位の様子である。これより超音波が出力されてから変位するまで0.5 sec程度かかっていることが分かる。以下の実験ではこの結果をもとに変位前と変位後のレーザ変位計出力の観測時間を決定している。

次に、図3上の3種類の硬さの試料の中心をAUTDによる超音波収束ビームで加圧した。この際の表面の変形を測定した結果を図5に示す。変位測定は試料中心を通る直線上で2 mm 間隔で行った。加圧点(試料中心 ($X = 0$ mm))をピークとして、中心から離れるほど変位が減衰していく様子がわかる。また、試料の硬度が大きくなるほど変位量が小さくなることも確認できた。すなわち、我々の目指す物体表面各点でのバネ定数が変位量より推定可能であることが示唆される。

また、図3下の試料に同図中に示すようにアクリル板を置いて擬似的に硬さ分布を作り、試料表面で10 mm 間隔で2次元的に加圧点をスキャンした。この際の各加圧点における変位を測定した結果を図6に示す。図6上のグラフは、図3下の赤破線上で変位測定した結果を、図6下は2次元的に変位測定した結果を示している。図6上からは、アクリルの有無により変位に差が生じており硬さの違いが分布として取得できている。一方、2次元スキャンでは全体でアクリルの有無による明確な違いを見ることはできない。これはレーザ変位計の測定点と焦点位置とが、全ての加圧点で完全に一致せずずれていたことが原因と考えている。また変位測定を垂直方向に行っていないため、表面の凹凸の影響が強く出ているとも考えている。

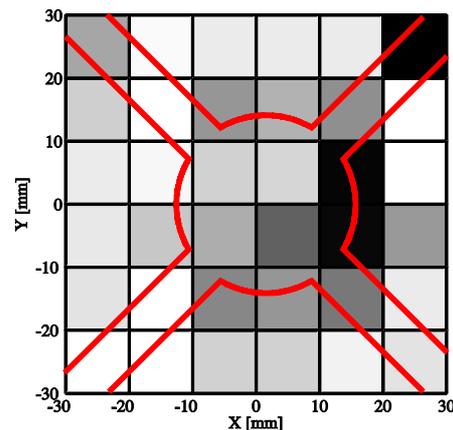
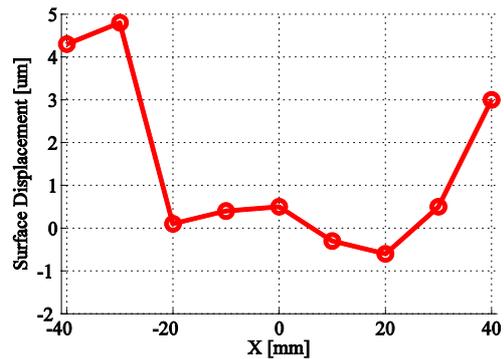


図6: 図3下の試料表面にアクリル板を置き、加圧点をスキャンした際の各加圧点の変位測定結果。(上) 図3下の赤破線上での変位測定結果。(下): 10 mm 間隔で2次元的にスキャンした際の変位測定結果。グラフ中におおよそそのアクリル板の位置を赤線で示している。

今後は安定した変位測定法を確立し信頼性の高い変位データを取得することで硬さ分布計測を実現する予定である。また、AUTDによる加圧では物体が微小にしか変形しない。測定系の設置や移動時のわずかなずれにより測定結果が大きく変わってしまうこともあり、AUTDの超音波出力をより強力にする工夫も必要である。

4. 結論

本稿では、実物体の触覚情報を遠隔に伝送し提示するための触覚情報計測システムの一要素として遠隔硬さ計測法を提案した。提案手法は超音波フェイズドアレイにより形成された超音波収束ビームの音響放射圧により物体表面を加圧し、その変位を取得する。超音波フェイズドアレイとして空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display, AUTD) を用い、高速に物体表面上で加圧点をスキャンし表面の硬さ分布を測定する。

本稿では提案手法の実現可能性を検証するため、

AUTD を用いて弾性体表面を加圧しその変位を測定する実験を行った。結果から、硬さに応じて加圧時の変位が変化することを確認した。一方、硬さ分布の取得には変位測定法の確立や AUTD の改良など解決すべき課題が残った。

我々の提案する遠隔硬さ計測法は、触覚放送や遠隔コミュニケーションなどの触覚情報伝送だけでなく、医療分野や品質検査などの応用を持つ。

医師は疾患の診断に触診を使うことがあるが、面的に体表面の硬さ分布を取得すれば客観的な触診データとなり、遠隔地での診断や患者情報の共有に活用できる。

また、硬さは様々な商品の品質を決定する指標の一つである。例えば果物の完熟度や鮮度の推定が非接触かつ高速に行えれば、収穫物を傷めることなく仕分け作業などを自動化することもできる。

今後は、今回得られた基礎的な知見をもとに第1章で示した3つの仕様を満足する硬さ分布計測システムの実現に向け開発を進める予定である。本稿の実験では変位計測にはレーザ変位計を用いこれを機械的に移動させて変位の分布を取得した。実際のシステムでは、機械的なスキャンをせずに変位分布が取得できる変位測定法の確立が必要である。現在我々は提案手法に適した変位測定法について検討を行っている。

参考文献

- [1] C.R. Wagner, D.P. Perrin, R.D. Howe, N. Vasilyev, and P.J. del Nido: "Force Feedback in a Three-Dimensional Ultrasound-Guided Surgical Task," Proc. *14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 43-48, 2006.
- [2] Scott Brave, and Andrew Dahley: "inTouch: a medium for haptic interpersonal communication," *Ext. Abst. CHI '97*, pp. 363-364, 1997.
- [3] D. Sekiguchi, M. Inami, N. Kawakami, T. Maeda, Y. Yanagida, and S. Tachi: "RobotPHONE: RUI for Interpersonal Communication", *ACM SIGGRAPH 2000 Conference Abstracts and Applications*, p.134, 2000.
- [4] Katsunari Sato, Kouta Minamizawa, Naoki Kwakami, Susumu Tachi: "Haptic telexistence," *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, 2007.
- [5] S. Andrews, and J. Lang: "Interactive Scanning of Haptic Textures and Surface Compliance," *The International Journal of Robotics Research*, Vol.25, No.5/6, pp.537-549, 2006.
- [6] Tomohiro Kawahara, Shinji Tanaka, and Makoto Kaneko: "Non-Contact Stiffness Imager," Proc. *6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM07)*, pp. 99-106, 2007.
- [7] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda: "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3 no. 3, pp. 155-165, 2010.
- [8] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Kei Nakatsuma, and Hiroyuki Shinoda: "Touchable Holography," *ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, 2009.