

超音波音響放射圧を用いた非接触表面硬さ分布計測法

○藤原 正浩, 中妻 啓, 高橋 将文, 篠田 裕之 (東京大学)

Non-Contact Surface Compliance Distribution Measurement Using Ultrasound Acoustic Radiation Pressure

○Masahiro FUJIWARA, Kei NAKATSUMA, Masafumi TAKAHASHI
and Hiroyuki SHINODA (The Univ. of Tokyo)

Abstract: In this study, we propose a remote compliance measurement method for haptic communication. Our goal is realizing a non-contact, real time surface compliance distribution measurement system. For this purpose, our method utilizes an ultrasound phased array and a laser displacement sensor. Ultrasound convergent beam pushes a surface of an object scanning it electronically and makes displacement of the surface. After describing our proposed method, we report results of fundamental experiments.

1 はじめに

表面硬さの計測は、バーチャルリアリティにおける触覚提示や、触覚情報を伝送するための基礎的技術として重要である。将来的に触覚放送を実現するためには、放送用ビデオカメラのように遠隔からリアルタイムに表面硬さの分布を計測する必要がある。

また製造や医療の現場でも硬さの情報は有用である。特に、遠隔から非接触に表面硬さを測れば、表面が高温や粘着性であったり、傷がつきやすいなどの理由から接触子による硬さ計測が困難な場合にも適用できる。また、硬さが重要な品質となる製品においても、高速に非破壊的な計測ができるため、全数検査が可能となる。

これまでに提案されている非接触での硬さ計測方法には、エアジェットを用いて対象表面を加圧して対応する変位を測定するもの[1][2][3]や、高出力のレーザーを用いて振動を誘起し、その伝搬速度を計測するもの[4][5]などがある。

エアジェットを用いる方法では、ノズルから噴射された圧縮空気が対象表面に衝突したときの運動量変化によって表面に圧力を与え、変位を生じさせる。しかし、圧縮空気は速度は噴射された直後から数十 mm 程度で減衰し、また噴射点から離れるに従って噴射方向に垂直な断面における半値幅が大きくなるため、離れた位置にある対象表面上では変位を生じさせるほどの圧力には達しない。また、空間的に広範囲の硬さ分布

を計測するには加圧点を移動させる必要があるが、その場合はノズルを機械的に動かす必要があり、スキャンの速度が制限される。レーザーによって振動を誘起し硬さを計測する手法は主に金属材料に適用され、遠隔から内部の硬さ分布の異方性なども計測できる。しかしこれは、レーザーを金属表面に照射することでその点で生じる熱膨張や浸食によって振動を生じさせるもので、適用範囲が限定的である。

本稿では、遠隔からの表面硬さ分布の計測方法として、空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display; AUTD) のために開発された超音波フェーズドアレイとレーザー変位計を用いたシステムを提案し、このシステムにより対象物体の表面硬さ分布を遠隔から非破壊的に計測できることを確認した基礎実験について報告する。

2 計測原理

本稿では物体表面のある点の硬さを、微小変位が生じたときのその点の荷重と変位の比として定義する。すなわち荷重と変位には線形関係が成り立つと仮定し、自発的に動くものは対象外とする。

物体に非接触で荷重を加え、変位を生じさせる方法には先述のとおりエアジェットを用いるものがあるが、減衰量が大きく対象物体までの距離に制限がある。この欠点を補うためわれわれは、エアジェットの代わりに超音波振動子のフェーズドアレイにより測定点に音

響放射圧を生じさせる方法を提案する。音響放射圧は超音波の伝搬において観察される非線形現象の一つであり、伝搬が物体により遮られることでその物体表面に働く圧力のことをいう。音響放射圧の大きさ P は

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

で表わされる[6]。ここで E は超音波のエネルギー密度、 p は音圧、 ρ は伝搬媒質の密度、 c は媒質中の音速である。 α は物体表面における超音波の反射特性に依存する定数で一般に $1 \leq \alpha \leq 2$ の値をとり、完全吸収のとき $\alpha = 1$ 、完全反射のとき $\alpha = 2$ である。空中超音波が固体表面に入射する場合は、入射界面の音響インピーダンスが大きく異なるため、ほぼ完全反射とみなせる。

物体表面の一点に荷重を加えるためには、式(1)よりエネルギー密度 E の空間分布を制御すればよいことがわかる。これを実現する方法として超音波振動子によるフェーズドアレイを構成し、それぞれの振動子が出力する超音波の位相を制御することで空間中の一点に超音波ビームを集束させ、その点に音響放射圧を集中させることが可能となる。また、一般にフェーズドアレイにおいて開口サイズを D 、焦点距離を f 、波長を λ とすると、焦点に生じるビームの幅は $\lambda f / D$ 程度になることから、計測対象までの距離程度に開口を大きくすることで遠隔点からの硬さ計測が可能となる。この方法によって物体表面に超音波ビームを集束させたときの荷重 F は次のように概算される。音圧 p_0 の超音波振動子 N 個で構成されるフェーズドアレイの場合、焦点においてすべての振動子からの超音波の位相がそろっているとすると、その点での音圧は $p = Np_0$ となる。また、開口程度の焦点距離における超音波ビームの断面積は $S = \pi \lambda^2 / 4$ 程度となるので、式(1)より荷重 F は

$$F = PS \approx \frac{\pi \alpha \lambda^2 N^2 p^2}{4 \rho c^2} \quad (2)$$

で与えられる。

空間中の任意の点に音響放射圧を集束させるフェーズドアレイとしては、40kHz 超音波振動子を 18×18 個正形状に配置したものを用いる(図 1)。それらから出

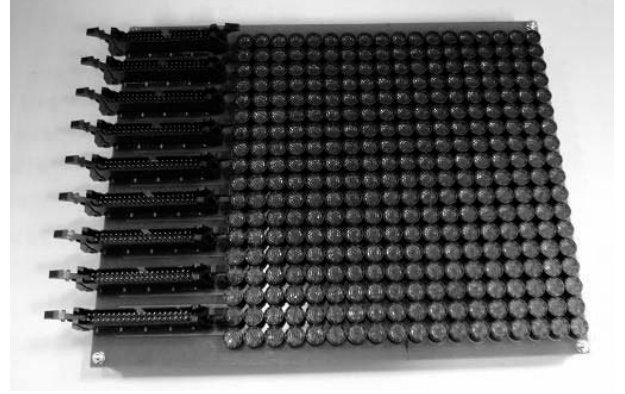


図 1 空中超音波触覚ディスプレイのフェーズドアレイ部。平面上に 326 個の超音波トランスデューサが並んでおり、各トランスデューサに入力する電圧信号の位相を制御することで、空中に超音波ビームの焦点を形成する。

力される超音波の位相は PC および駆動回路によって制御される。本デバイスは先行研究において触覚ディスプレイ用に開発されたものであり、以下 AUTD (Airborne Ultrasound Tactile Display) とよぶ。フェーズドアレイが放射する超音波の集束位置や変調周波数は、PC 上のソフトウェアによりリアルタイムに制御できる。実験的に確認されている超音波放射圧は 1.6 gf である。

半径 a の円形領域に等分布荷重 P を受ける半無限弾性体において、表面の荷重方向変位 u は

$$u = \frac{(1 - \sigma)Pa}{2G} \quad (3)$$

で与えられる[7]。ここで、 G は弾性体の剛性率、 σ はポアソン比である。柔軟な弾性ゴム ($G \approx 0.5 \text{MPa}$ 、 $\sigma \approx 0.49$) の硬さを計測した場合、式(3)を用いると変位は $1 \mu\text{m}$ 程度となり、AUTD からの超音波ビームにより生じた変位の計測にはこのオーダーの分解能があればよい。

AUTD から放射された集束超音波により対象物体表面に生じた変位は、三角測量方式のレーザー変位計により測定した。物体表面上の各点に超音波ビームの焦点を合わせ、その焦点における変位を計測することで硬さ分布を測定する。AUTD によりスキャンされる超音波ビームの焦点にレーザー変位計の計測点を追従させるため、レーザー変位計は自動 XY ステージ上に取り付けた。計測中の加圧点における荷重は物体表面上の

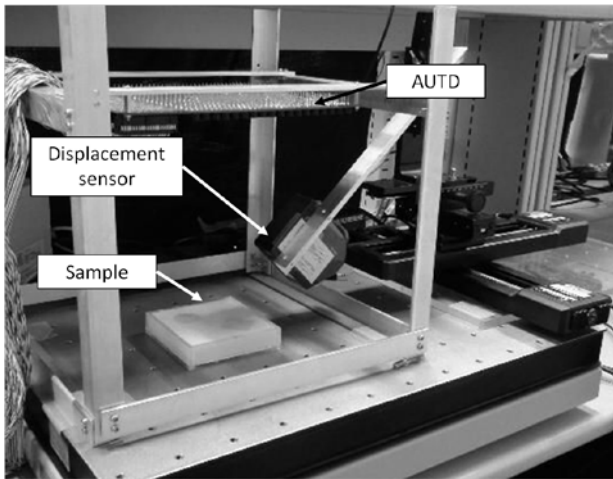


図2 システムのセットアップ. 対象物体表面を加圧する AUTD とそれにより生じる変位を計測するレーザー変位計よりなる.

焦点位置によらないため、変位の計測値分布が表面硬さの分布と等しくなる.

3 システムのセットアップ

本システムでは、AUTD の超音波フェーズドアレイおよび対象物体は固定し、各超音波振動子の位相を変化させることで加圧点をスキャンした。遠隔表面硬さ分布計測を行うために構成したシステムを図2に示す。システム全体は、物体表面を加圧するための AUTD、表面に生じた垂直変位を計測するためのレーザー変位計、そしてそれらを制御しデータを記録する PC からなる。微小な変位を計測するためシステム全体は除振台上に配置し、レーザー変位計を搭載する自動 XY ステージと AUTD は相対的な位置関係が変化しないように固定した。AUTD は計測対象の上方 20cm の高さに配置して下方向に超音波を照射した。

AUTD からの超音波照射との干渉を防ぐため、レーザー変位計は対象表面の法線から 45 度傾いた軸に沿ってレーザーを照射するように設置して計測した。この場合、変位と加圧点における表面曲率が十分に小さいときには、加圧点における法線方向変位が幾何的に $\sqrt{2}$ 倍されて計測されると近似できる。本稿の実験では、この近似が十分に成り立つことを予備実験により確認した。

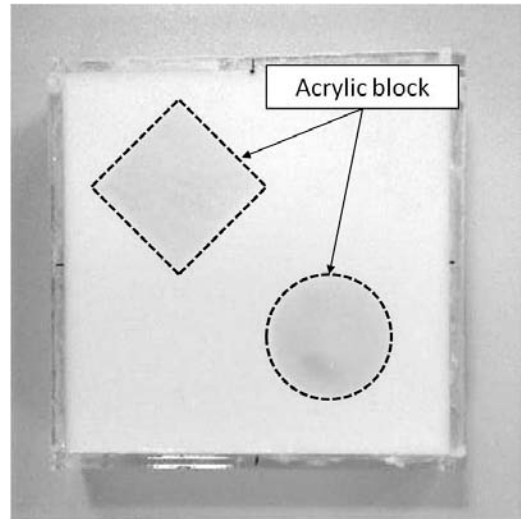


図3 非接触表面硬さ分布を計測する試料. 10cm×10cm×2cm の容器を人肌硬さのゲルで満たし、図の位置に正方形と円形の亚克力製ブロックを埋め込んだ。

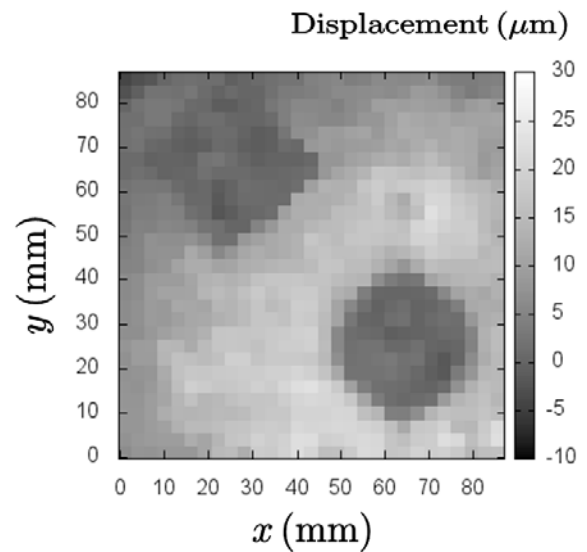


図4 提案したシステムにより図3の試料の表面硬さ分布を計測した結果. グレースケールの濃淡は加圧時の変位量を表す. アクリル製ブロックを埋め込んだ部分はそうでない部分に比べて変位量が小さいことが分かる.

4 実験

構成したシステムによって、人肌硬さのゲルにアクリルのブロックを埋め込んだ試料(図3)の表面硬さ分布を計測した。試料に用いたゲルはエクシールコーポレーションのウレタンゲルで、アスカーC硬度は0である。アクリルのブロックは2mm程度のゲルで覆われて

参考文献

- [1] M. Kaneko, T. Kawahara, and S. Tanaka: "Non-Contact Stiffness Imager," Proceeding of the 2004 IEEE, ICRA2004, pp. 1562-1567, 2004.
- [2] T. Kawahara and M. Kaneko: "Non-Contact Stiffness Imager for Medical Application," Proceeding of the 2005 IEEE, ICIA2005, pp. 350-355, 2005.
- [3] P. Burgholzer, C. Hofer, B. Reitingner, A. Mohammed, H.P. Degischer, D. Loidl, P. Schulz: "Non-contact determination of elastic moduli of continuous fiber reinforced metals," Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 301-306, 2005.
- [4] Zi-quan Lia, Xiao-rong Zhanga, Shu-yi Zhanga, Zhong-hua Shen: "Determination of the elastic constants of metal-matrixcomposites by a laser ultrasound technique," Composites Science and Technology, Vol. 61, pp. 1457-1463, 2001.
- [5] N. Tanaka and M. Kaneko: Skin Surface Shock Wave, Proc. of Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06. 28th Annual International Conference of the IEEE, (New York, USA, Aug. 2006), pp. 4123-4126.
- [6] 超音波便覧, 丸善株式会社, 1999.
- [7] 弾性学ハンドブック, 株式会社朝倉書店, 2001

いるが、アクリルはウレタンゲルに対して十分硬いと仮定できるため試料表面には硬さの分布が生じている。計測時は試料表面に超音波ビームの焦点を合わせ、水平方向には3mm間隔に走査した。

図4に試料の表面硬さ分布を提案したシステムによって計測した結果を示す。試料の容器内側から上下左右5mmの余白をとった内部を計測しており、各画素はその4つの頂点に対応する計測値の中央値を濃淡として表している。図3の試料においてブロックを埋め込んだ部分の変位量が小さくなっており、試料の表面硬さ分布を定量的に計測できていることが分かる。

5 考察

図4の左上の部分はその他のゲル部分に比べて変位量が小さくなっている。これは、この部分が周辺を容器壁面やブロックに囲まれているため、ゲルの硬さが小さくても境界条件によって硬さが大きく変化していることがわかる。また加圧による変位が負になっている部分があるが、これには試料が半無限弾性体とは異なる境界条件であることや外乱による計測ノイズが原因として考えられる。

触覚情報をリアルタイムに伝送するためには、全体の計測時間を短縮する必要がある。本実験では計測に数十分を要しており、そのうち主にレーザー変位計を移動させる時間が占める割合が大きい。同じ三角測量方式なら、レーザースポットをミラーの回転によってスキャンできる変位計を用いることで高速化できる。

硬さの計測範囲をより大きくするには、より大きな力で物体表面を押す必要があるが、それは超音波フェーズドアレイの出力を大きくするか、開口を大きくすることによって解決できる。しかし、開口を大きくするほどフェーズドアレイから計測対象までの距離を離す必要があるため、より計測可能距離の大きい変位計を用いなければならない。

謝辞

本研究の一部は戦略的創造研究推進事業（CRESTタイプ）研究領域「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」の支援を受けている。