

# 集束超音波を用いた表面硬さ分布の遠隔計測

藤原正浩\*・篠田裕之\*

## Remote Measurement of Surface Compliance Distribution Using Convergent Ultrasound

Masahiro FUJIWARA\* and Hiroyuki SHINODA\*

This paper proposes a method to measure the surface compliance distribution of an object from a remote position. The sensing system can be applied to various purposes including modeling and virtualizing an object with haptic information for haptic broadcasting where many users can touch and feel the real object freely at the same time using their own haptic displays. Our measurement system is composed of an ultrasound phased array generating acoustic radiation pressure on the remote object surface and a laser displacement sensor. The surface compliance is evaluated by the ratio of the surface displacement to the applied force. This system enables high-speed scanning of a spot pressurization point on a surface. We set up a system to examine the feasibility of the method. The distribution of the surface compliance comparable to the human skin was successfully measured for a flat object surface in the experiments.

**Key Words:** noncontact measurement, surface compliance distribution, hardness evaluation, ultrasound phased array, acoustic radiation pressure

### 1. はじめに

物体の弾性分布はその特性を示す重要な物理量の一つである。人間の知覚の代行という意味では、生体組織程度の弾性を測定する手法の開発は特に重要な課題であると考えられる。物体の弾性特性の測定には物体を加振するなど力学的な働きかけが必要である。これは受動計測が可能な多くの光学的計測法や音響計測法とは顕著に異なる点である。そのため従来の弾性測定法は接触プローブにより物体を加圧するなど、力学的接触を前提としたものがほとんどである。非接触弾性測定法としては、空気ジェットノズルを計測対象が近接する手法<sup>1),2)</sup>や、計測対象を加振するために高出力パルスレーザーを照射する手法<sup>3)</sup>などが開発されているが、幅広い柔軟物体の硬さを遠隔から測定する手法ははまだ実現されていない。空気ジェットを用いた方法で表面硬さ分布を得るためには、ノズルと物体表面との距離を一定値以下に保ちながら機械的に走査しなければならない。

一方、接触を伴う測定法が適さない計測対象は数多く存在し、たとえばもろく傷がつきやすい表面や粘度の高い表面において、表面にダメージを与えることなく弾性を評価する手法に対するニーズは大きい。また医療応用においてさまざまな体部位の硬さ分布を非接触かつ衛生的に取得することは、

病理組織の発見や健康状態の評価に有効であると考えられる。そこで本論文では、表面硬さ指標としての表面コンプライアンス分布を遠隔から測定する手法を提案する。具体的には空气中を1m以上伝搬可能な超音波の音響放射圧<sup>4)</sup>を用いて物体表面上の局所領域を遠隔から加圧し、それにより生じた変位を三角測量に基づく光学の変位計で測定する。機械的接触部がなくまた加圧点を電子的に設定できるため、原理的には測定点を高速に走査でき短時間で表面硬さ分布を取得できる。

本論文が目指す新しい応用の一つとして、一体多の触覚情報伝送システムの取得系がある<sup>5)</sup>。多数の人々が同時に同一の物体に触れる場合を模擬するには、物体の弾性やテクスチャなど触力覚特性をあらかじめ計測し、その物体モデルを構築することが必須のステップとなる。本研究はそのような計測システムの具体的実現方法を示すものである。

### 2. 硬さ分布評価の指標

材料評価を目的とする硬さ計測手法には長い歴史がある。金属の硬さにおける代表的な計測手法には、ブリネル硬さ試験やビッカース硬さ試験などがある。これらは物質の塑性変形に基づき硬さを測定するものであるが、ショア硬さ試験のように弾性変形に基づいた測定法もある。本論文で扱う硬さは物体の微小弾性変形に対する変形のしにくさであり、人間が触覚情報として得ている硬さを取得することを想定している。そこで提案システムにおいては機械コンプライアンス、すなわち物体表面上小領域に与えられる法線方向荷重に対する中心法線変位の比を測定値とし、皮膚と同程度の硬さの差異を取得するように測定レンジを設定する。加圧は直径1cm程

\* 東京大学大学院情報理工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

\* Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo (Received June 12, 2012)  
(Revised October 24, 2012)

度の円形領域を加圧することで人指による加圧を模擬し、その加圧中心における変位を表面変位の代表値として測定する。

一般に物質の硬さ計測手法は直接計測法と間接計測法<sup>6)</sup>の2種類に大別される。直接計測法は物体の表面に力を印加し、そのとき生じた変位を測定することで硬さを数値化するものである。荷重の印加点における硬さは、荷重と変位との比として得られる。一方、間接計測法は、対象表面とセンサからなる合成系の共振周波数などを測定することで硬さを間接的に推定する。間接計測法はその原理上、計測対象についての何らかの物理モデルを仮定する必要がある。たとえば共振周波数変化を用いる方法では、そのコンプライアンスの周波数特性や、接触状態の変化などに関する事前知識が必要である。本論文の提案手法は、対象の線形弾性を測定する直接計測法に分類される。

接触式の弾性分布計測法としては、物体表面上の点を接触子で加圧し、その表面上での変位分布を測定することで物体内部の弾性定数を推定する方法が提案されている<sup>7)</sup>。この方法では対象表面にマーカ列を配置することで、カメラにより変位分布を取得している。ほかにも、超音波振動子アレイを生体表面に接触させ、生体内部を伝搬する超音波の音響放射圧によって対象領域を加圧し、弾性分布を取得するエラストグラフィと呼ばれる手法も開発されている<sup>8)</sup>。本研究では加圧領域と変位測定点の空間位置を一致させたまま物体表面を走査し、表面硬さの2次元分布を取得することを考える。

### 3. 計測原理

本論文で提案する計測システムは Fig. 1 のように超音波フェーズドアレイとレーザー変位計で構成される。超音波フェーズドアレイは物体表面を加圧する集束超音波を生成するために用い、レーザー変位計は変形した物体の表面垂直変位を測定するために用いる。これらにより物体表面の加圧と変位の測定は非接触に行なわれ、硬さの分布は加圧点と変位測定点を物体表面上で走査することで得られる。提案手法では遠隔から物体表面を加圧でき、さらに加圧点を高速走査可能である。

提案システムが測定する硬さは物体表面の対象領域における垂直荷重と垂直変位との比である。ここで物体の弾性には線形性を仮定しており、垂直変位が十分に微小である範囲で硬さを測定する。超音波フェーズドアレイは用いる超音波の波長程度の焦点径をもつ集束超音波を生成することで対象表面上の円形領域を加圧し、その中心における垂直変位を測定する。

#### 3.1 超音波音響放射圧による加圧

超音波音響放射圧は、物体表面に入射した伝搬超音波によりその表面に生じる直流分の圧力である。超音波が物体表面に垂直に入射するときの音響放射圧の大きさ  $P$  は

$$P = \alpha \frac{p_0^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

で表わされる。ここで  $p_0$  は超音波の振幅、 $\rho$  は媒質密度、 $c$  は

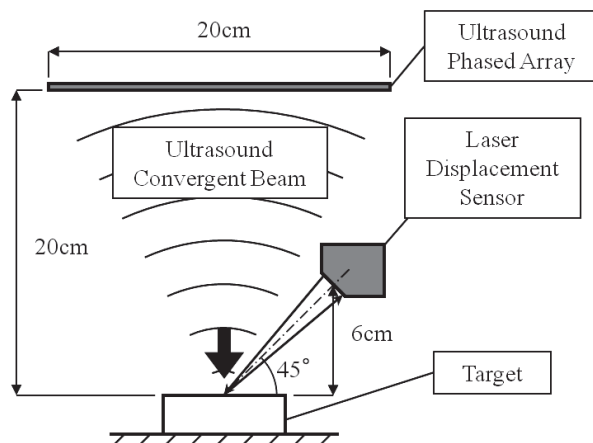


Fig. 1 Illustration of the proposed measurement system

音速である。 $\alpha$  は物体の音圧反射率で決定される係数であり、完全反射のとき 2、完全吸収のとき 1 である。以下に述べるように本論文で想定する条件において、超音波は物体表面でほぼ完全に反射するため、 $\alpha = 2$  と仮定して議論する。

媒質界面における超音波の強度反射率  $R$  は、それぞれの媒質の音響インピーダンス  $Z_1$ ,  $Z_2$  を用いて

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2)$$

と表わされる。標準状態の乾燥空気音響インピーダンスは  $428.6 \text{ Ns/m}^3$  であり、ほとんどの固体や液体の音響インピーダンスは  $10^6 \sim 10^7 \text{ Ns/m}^3$  のオーダーである。このとき空気と液体の境界や、空気と固体の境界における音の強度反射率  $R$  は  $R > 0.998$  となる。したがって空気中で物体に入射する音響エネルギーの 99.8% 以上は反射し、ほぼ完全反射とみなしてよいことがわかる。また空気中における超音波の吸収減衰係数は周波数に依存し、40 kHz の超音波においては 1 dB/m 程度である<sup>9)</sup>。したがってフェーズドアレイから 1 m 離れた点における音圧はフェーズドアレイ表面の 89% となり、このとき音響放射圧は 79% 程度であるので 1 m 程度までであれば物体表面を伝搬による減衰の影響を強く受けることなく加圧することができる。

物体表面上でスポット状の加圧領域を形成するため、超音波フェーズドアレイを用いて集束超音波を生成する。超音波フェーズドアレイは個別に駆動信号を制御可能な超音波振動子を同一平面上に配列させたデバイスであり、各振動子の駆動位相を適切に制御することで超音波ビームを形成することができる。この焦点におけるビーム径は、焦点がフェーズドアレイの開口と同程度までの距離であれば波長オーダーにまで集束可能である。このことから、より小さいスポット領域を加圧するためにはより高い周波数の超音波を用いる必要がある。その一方で、伝搬超音波の周波数が高いほど空気中での吸収減衰が大きくなる<sup>9)</sup>ため、提案手法では 40 kHz の超音波を用いることで人指程度の直径 1 cm 程度の領域を加圧するとともに、1 m 程度までの十分な測定距離を確保する。ま

Table 1 Specification of displacement sensor LK-G80

Mounting mode	Diffused reflection	
Reference distance	80mm	
Measuring range	±15mm	
Light Source	Laser Class	Class 3R
	Wavelength (JIS C6802)	650nm (visible light)
	Output	4.8mW
Spot diameter (at reference distance)	Approx. φ70μm	
Linearity	±0.05% of F.S.	
Repeatability	0.2μm	
Sampling period	20/50/100/200/500/1000μs	
Temperature characteristics	0.01% of F.S./°C	
Weight (including the cable)	Approx. 380g	

た超音波フェーズドアレイを用いることで生成する集束超音波の焦点位置を電子的に制御することができる。提案システムで用いている超音波フェーズドアレイ<sup>10)</sup>の焦点更新レートは現行試作システムにおいて4kHzであるため、加圧点を物体表面上で高速に走査することが可能である。

### 3.2 提案システムの測定限界

提案システムの硬さ測定分解能、測定時間は用いる超音波フェーズドアレイや変位計の仕様により決定される。物体表面上の面積  $A$  の円形領域を、大きさ  $P$  の音響放射圧で加圧したときの変位計の測定分解能を  $\delta$  とすると、測定可能なコンプライアンスの分解能  $\Delta c$  は

$$\Delta c = \frac{\delta}{PA} \quad (3)$$

である。測定可能な最大硬さは、本研究で用いる超音波フェーズドアレイ<sup>10)</sup>が20cm離れた物体表面の直径1cmの円形領域に  $1.5 \times 10^{-2}$  Nの荷重を印加し、生じた変位を繰返し精度0.2μmのレーザー変位計(LK-G80, Keyence corp., Table 1<sup>11)</sup>参照)を用いて測定する場合、約75kN/mである。一方、人間の皮膚のヤング率は表皮で136kPaである<sup>12)</sup>。このヤング率をもつ一辺の長さが1cmの立方体の向かい合う面を同様圧力で加圧したとき、硬さ  $k$  はフックの法則を用いて  $k = 1.36$  kN/mと得られる。したがって、本計測システムによって最大で皮膚表面の50倍以上の硬さまで測定できる。これは触覚情報としての表面硬さ取得の範囲としては十分であるといえる。

ただし、物体や測定系の微小振動や物体表面の条件による変位測定の誤差が無視できない雑音環境下では、雑音のパワーにより1サンプルの変位測定で装置の測定精度を達成することができない場合がある。この場合、加圧中の真の変位を一定とし雑音に白色性を仮定すれば、一定の時間区間で変位を複数回サンプリングして平均をとることで、SN比を向上させることができる。真の変位を  $s$  とし、 $N$  回の変位測定において  $i$  回目の測定における標準偏差  $\sigma$  の加法的雑音を  $n_i$

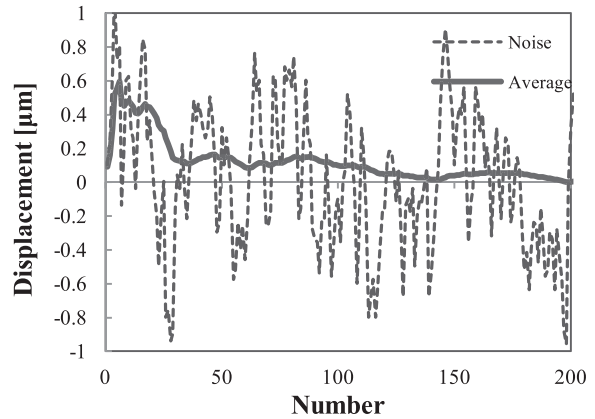


Fig. 2 Background noise and averaged background noise of measured displacement

( $i = 1, 2, \dots, N$ ) とすると各測定値  $x_i$  は  $x_i = s + n_i$  と表わされる。測定値の総和をとると、雑音成分の標準偏差は白色性より  $\sqrt{N}\sigma$ 、信号成分の振幅は  $Ns$  となるため、平均値  $x$  のSN比は  $\sqrt{N}$  倍となる。変位のサンプリング周期を一定とすれば、観測時間の平方根に比例して雑音成分比が低減される。Fig. 2に一例として静止ウレタンゲル試料の変位測定で生じた背景雑音の時系列データを破線で示す。サンプリング周期1msで0.2秒間測定しており、背景雑音の標準偏差は0.42μmである。Fig. 2の実線は1番目のデータから各データまでの平均値を示している。実際の背景雑音は完全な白色性ではないため、平均値は観測時間の平方根に必ずしも反比例しないが、この場合およそ30ms間の平均により、0.2μm以下の精度が達成できていることがわかる。

測定可能な空間範囲は超音波フェーズドアレイによる加圧が可能な範囲であり、フェーズドアレイの開口径に依存する。用いる超音波フェーズドアレイ上には超音波振動子が1cm間隔で  $18 \times 18$  の正方形格子点上に配置されているため、アレイに平行な平面内では開口径である一辺18cmの正方形の周辺までが加圧可能範囲である。また、アレイに垂直な方向については、集束焦点径を維持できる加圧可能範囲はアレイから開口径の2倍である40cm程度離れた領域までとなる。焦点中心位置の最小設定間隔は超音波フェーズドアレイシステムの位相分解能に依存し、本システムでは約0.5mmである。

計測システムにおける表面硬さ分布の測定時間  $T_m$  は測定点当たりの測定時間  $T_u$  と測定点数  $N_s$  の積であり、 $T_u$  は三つの要因によって決定される。

第一の要因は、超音波フェーズドアレイの焦点位置更新時間である。焦点位置の更新時間は究極的には使用する超音波の周期で決まる。現在の試作システムでは回路システムが律速段階になっており、本実験で用いるシステムでは0.25msである。仮にこれを  $T_u$  とし、たとえば測定点の個数を  $N_s = 1000$  とすると、全体の測定時間は  $T_m = T_u N_s = 0.25$  sとなる。第二の要因は前述の必要な変位測定精度を得るための変位計

の計測時間であり、第三の要因は硬さ計測のために本質的に必要となる対象表面の応答速度である。たとえば周波数 1kHz で測定したコンプライアンスは、必ずしも人間が感じる柔らかさに比例しているとはいえず、少なくとも数十 Hz 程度以下までの比較的長い時定数での応答を観測する必要があると考えられる。たとえば  $T_u = 0.1\text{s}$  とすると  $N_s = 1000$  としたときの計測時間は 100s となり、これが計測時間を決める主要因となる。なおこの要因による計測時間は、超音波加圧の変位計測の走査パターンを工夫することで短縮可能と考えられるが、本論文では最もプリミティブな計測システム、すなわち各点での計測時間として表面の応答時間以上の時間を確保したシステムで実証実験を行なう。

#### 4. 表面硬さ分布計測実験

提案手法の有効性を確認するため、超音波フェーズドアレイを用いた計測システムを試作し、ウレタンゲル試料の表面硬さ測定を行なう。まず超音波出力と加圧力との関係と、その距離依存性について実験で確認する。つぎに、異なる硬さの試料に対し提案手法が適切な硬さ測定を行なえることを示す。また矩形波変調を行なった集束超音波により加圧することで、表面硬さの動的な特性を測定できることを示す。最後に、表面硬さ分布が既知である試料に対し適切な表面硬さ分布が得られることを示す。

##### 4.1 実験のセットアップ

Fig. 1 に示す計測システムによる実験セットアップの外観を Fig. 3 に示す。開口サイズ約 20 cm の超音波フェーズドアレイを静止した計測試料の上方 20 cm の位置に固定する。レーザー変位計は XY 自動ステージに設置し、測定点を超音波フェーズドアレイの焦点位置に追従させる。また変位計は超音波の伝搬を遮らないよう、物体表面に対して 45 度の角度から測定する。本実験において物体表面の変形は微小であり、角度によらず表面変位に比例した変位測定値が得られることを確認している。

物体表面の加圧時は超音波フェーズドアレイの焦点を試料表面に設定し、面上を等間隔に走査する。超音波振動子の共振周波数は 40 kHz であり、このとき室温 20°C における乾燥空気中の波長が 8.58 mm であるので、超音波ビームの焦点径はこの程度となる。また出力される音響放射圧による荷重は、Fig. 4 に示すように超音波フェーズドアレイから 20 cm ~ 30 cm の距離範囲内では  $15 \times 10^{-3}\text{N}$  の一定値であることを電子天秤 (EL1200, 島津製作所) により確認している。超音波焦点は電子天秤の測定面 (170 mm × 130 mm) の中心に一致させており、荷重の指示値はこの測定面内において音響放射圧を空間積分した値である。これにより、フェーズドアレイの開口サイズ以上離れた領域ではほぼ一定の加圧力が得られる範囲があり、この範囲では荷重一定として表面硬さ推定できることがわかる。また、12 cm 以上 46 cm 以下の距離範囲内においては  $(14 \pm 1) \times 10^{-3}\text{N}$  の荷重が出力されている。さらに、40 kHz 超音波出力はパルス幅変調 (PWM) により

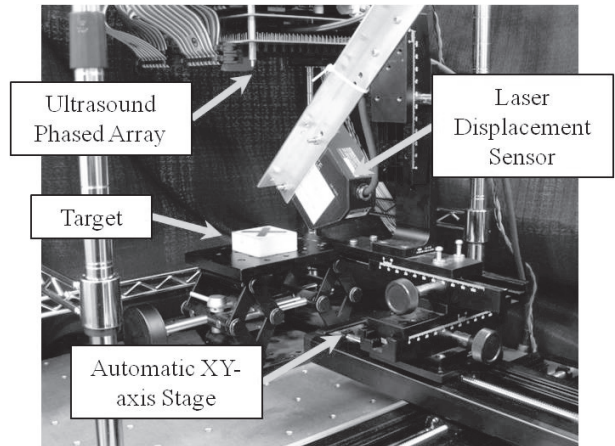


Fig. 3 A photo of the measurement system

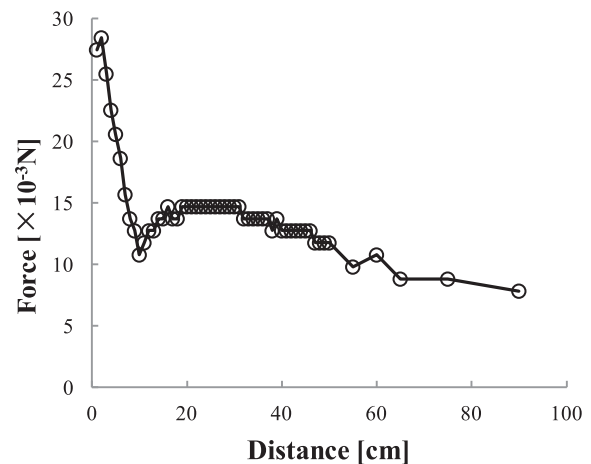


Fig. 4 Distance dependence of acoustic radiation force

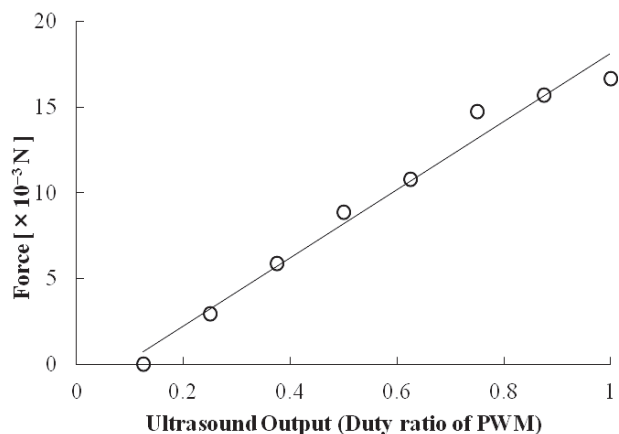


Fig. 5 Linearity of acoustic radiation force against duty ratio

コントロールされ、Fig. 5 に示すようにデューティ比と荷重にはほぼ線形な関係が成り立つことを確認した。

##### 4.2 表面硬さ分布計測の評価

定量的な硬さ指標であるアスカ C 硬さの増減と、提案システムで測定した測定変位との関係を Fig. 6 に示す。被測定対象として底面 5 cm × 5 cm、高さ 2 cm の直方体容器に満たしたウレタンゲル (エクシールコーポレーション) 試料を用

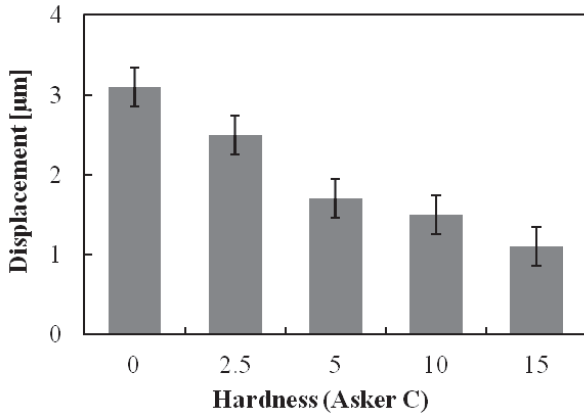


Fig. 6 Relationship between displacement and Asker C hardness

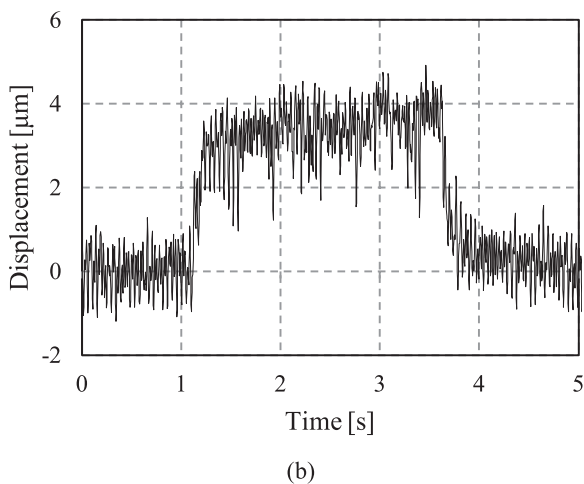
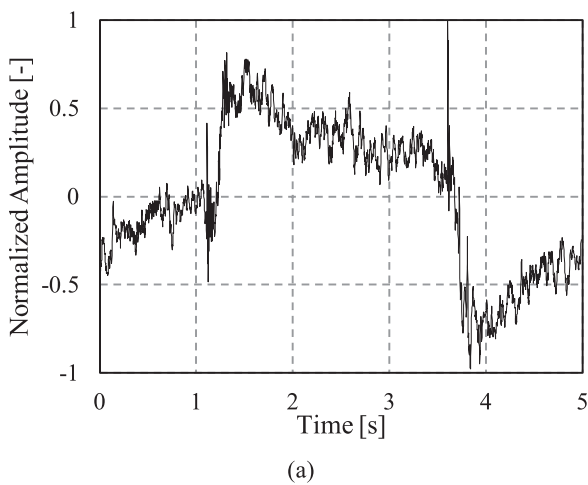


Fig. 7 (a) Waveform of acoustic radiation pressure modulated by square wave. The waveform was obtained with a microphone. (b) Displacement of urethane gel surface pressed by the acoustic radiation pressure (a)

いた。ウレタンゲルのアスカー C 硬さの増加に対し、表面変位が単調に減少していることがわかる。応答変位はウレタンゲル固有の物性であるアスカー C 硬さ以外に、成形したとき

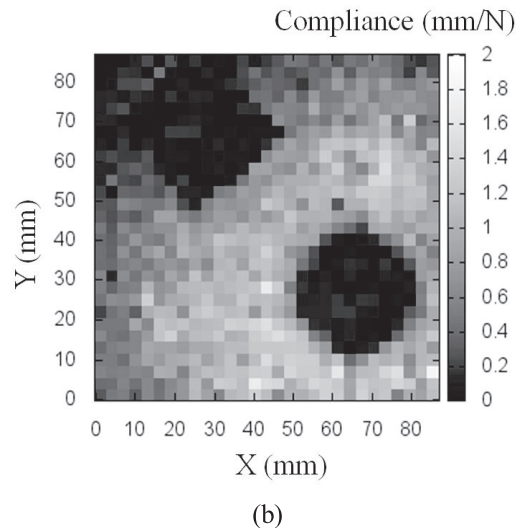
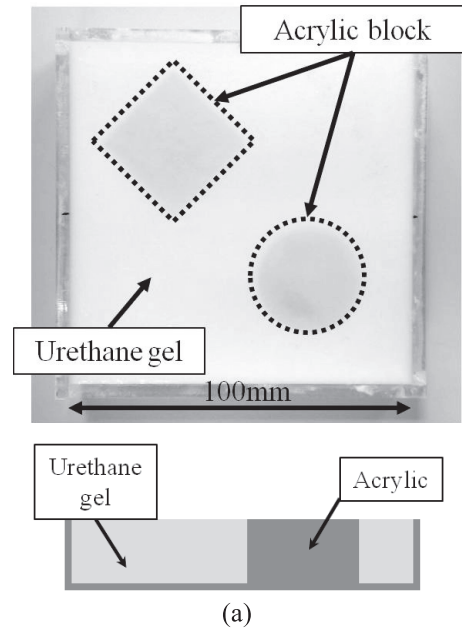


Fig. 8 (a) Top view and a section view of a urethane gel sample with implemented acrylic blocks. (b) Measurement result of surface displacement distribution of the sample

の形状や容器などによる支持条件・境界条件にも依存するため一般的な定量化はできないが、Fig. 6 の結果によって同一条件のもとではアスカー C 硬さと変位との間に単調減少の関係があることが示された。

時間変調加圧による測定を検証するため、5 秒周期の矩形変調を施した音響放射圧の時間波形をマイクロフォンで取得した結果を Fig. 7 (a) に示す。またアスカー C 硬さ 0 のウレタンゲルを同様の集束超音波で加圧したときに、その表面で生じた変位の時間波形をレーザー変位計で測定した結果を Fig. 7 (b) に示す。これらより立ち上がり時間は約 0.1 秒であり、ウレタンゲル試料と同等の粘弾性をもつ物体の場合、時間変調周波数が数 Hz 程度までの加圧によってコンプライア

ンスの直流応答をおおむね推定できることがわかる。

表面に硬さ分布をもつ試料として、Fig. 8 (a) に示すアクリルブロックを埋め込んだウレタンゲル試料を用い、その表面硬さ分布を測定した。底面が 100 mm × 100 mm、高さ 20 mm の容器にウレタンゲルを満たしている。試料表面において 30 × 30 点を 3 mm 間隔で走査し、表面硬さ分布を取得した結果を Fig. 8 (b) に示す。測定結果はアクリルブロックが存在する部分においてコンプライアンスが低くなっており、表面硬さ分布が可視化されていることがわかる。一方で、ウレタンゲルの弾性定数は一様であるにもかかわらず (X, Y) = (10 mm, 80 mm) 付近ではほかのウレタンゲル領域よりもコンプライアンスが低くなっている。これは、その部分が周囲をアクリルブロックや容器内壁に囲まれており、なおかつウレタンゲルは体積圧縮率が低いためである。この結果は、本計測システムが物体表面の物性を測定するのではなく、直接測定されるのは実際に加圧したときの応答としての硬さであることを示している。なお本計測においては、時間的にステップ状の加圧に対して変位が定常値に達するまで待機した後、最終的な定常変位を用いてコンプライアンスを算出している。XY 自動ステージの 1 ステップの移動時間も考慮し、1 測定点当たりの測定時間は 3 秒としている。したがって、900 点の測定点に対して 45 分の測定時間を要した。

## 5. おわりに

本論文では、触覚情報としての実物体の表面硬さ分布を遠隔から非接触に測定する手法を提案・実装し、その有効性を評価した。特に超音波フェーズドアレイによる音響放射圧による加圧と三角測量型のレーザー変位計による変位測定によって、900 測定点の表面硬さ分布を非接触に取得できることを示した。今後は変位分布測定の高速度による表面硬さ分布測定のリアルタイム化を目指す。

## 参考文献

- 1) 篠田, 山崎: 脈動噴流を用いた表面硬さの非接触センシング, 計測自動制御学会論文集, **28**-10, 1152/1159 (1992)
- 2) T. Kawahara, S. Tanaka and M. Kaneko: Non-Contact Stiffness Imager, *The International Journal of Robotics Research*, **25**-5-6, 537/549 (2006)
- 3) P. Burgholzer, C. Hofer, B. Reitingner, A. Mohammed, H.P. Degischer, D. Loidl and P. Schulz: Non-contact determination of elastic moduli of continuous fiber reinforced metals, *Composites Science and Technology*, **65**-2, 301/306 (2005)
- 4) T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka and C. Matsuoka: A general theory of Rayleigh and Langevin radiation pressures, *Acoustical Science and Technology*, **21**-3, 145/152 (2000)
- 5) M. Fujiwara, K. Nakatsuma, M. Takahashi and H. Shinoda: Remote Measurement of Surface Compliance Distribution Using Ultrasound Radiation Pressure, in *Proc. of IEEE World Haptics Conference 2011*, 43/47 (2011)
- 6) T. Shiina, Y. Murayama, Y. Hatakeyama, S. Takenoshita and S. Omata: Development of a breast cancer checker using a tactile array sensor and a tactile display system, *Proc. of the 22nd Sensor Symposium*, 402/405 (2005)
- 7) B. Bickel, M. Bacher, M.A. Otaduy, W. Matusik, H. Pfister and M. Gross: Capture and modeling of non-linear heterogeneous soft tissue, *ACM Transactions on Graphics (TOG): Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009*, **28**-3 (2009)
- 8) J. Ophir, I. Cespedes, H. Ponnekanti, Y. Yazdi and X. Li: Elastography: A quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues, *Ultrasonic Imaging*, **13**-2, 111/134 (1991)
- 9) B.D. Lawrence and J.A. Simmons: Measurements of atmospheric attenuation at ultrasonic frequencies and the significance for echolocation by bats, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **71**-3, 585/590 (1987)
- 10) T. Hoshi, T. Iwamoto and H. Shinoda: Non-contact Tactile Sensation Synthesized by Ultrasound Transducers, *IEEE Transaction on Haptics*, **3**-3, 256/260 (2010)
- 11) KEYENCE Japan: ヘッド部 LK-G80, [http://www.keyence.co.jp/henni/laser\\_henni/lk\\_g/lk\\_g80](http://www.keyence.co.jp/henni/laser_henni/lk_g/lk_g80)
- 12) T. Maeno, K. Kobayashi and N. Yamazaki: Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors, *Bulletin of JSME International Journal*, **41**-1, 94/100 (1998)

## [著者紹介]

### 藤原正浩 (学生会員)



2010年東京大学工学部計数工学科卒業。2012年同大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。現在、同専攻博士課程在学中。触覚情報との遠隔計測、同時多人数への提示・共有、それらの応用に興味をもつ。

### 篠田裕之 (正会員・フェロー)



1988年東京大学工学部物理工学科卒。90年同大学院計数工学科修士、同年より同大学助手、95年博士(工学)。同年東京農工大学講師、97年同助教授、99年 UC Berkeley 客員研究員を経て 2001年東京大学大学院情報理工学系研究科助教授、2007年同准教授、2012年同教授。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス、センサネットワーク、二次元通信、ヒューマンインタフェース、光・音響・生体計測などの教育と研究に従事。