

超音波回折パターンを利用した表面粗さ計測

Measurement of Surface Roughness Using Ultrasound Diffraction Pattern

○神垣 貴晶 (熊本大) 中妻 啓 (熊本大) 正 星 貴之 (名古屋工業大)
大嶋 康敬 (熊本大) 鳥越 一平 (熊本大)

Takaaki Kamigaki, Kumamoto University, 145d8514@st.kumamoto-u.ac.jp
Kei Nakatsuma, Kumamoto University, nakatsuma@mech.kumamoto-u.ac.jp
Takayuki Hoshi, Nagoya Institute of Technology, star@nitech.ac.jp
Yasutaka Oshima, Kumamoto University, yasutaka@tech.eng.kumamoto-u.ac.jp
Ippei Torigoe, Kumamoto University, torigoe@kumamoto-u.ac.jp

This paper proposes a new method for measuring haptic surface roughness remotely. Specially, our target is to measure surface roughness of millimeter order. Proposed method consists of two ultrasound transducers. One is for generating ultrasound. Another one is for detecting sound pressure distribution formed by interfering with reflected waves from a measuring object. A sound pressure distribution changes according to surface roughness of a measurement object. In this paper, we assumed that diffraction occurs on a measuring object surface. Based on the hypothesis, we made a physics model. We conducted fundamental simulations and experiments through the use of the model. We report their results.

Key Words: Surface Roughness Measurement, Remote Sensing, Haptics, Ultrasound, Diffraction

1. はじめに

本稿では、触覚情報としての表面粗さを非接触・遠隔で測定する手法を提案し、その基礎的検討について述べる。

表面粗さは物体の特性を示す物理量であり、物体に触れたときの質感の要因となる触覚特性の1つである。表面粗さは、物体表面上の幾何学的凹凸を測定することにより評価される。従来の表面粗さの測定法として、ダイヤモンドなどの触針で物体表面上をなぞる触針式が幅広く使われている。この手法は、物体表面を直接なぞることにより凹凸を検知しているため、取得情報の信頼性は高いが対象表面を傷つけてしまう。非接触な表面粗さ測定法としては、触針の代わりとして、レーザー光を用いて対象表面上を走査する手法がある。近年では、対象表面上での散乱光を用いた手法も提案されている[1][2]。光学的手法は、計測対象表面の光学的特性に左右されるため、光を通す、または吸収する表面を持つ物体には適用が困難である。この様に、様々な特性を持つ表面に対して、遠隔からの測定手法は未だ実現されていない。

それに対し、対象表面の粗さを非接触・遠隔から測定することが好ましい場合は数多く考えられる。例えば、製品の表面を傷つけずに表面粗さを評価する手法に対するニーズは高い。また医療分野において、体の様々な部位の粗さ情報を取得することを考えた場合、安全面・衛生面から非接触・遠隔で計測することが好ましい。

さらに、情報通信分野において、触覚放送と呼ばれる新たなコミュニケーション方法も確立しつつある[3]。触覚放送は、従来の1対1の遠隔コミュニケーションとは異なった、テレビ放送などの1対多の遠隔コミュニケーションを目的としている。1対1のコミュニケーションの場合、TELESARV[4]の様にユーザの手と同期したロボットハンドを用いて、ユーザは遠隔地にある物体に触れ、その物体の質感を感じることができる。しかし、1対多のコミュニケーションの場合、上記と同様の手法で、多数のユーザが同時に、同一の物体に触れることは不可能である。そこで、触覚放送実現のためには、予め対象物体の弾性やテクスチャなどの触覚特性を

計測し、その物体のモデルを構築、その後、各ユーザの手元でそのモデルを再現する必要がある。

これらの応用例を踏まえ、本稿では触覚情報としての表面粗さを非接触・遠隔で計測する手法を提案する。提案手法は、測定対象表面に遠隔から超音波を照射し、対象表面上での反射波の干渉により形成された音圧分布を測定する。本稿では、測定された音圧分布を表面粗さの指標とする。提案手法の測定側にアレイを用いることで、瞬時に音圧分布を取得することが可能となる。これにより、リアルタイムでの遠隔診断やテレビの生放送などでの応用が可能となる。

2. 表面粗さ評価の指標

表面粗さの測定は材料評価を目的とした工業分野において長い歴史を持つ。従来の測定法は、マイクロメートルオーダー以下の表面粗さ測定に適している。それに対し、我々の目指すシステムは触覚情報としての表面粗さの測定である。人のアクティブタッチにより知覚できる表面粗さは、ナノメートルオーダー[5]から数ミリメートルオーダーである。従来の手法では、ミリメートルオーダーの測定が困難である。しかし、触覚的な粗さを扱うにはミリメートルオーダーの粗さを計測する必要がある。そこで、本稿で扱う表面粗さは特に、ミリメートルオーダーの表面粗さとする。

一般に表面粗さの計測手法は、直接法と間接法の2種類に大別される[2]。直接法は、触針式のように表面の形状を直接得る手法である。また、新しい直接法としてGelSight[6]が挙げられる。間接法は散乱光を利用した手法の様に、表面形状を幾何学的統計量として得る手法である。間接法はその原理上、計測対象が測定される物理情報にどのように影響を及ぼすか、物理モデルを仮定する必要がある。本論文の提案手法は、試料表面における超音波の散乱および干渉により形成された音圧分布を測定するので、間接法に分類される。

超音波を用いた表面粗さ計測法[7][8]は既に提案されている。しかし、これらの先行研究においては計測対象と測定センサの距離が近く、測定対象表面はマイクロメートルオーダーの表面粗さとしている。

提案手法では、超音波を用いて遠隔から特に、ミリメートルオーダーの表面粗さを計測することを目標とする。

3. 計測原理

本論文で提案する手法は超音波振動子2つから構成される。1つは、超音波を発生させるために用い、もう1つは測定対象表面上からの反射波を測定するために用いる。受信側の振動子を一方向に走査することにより、音圧分布の取得が可能となる。

空中における超音波の物体表面における反射はほぼ完全反射である。また、媒質として空気を用いているので、対象表面の光学的特性に左右されない。

本稿では、送受信共に 40 kHz の超音波振動子を用いる。一般に、音響エネルギーの減衰は周波数および媒質の粘性や熱伝導率に依存する。空中における 40 kHz の超音波の減衰は約 1 dB/m である。このことより、測定対象と測定系が数十センチ離れている遠隔計測にも適用できる。40 kHz の波長は 8.5 mm であるので、対象表面の凹凸の波長が 8.5 mm の表面粗さが本稿における提案手法の測定限界である。

以上のことより、我々が提案するシステムは遠隔からミリメートルオーダーの表面粗さの計測が可能である。

本稿では、対象表面上で超音波の回折が起きていると仮定する。回折は、ホイヘンスの原理により説明される。一般に回折が起きた際、遠場であるフラウンホーファー領域における観測面での強度分布は、入射場における強度分布を、フラウンホーファー近似を用いてフーリエ変換した分布として観測される。観測面が波の入射場から遠くなるほど、フラウンホーファー近似により近づくため、観測面での音響場はフーリエ変換による近似により近づく。

以降の章では、この性質を利用した物理モデルを導入し、それに基づいたシミュレーションおよび実験の結果について述べる。

4. 物理モデル

本論文では図 1 (a), (b) の様な 2 次元の物理モデルを取り扱う。物理モデルは幅 D_S の測定対象に幅 D_R 、深さ d の開口を1つ設けたものとする。図 2 (a) の様に、測定対象表面に波長 λ の平面波が入射する。その後、対象表面で回折した波は互いに干渉する。図 2 (b) の様に、原点 O から (x, y) の位置における点 $P(x, y)$ で干渉の様子を観測することを考える。点 P はフラウンホーファー領域にあると仮定する。点 P における波の強度は、フレネル・キルヒホッフの回折式を基に式(1)の様に得られる。フレネル・キルヒホッフの回折式はホイヘンスの原理を数学的に表したものである。

$$U = \frac{-jA}{\lambda S_0} e^{jkS_0} \left\{ D_S \operatorname{sinc} \left(kp \frac{D_S}{2} \right) + \left(e^{-j\frac{4\pi d}{\lambda}} - 1 \right) D_R \operatorname{sinc} \left(kp \frac{D_R}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 A は対象表面上での入射時の波の強度、 k は波数、 S_0 は点 P の原点 O からの距離 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 、 p は x/S_0 である。式(1)は二つの式から成る。1つは測定対象の全体における波の強度分布である矩形波をフーリエ変換した式である。もう1つは開口の幅における波の強度分布である矩形波をフーリエ変換した式である。開口成分を観測するには、開口の深さ d が関係している。また、上述したように、観測面が遠くな

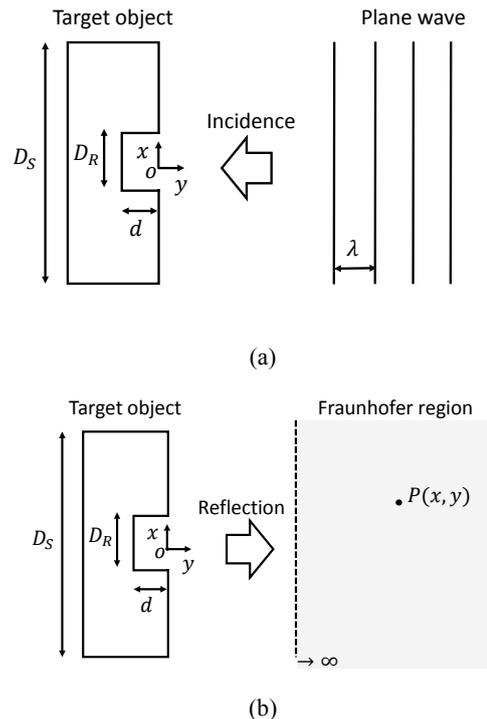


Fig. 1 (a) State of plane wave incident to a target object, (b) State of reflection from a target object surface

るほど、フラウンホーファー近似を用いてフーリエ変換した分布に実際の音響場がより近づく。そのため、式(1)のパラメータ y も観測面での強度分布に関係している。

本稿では、対象表面で回折が起きているかの確認として、対象全体の幅の要素についてのみ考える。観測面でどのような音圧分布になるのか、式(1)を基に、2つのシミュレーションを行った。1つは、試料表面から観測面までの距離は変えず、対象全体の幅のみを変化させたシミュレーション、もう1つは、対象の幅を固定し、観測面の距離を変えたシミュレーションを行った。図 2、図 3 にシミュレーションの結果を示す。横軸は観測面での位置 x 、縦軸は各位置における波の振幅値の絶対値を対数表示した値を表す。

1つ目のシミュレーションについてまず述べる。表 1 にシミュレーションにおけるパラメータの値を示す。図 2 より、測定対象の幅が広がるほど、ピークの出る周期が早くなることが確認される。これは、式(1)における sinc 関数の性質を表している。

次に、2つ目のシミュレーションについて述べる。測定対象の大きさを 50mm とし、 y の値を 200mm と 250mm として比較する。他の条件は1つ目と同じ条件で行った。図 3 より、観測面が対象から近いほど、ピークの出る周期が早くなることが確認される。これは、1つ目のシミュレーションと同様、式(1)における sinc 関数の性質を表している。

5. 実験

本稿では、シミュレーションと同様の結果が得られるかの確認として、シミュレーションと同様2つの実験を行った。

Table 1 Parameter of Equation (1) in a simulation

A	1
λ	8.5 mm
x	0 ~ 100 mm
y	200mm
D_S	25mm~50mm (5mm at a time)
D_R	0 mm

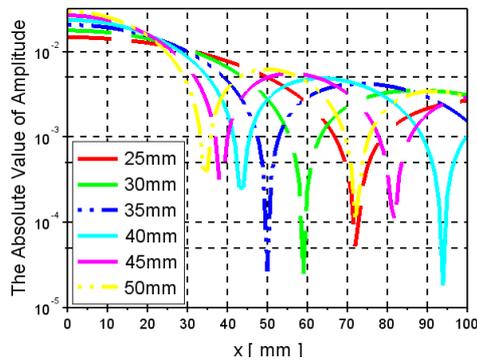


Fig. 2 The result of the first simulation

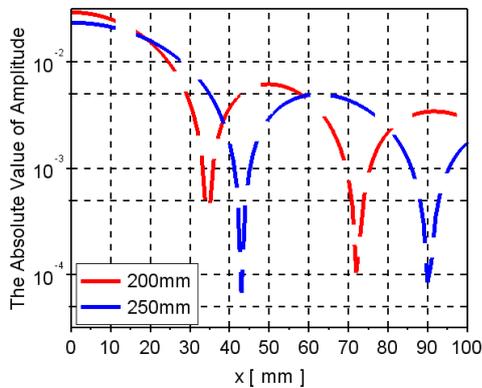


Fig. 3 The result of the second simulation

5.1 セットアップ

提案した物理モデルを再現するためには2つの条件を満たす必要がある。1つは、測定面が測定対象に十分に対称であるという条件である。もう1つは、壁などの周囲からの反射波および送信側からの直接波がないという条件である。

実験構成の概略図および実際に使用した実験構成の外観を図4(b), (c)に示す。超音波振動子は送受信共に同じ高さに設置してある。送信用の振動子は、試料の中心とy軸方向に同軸になるよう設置し、送信用の振動子の中心点を測定系の原点Oとした。受信側の振動子は、1軸ステージに取り付けてあり、x方向に走査させる。この走査により、音圧分布を取

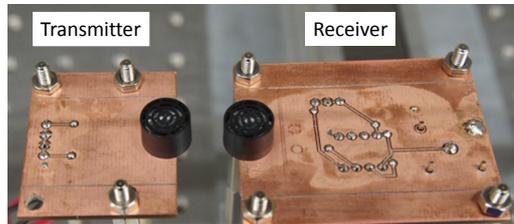
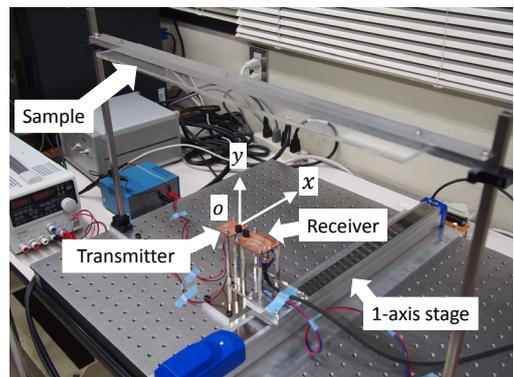
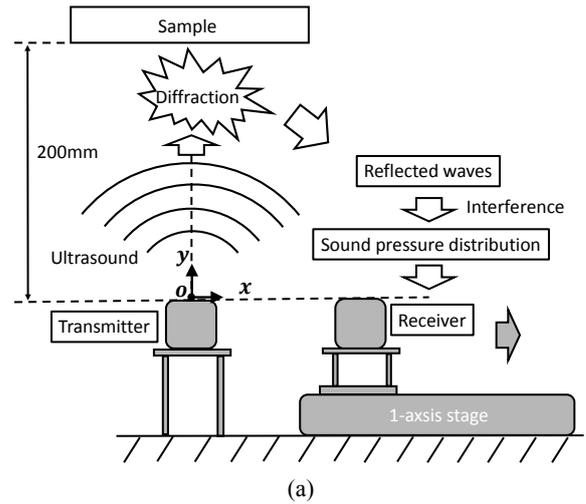


Fig. 1. (a) The schematic diagram of our system, (b) Actual appearance of the experimental setup, (c) Magnification of ultrasonic transducers for transmission and for reception

得することが可能となる。受信側の振動子が $x=0$ の場合、振動子間の中心距離は 15mm である。実験で使用する試料は、横方向の長さ 520mm、板厚 4mm のアクリル板を使用した。試料の長さ比べ、振動子間の中心距離は小さく、受信側の振動子は、原点 O にあると見なせる。これより、測定面は測定対象に対し、十分に対称とみなせる。よって、1つ目の条件が満たされる。

本稿で使用した 40 kHz の振動子（日本セラミックス株式会社、T4010A1）の指向性は 30° 付近まで無視できる。試料と振動子間の距離は 200mm とした。受信側での指向性を考慮しないでもいいよう、受信側の振動子は x 方向に原点から 100mm まで走査させる。走査分解能は 1mm とし、各測定点で 10 回測定した。図 4(c) のように、送信用の駆動回路および受信回路は自作した。

本稿では振動子からバースト波を発生させ、その反射波を測定する。これにより、時間軸上で試料からの反射波成分のみの切出しが可能となり、周囲からの反射波および送信側からの直接波を無視できる。これにより、2つ目の条件が満たされる。本稿では、送信用の振動子に入力する 40 kHz の矩形波の波数は 5 つとした。

5.2 実験結果

5.2.1 試料の幅を変えた場合

1つ目のシミュレーションの値と同様、最小 25mm、最大 50 mm で、その間を 5mm ずつ大きくした幅の試料を用いた。図 5 に実験結果を示す。グラフの横軸は測定位置 x を意味し、縦軸は、各測定点での測定値を 10 回平均した 40 kHz 成分の振幅値の絶対値の対数表示を意味する。図 5 より試料の幅が大きいくほど、ピークの数が増える傾向が確認される。この傾向は、sinc 関数の性質を表している。また、1つ目のシミュレーション結果とほぼ同様の位置 x で、次のピークへ向かう傾向が見られる。

5.2.2 観測面の距離を変えた場合

試料の幅を 50mm の 1 種類に固定し、試料と振動子間の距離を 200mm と 250mm の 2 種類で実験を行った。実験に使用した試料は、1つ目の実験と同じものを使用した。振動子の指向性を考慮し、100mm の範囲までで比較を行う。図 6 に実験結果を示す。グラフの横軸および縦軸は、1つ目の実験と同様である。図 6 は 2つ目のシミュレーション結果に近い位置に谷が見られる。また、谷の位置が観測面の距離に応じて移動する傾向がシミュレーション結果と同様見られる。

これは、観測面が遠くなるほど、フーリエ変換による近似に実際の音響場がより近づくことを示している。

2つの実験より、理論通りの音圧分布が取得できたことが示された。シミュレーション結果と実際の結果の音圧分布には若干ずれが生じている。これは、観測面が遠くなるほど、フーリエ変換による近似に実際の音響場がより近づく性質が原因と考えられる。よりシミュレーション結果に近い分布を取得するためには、観測面をより遠くする必要がある。

6. 結論

本稿では、触覚情報としての表面粗さを遠隔で計測するための手法を提案した。提案手法は、物理モデルに基づき再現される。本稿では、対象表面で回折現象が起きていると仮定し、物理モデルを作成した。物理モデルに基づき、シミュレーションおよび2つの基礎的な実験を行った。それらの実験により、物理モデルの妥当性を示した。今後は、本稿での物理モデルに基づき、実際に凹凸のある表面の計測を目指す。

文 献

[1] M. Kurita and Z. Deng, “散乱光を用いた直交二方向の光学的表面粗さ測定法,” 1997.
 [2] 高谷 裕浩, “光回折・散乱を利用した加工表面計測(はじめての精密工学),” 精密工学会誌, vol. 73, no. 12, pp. 1308–1311, 2007.
 [3] M. Fujiwara and K. Nakatsuma, “Remote measurement of surface compliance distribution using ultrasound radiation pressure,” ... (WHC), 2011 IEEE, pp. 43–47, 2011.

[4] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa, and S. Tachi, “Design of TELESAR V for transferring bodily consciousness in teleexistence,” 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., pp. 5112–5118, Oct. 2012.
 [5] L. Skedung, M. Arvidsson, J. Y. Chung, C. M. Stafford, B. Berglund, and M. W. Rutland, “Feeling small: exploring the tactile perception limits,” Sci. Rep., vol. 3, p. 2617, Jan. 2013.
 [6] M. K. Johnson, F. Cole, A. Raj, and E. H. Adelson, “Microgeometry capture using an elastomeric sensor,” in ACM SIGGRAPH 2011 papers on - SIGGRAPH '11, 2011, p. 1.
 [7] M. N. F. Saniman and I. Ihara, “Application of Air-Coupled Ultrasound to Noncontact Evaluation of Paper Surface Roughness,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 520, p. 012016, Jun. 2014.
 [8] G. P. P. Gunaratne and K. Christidis, “Measurements of surface texture using ultrasound,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50, 2001.

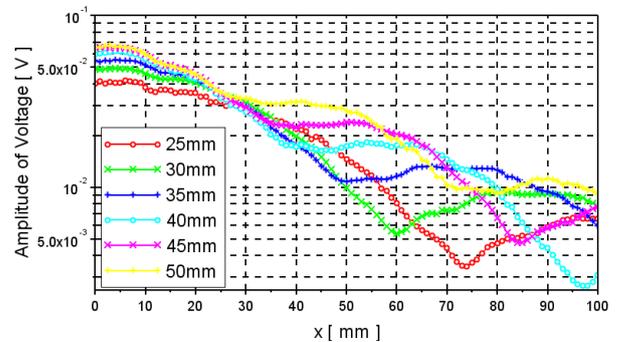


Fig 5. The result of the first experiment

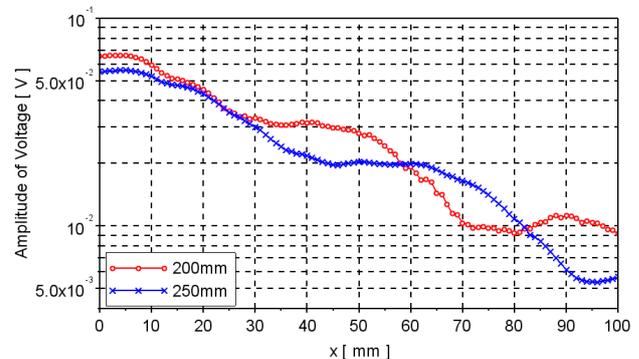


Fig 6. The result of the second experiment