

# ハプティックスキャンニングシステムを用いた 環境表面情報の解析

永井裕之<sup>†</sup> 桂誠一郎<sup>††</sup>

近年、視覚・聴覚に次ぐ第3のマルチメディアとして触覚の研究が盛んに行われている。触覚を構成する要素には様々あるが、人間が触覚情報によって環境を知覚する際、なぞり感覚が重要な要素となる。そこで本稿では2軸のリニアモータを用いたハプティックスキャンニングシステムによって環境表面情報の抽出・解析を行う。本システムを用いることで広帯域な環境表面の抽出を行うことができる。摩擦力と環境表面粗さの相互関係から相互インピーダンスを定義し、環境表面の識別を行う。また、提案手法の有用性を実験により示す。

## Analysis of Environmental Surface Data Using Haptic Scanning System

HIROYUKI NAGAI<sup>†</sup> and SEIICHIRO KATSURA<sup>††</sup>

In recent years, haptics is attracted attention as the third multimedia after auditory and visual information, and haptic information is expected to apply various fields. To reproduce the haptic information which human feels, the environmental surface data is needed. In this paper, the scanning system which is constructed from the biaxial linear motors is used. The force control and the position control based on DOB and RFOB is implemented in this system. Then, the mutual impedance is proposed as the characteristic of the environmental surface. In this paper, an availability of the proposed method is verified by experiments.

### 1. はじめに

近年、視覚・聴覚に次ぐ第3のマルチメディアとして触覚の研究が盛んに行われている。触覚情報の伝送や保存、再現を行う学問としてハプティクスという研究分野がある。その中でも特に実世界における環境の伝送、保存、再現などを扱うものを実世界ハプティクスと呼ぶ。<sup>1)-6)</sup> 実世界ハプティクスにより例えば遠隔地とのコミュニケーションにおいて遠くにいる人の存在をより身近に感じることができる。また、医療の分野においてはバイラテラル制御を取り入れた遠隔医療の研究<sup>7)</sup>も盛んに行われており、視覚のみに頼っていた作業に触覚情報が加わることで、より繊細な作業が可能となる。

このように、ハプティクスは様々な分野への応用が期待されているが、今後更に発展させていくためにはより再現性の高い触覚情報が必要となってくる。これ

まで行われてきた触覚情報は主に1軸の押し引き動作に限定されたものであり、環境を認識する際も、剛性や粘性といった物性値による環境認識に限定されていた。人間の触覚には環境表面をなぞった時に感じる「つるつる」や「ざらざら」といった面としての触覚も必要となってくる。

そこで本稿では、バイラテラル操作に基づくなぞり動作によって環境表面情報を抽出および解析する方法について提案を行う。本稿の構成を以下に示す。第2章ではスキャンニングシステムを構成するための制御系について述べる。第3章では環境表面情報を抽出するためのモデル化と、抽出方法について述べる。第4章では実験結果についてまとめ、第5章で本稿をまとめる。

### 2. 制御システム

本章では、環境の材質を抽出するための制御系としての位置制御と力制御を行う。

#### 2.1 位置制御、力制御

外乱オブザーバを用いた位置制御のブロック線図を図1に示す。図1において、 $x_{cmd}$ 、 $K_p$ 、 $K_v$ はそれぞれ

<sup>†</sup> 慶應義塾大学  
Keio University

<sup>††</sup> 慶應義塾大学  
Keio University

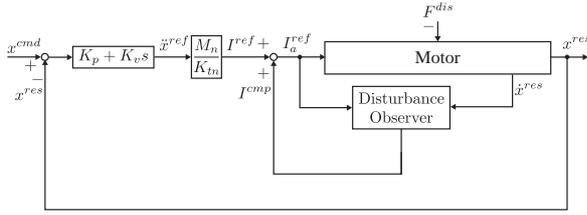


図 1 位置制御のブロック線図

Fig. 1 Block diagram of position control.

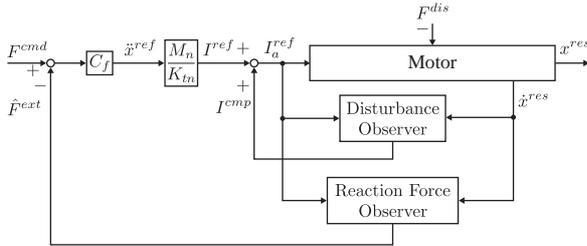


図 2 力制御のブロック線図

Fig. 2 Block diagram of force control.

れ位置指令値，位置ゲイン，速度ゲインを表す。また，反力推定を用いた力制御のブロック線図を図 2 に示す。図 2 において  $C_f$  と  $F_{cmd}$  はそれぞれ力ゲインと力指令値を表す。このシステムにおいて，反力  $F_{reac}$  は制御入力としてシステムに加えられる。

### 3. 環境表面情報の解析

#### 3.1 システムの構成

2 軸のリアモータを用いたなぞり動作を図 3 に示す。環境に対して垂直方向を  $z$  軸，環境に対して水平方向を  $x$  軸とする。なぞり動作時の摩擦は簡単なモデルを用いると (1-3) 式で表すことができる。

$$F_{frc} = F_{cmb} + F_{vis} \quad (1)$$

$$F_{cmb} = \text{sgn}(v)\mu F_{ver} \quad (2)$$

$$F_{vis} = Dv \quad (3)$$

ここで  $F_{frc}$ ,  $F_{cmb}$ ,  $F_{vis}$ ,  $F_{ver}$  はそれぞれ摩擦力，クーロン摩擦力，粘性摩擦力，押し込み力を表す。また， $v$  はなぞり速度， $\mu$ ,  $D$ ,  $\text{sgn}$  はそれぞれクーロン摩擦係数，粘性摩擦係数，符号関数を表す。なぞり時には押し込み力となぞり速度が重要である。よって  $z$  軸に関しては押し込み力を制御するために DOB と RFOB を用いた力制御を施す。 $x$  軸に関してはなぞり速度を制御するために DOB を用いた位置制御を施す。理想的な力制御においては，外力が加わった際に，制御された力と外力が釣り合うときのみ定常位置が確定する。つまり制御剛性が零であることを示す。逆に理想的な位置制御では，どのような外力が加わっても位置の変動があってはならない。つまり制御されている位置の制御剛性が無限大でなければならない。このように位

置制御と力制御は制御目標が反対である。よって力制御を行うと位置の変化が，位置制御を行うと力の変化を確認することが可能である。また，力制御においては，力を一定に制御するため，位置の応答を得ることができる。同様に，位置制御においては位置を一定に制御するため，力の応答をみることができる。本稿において，なぞり動作によって得られるこの二つの値を用いて環境表面の特徴の抽出を行う。

#### 3.2 環境表面粗さの抽出

環境表面は，周期性の短い粗さ成分と周期性の長いうねり成分によって構成されている。また触覚情報によって環境表面を認識する際には環境表面の粗さ成分が重要でと言える。一般的に環境表面から粗さ成分を抽出する方法としてローパスフィルタが用いられる。しかしローパスフィルタによる位相遅れによるずれが生じてしまう。そこで本稿では位相遅れの生じない零位相ローパスフィルタ (ZPLPF) を用いる。これを用いることにより位相遅れを生じることなく粗さ成分を抽出することが可能となる。ZPLPF を (4-6) 式に示す。

$$G_{zpl}(z) = \alpha_n z^n + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_n z^{-n} \quad (4)$$

$$\alpha_l = \frac{\tilde{\alpha}_l}{\tilde{\alpha}_0 + 2(\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 + \dots + \tilde{\alpha}_n)} \quad (l = 0, 1, \dots, n) \quad (5)$$

$$\tilde{\alpha}_l = \sum_{j=l}^n \delta_j \delta_{j-l} \quad (6)$$

#### 3.3 相互インピーダンス

本稿では，摩擦力と表面粗さの関係から相互インピーダンスを定義する。相互インピーダンスは次のように表される。

$$\frac{F_x}{x_z} = Z_{mu} \quad (7)$$

ここで， $F_x$ ,  $x_z$ ,  $Z_{mu}$  はそれぞれ押し込み力， $z$  軸の位置，相互インピーダンスを表す。

## 4. 実験

実験の流れとしては，環境に対して垂直方向と水平方向の 2 方向の自由度でなぞり動作を行う。

#### 4.1 実験セットアップ

本実験で用いるスキャニングシステムの全体図を図 4 に示す。このシステムにおいては垂直方向を力制御，水平方向を位置制御で構成する。実験プログラムは RTAI 3.7 により実装し，本実験で用いるパラメータを表 1 に示す。

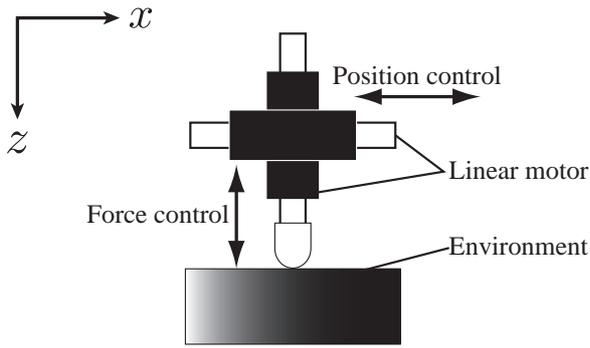


図3 スキャニングシステムの構成  
Fig.3 The constitution of the scanning system.

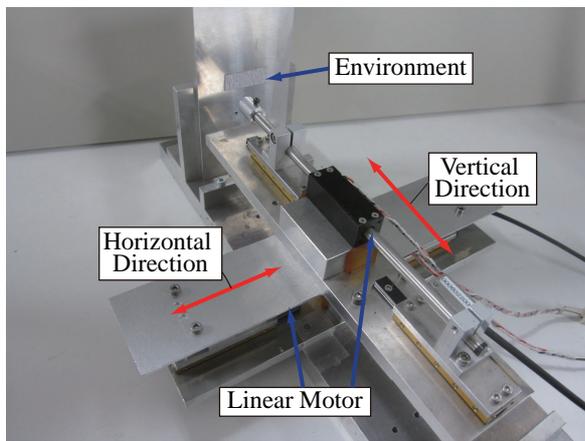


図4 実験システムの構成  
Fig.4 Experimental setup.

表1 実験パラメータ

Table 1 Parameters of experiments.

Parameter	Description	Value
$T_s$	Sampling time	100 $\mu$ s
$K_{tn}$	Force coefficient	3.3 N/A
$M_{vn}$	Mass of z-axis	0.24 Kg
$M_{hn}$	Mass of x-axis	1.16 kg
$K_p$	Position gain	10000
$K_d$	Velocity gain	200
$K_f$	Force gain	5
$g_{pd}$	Cut-off frequency of pseudo-derivation	1000 rad/s
$g_r$	Cut-off frequency of reaction force observer	1000
$g_{dis}$	Cut-off frequency of z-axis disturbance observer	1000 rad/s
$g_{dis2}$	Cut-off frequency of x-axis disturbance observer	200 rad/s
$g_{zp}$	Cut-off frequency of zero phase low-pass filter	1 rad/s

#### 4.2 実験結果

抽出した表面粗さと摩擦力の応答を図5-7に示す。それぞれ塩化ビニル板，粗さの異なる紙やすりの計3

種類の応答を示す。相互インピーダンスのプロットを図8-10に示す。それぞれの環境の違いをプロットの大きさ，形などから判別することが可能であることがわかる。環境表面の違いをより定量的に分類した結果を図11に示す。また，今回は比較のために，表面の滑らかなゴム板，紙やすり(#160)も用いて比較を行った。それぞれの環境に対して5回ずつ実験を行い，x軸は粗さの標準偏差，y軸は摩擦力の平均をとることで環境表面の判別を行っている。実験結果からそれぞれの環境の識別が行われており，相互インピーダンスに基づく環境表面の評価が有用性を持つことを示している。

#### 5. おわりに

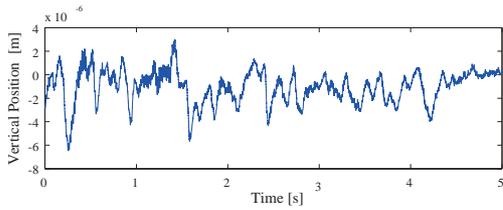
本稿において環境表面を扱うためのデバイスとして2軸のスキャニングシステムを構成した。また環境表面を評価する指標として粗さと摩擦力の相互関係から相互インピーダンスを定義した。反力推定オブザーバを用いることで力センサレスで摩擦力を測定し，広帯域な触覚情報の取得をおこなった。ZPLPFを用いることで環境表面の粗さ抽出を位相遅れを生じることなく行うことができた。提案の有用性を実験により確かめることができた。提案手法により，相互インピーダンスとして環境表面の特性を評価することが可能であることを示した。

#### 謝 辞

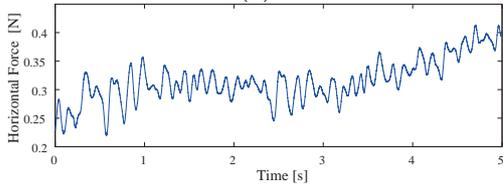
本研究の一部は，NEDO 産業技術研究助成事業 (プロジェクト ID: 07C46047a) によって行われたことを記し，関係各位に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) R. C. Goertz : "Fundamentals of general-purpose remote manipulators," *Nucleonics*, Vol. 10, No. 11, pp. 36-42, 1952.
- 2) B. Hannaford : "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 426-434, 1989.
- 3) K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean : "On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation," *Proceeding of the 1999 International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1863-1869, May, 1999.
- 4) W. Iida, K. Ohnishi : "Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation," *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC '04*, pp. 217-222,

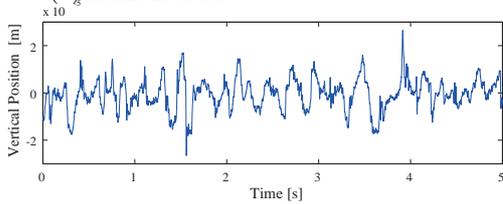


(a)

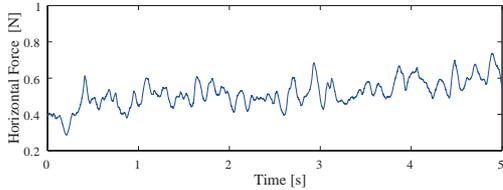


(b)

図 5 塩化ビニル板の位置応答と力応答. (a) 粗さ. (b) 摩擦力.  
Fig. 5 Response of vinyl chloride plate. (a) roughness. (b) horizontal force.

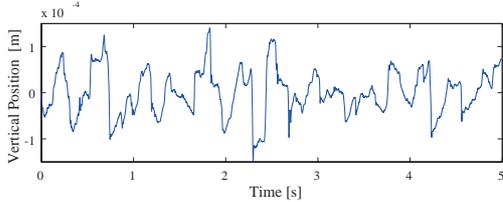


(a)

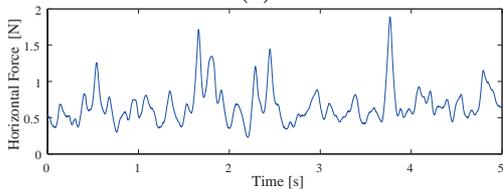


(b)

図 6 紙やすり (#320) の位置応答と力応答. (a) 粗さ. (b) 摩擦力.  
Fig. 6 Response of sandpaper #320. (a) roughness. (b) horizontal force.



(a)



(b)

図 7 紙やすり (#60) の位置応答と力応答. (a) 粗さ. (b) 摩擦力.  
Fig. 7 Response of sandpaper #60. (a) roughness. (b) horizontal force.

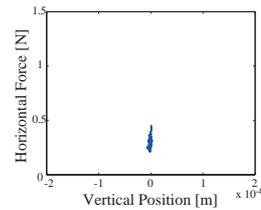


図 8 塩化ビニル板の相互インピーダンス

Fig. 8 Mutual impedance of vinyl chloride plate.

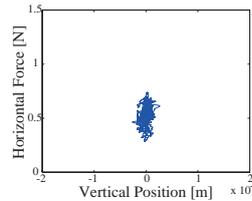


図 9 紙やすり (#320) の相互インピーダンス

Fig. 9 Mutual impedance of sandpaper #320.

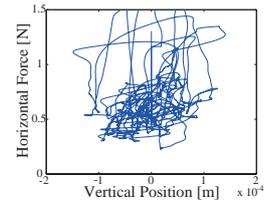


図 10 紙やすり (#60) の相互インピーダンス

Fig. 10 Mutual impedance of sandpaper #60.

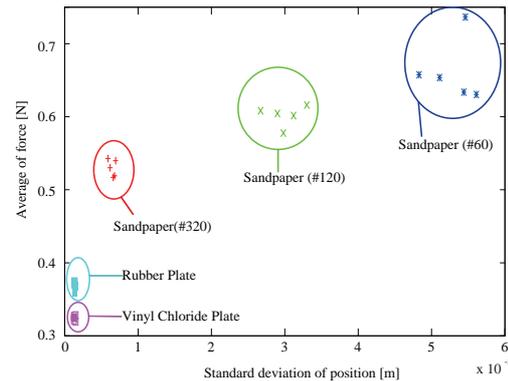


図 11 相互インピーダンスによる定量的評価

Fig. 11 Comparison of environments using mutual impedance.

2004.

- 5) D. A. Lawrence : "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 624–637, 1993.
- 6) K. Hashtrudi-Zaad and S. E. Salcudean : "On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1863–1869, 1999.
- 7) S. Katsura, W. Iida, and K. Ohnishi : "Medical Mechatronics - An Application to Haptic Forceps -," *IFAC Annual Reviews in Control*, Vol. 29, No. 2, pp. 237–245, November, 2005.