

東工大 ○高橋 秀智

要 旨

力覚提示デバイスの応用として形状モデリングシステムの入出力が考えられる。このようなシステムでは、従来問題とならなかった形状の提示精度が重要となる。そこで、本研究では、力覚提示デバイスを用いて計算機内の自由曲面形状モデル表面を、操作者が正確になぞることの可能な環境の構築を目的としている。

本報では、力覚提示デバイスにおける制御パラメータと提示精度の関係を実験的に求めたので、これを報告する。

1. はじめに

仮想空間内の形状と力によりインタラクションの可能なシステムが提案されている[1,2,3]。従来このようなシステムにおいては、安定性に関して研究がなされてきたが、その精度については、ほとんど研究されていない。しかしながら、そのようなシステムの応用として、形状モデルを提示する様な場合には、その提示精度が問題となる。

そこで本研究では、定常的ななぞり操作時の制御パラメータと形状の提示精度の関係について実験的に明らかにする。

2. 力覚提示デバイスの構成と制御

力覚提示デバイスとして3台のリニアサーボモータから構成される直交型3自由度の機構を用いる[4]。このデバイスと仮想空間内で移動する仮想プローブ、さらに仮想の物体表面を図1に示すように、質量、粘性、ばねを用いてモデル化する。

本システムでは、仮想空間内の自由曲面モデル表面を正確になぞれるようにするために、式(1)~(5)を用いた制御を行う[5]。この制御方式では、仮想プローブと力覚提示デバイスのプローブの位置と速度の差が、力覚提示デバイスに力としてフィードバックされるので、力覚提示デバイスのプローブが形状モデル表面を正確になぞることが可能となる。

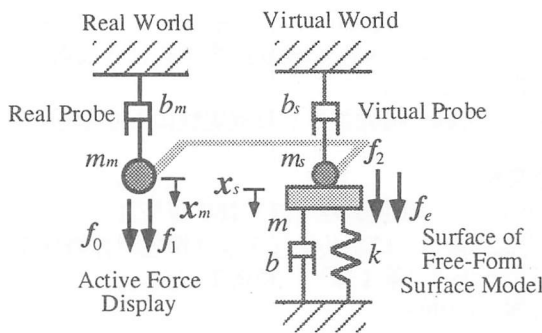


Fig.1 Control Model

$$f_0 = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m - f_1 \tag{1}$$

$$f_1 = k_{mf}(f_e - f_0) + k_{mv}(\dot{x}_s - \dot{x}_m) + k_{mp}(x_s - x_m) \tag{2}$$

$$f_2 = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s + f_e \tag{3}$$

$$f_2 = k_{sv}(\dot{x}_m - \dot{x}_s) + k_{sp}(x_m - x_s) \tag{4}$$

$$f_e = m \ddot{x}_s + b \dot{x}_s + k x_s \tag{5}$$

ここで、 $f_0$ はプローブの操作力、 $f_1$ は力覚提示デバイスのプローブの駆動力、 $f_2$ は仮想プローブの駆動力、 $f_e$ は仮想物体からの反力、 $m_m$ 、 $b_m$ は力覚提示デバイスの質量と粘性、 $k_{mf}$ 、 $k_{mv}$ 、 $k_{mp}$ は、各々、力覚提示デバイスの力、速度フィードバックゲイン、 $m_s$ 、 $b_s$ は仮想プローブの質量、粘性、 $k_{sv}$ 、 $k_{sp}$ は、各々、仮想プローブの速度、位置フィードバックゲイン、 $m$ 、 $b$ 、 $k$ は仮想物体の質量、粘性、ばね、 $x_m$ 、 $x_s$ は各々力覚提示デバイスのプローブの位置と仮想プローブの位置である。

3. 実験

Y軸に平行な鉛直面を、約100mm/sの速度でプローブでなぞる際の食い込み誤差を測定した。操作は図2に示す様に、操作者の正面に提示された形状を、胸の高さの平面内において手前から奥になぞり、この際のプローブの形状モデルへの平均食い込み距離 $\bar{e}_m$ と平均押付け力 $\bar{f}_{0r}$ を測定した。この時、プローブが形状モデルに接触する際の応答を避け、定常的ななぞり操作時のみを測定した。各パラメータにつき5回測定を行った。

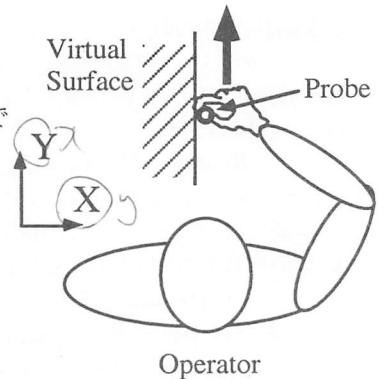


Fig.2 Operating Environment.

実験の制御パラメータを表1に、力覚提示デバイスの基本特性を表2に示す。また、 $k=1.4 \times 10^5 \text{ N/m}$ 、 $B=2000 \text{ Ns/m}$ 、制御周期1msとした。これらの値は、形状モデル表面の剛性が可能なかぎり高く、かつ振動の生じない値を実験的に求めて設定した。

Table 1 Control Parameters.

	$k_f$	$k_{sp} \text{ Ns/m}$	$k_{sv} \text{ N/m}$	$k_{mv} \text{ Ns/m}$	$m_s \text{ kg}$	$b_s \text{ Ns/m}$
X	6.0	100	6000	300	4.0	22.0
Y	6.0	100	6000	300	4.0	22.0

Table 2 Characteristics of Force Display.

	Work Area mm	Mass kg	Linear Motor Output N	Sensor Resolution	
				Position $\mu\text{m}$	Force N
X	320	16.0	200	1.0	0.027
Y	320	38.0	400	1.0	0.025
Z	260	5.0	50	0.5	0.061

Rehabilitation 工学  
 振動 等 22  
 400 μm  
 150 μm  
 display

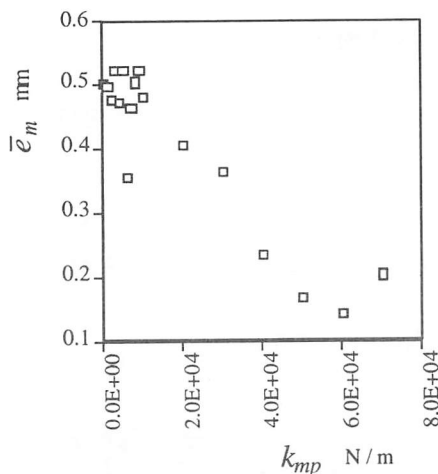


Fig.3 Relation between  $k_{mp}$  and  $\bar{e}_m$ .

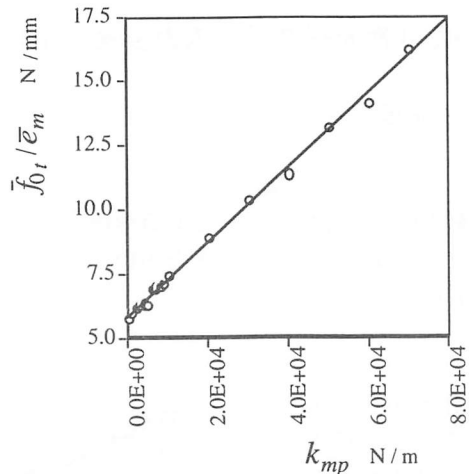


Fig.4 Relation between  $k_{mp}$  and  $\bar{f}_{0f}/\bar{e}_m$ .

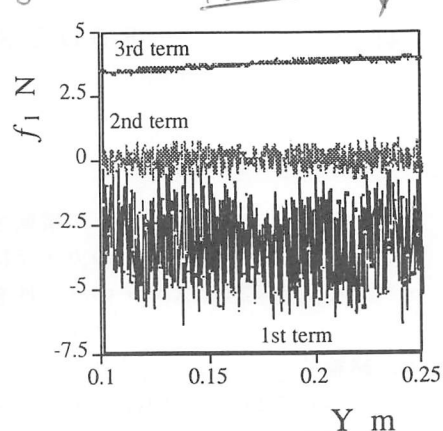


Fig.5 Driving force.

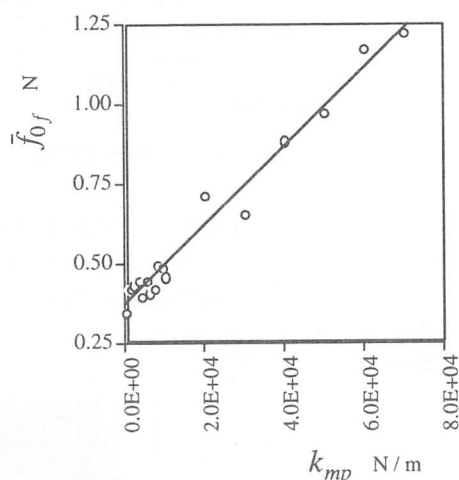


Fig.6 Operating force in free space.

#### 4. 実験結果および考察

測定結果を図3に示す。 $k_{mp}$ の値を大きくすることにより、ばらつきがあるものの形状の提示誤差(平均食い込み距離)を小さくできることがわかる。この提示誤差のばらつきは、プローブで形状モデルをなぞる際の押し付け力により生じると考えられるので、各測定時の平均押し付け力を提示誤差で割った  $\bar{f}_{0f}/\bar{e}_m$  (剛性に相当する) と  $k_{mp}$  の関係を図4に示す。この図より、押し付け力に対する剛性は、 $k_{mp}$  と線形関係にあることがわかる。

しかしながら、実現される剛性はパラメータの値と比較して低い。さらに、制御パラメータとして与えた形状モデル表面の剛性  $k=1.4 \times 10^5$  N/m と比較して低い。

そこでその原因を調べるために、プローブで形状をなぞる際の式(2)の右辺の各項の値を測定した。図5に式(2)の右辺の各項の変動を示す。

この図から、第1項が大きく変動し、また力の方向が形状に引き込む方向となっていることがわかる。この項は、形状モデルへの食い込み量に比例した力と、プローブの速度に比例した逆方向の力と、プローブの操作力からなる。プローブの形状への食い込み量とプローブの操作力は、第1項に表れているような大きな振動成分を含んでいないので、これは、プローブが形状モデル表面に、振動することなく安定に接触できるようにするためにモデルに考慮した粘性のために生じている。この成分は、プローブの速度の変動を押さえるための力であるが、

図から理解できるように、この成分により制御パラメータで与えられた形状の表面の剛性を実現することができない。

この原因の1つとしては、本システムでは、位置の差分より速度を算出しており、そのために、この現象が生じていることが考えられる。また、粘性を小さくすることにより、この影響を低減できると思われるが、しかしながら、粘性を小さくすると、振動現象が生じやすくなり、円滑ななぞり操作を実現できない。

一方、 $k_{mp}$ を増加させるとプローブと仮想プローブの位置の差が力として操作者に返るために、操作力が大きくなる。そこで、プローブを自由空間においてX軸方向に約100mm/sで移動させる際の操作力の平均  $\bar{f}_{0f}$  を  $k_{mp}$  を変化させて測定した。その他の制御パラメータは、表1を使用した。その結果を図6に示す。この図より、 $k_{mp}=5 \times 10^4$  N/m以上で操作力が1Nを越えることがわかる。操作力が1Nを越えると操作者の腕に負担がかかり操作性が悪くなる。この際の提示精度は250μmである。

#### 5. おわりに

力覚提示デバイスにより計算機内の形状をなぞる際の、形状の提示誤差の主な原因が、安定ななぞりを実現するために導入した形状表面のモデルにおける粘性のためであることがわかった。今後は、安定性、操作性を失うことなく、高い形状提示精度を実現できる力覚提示デバイスの制御方式について研究を行う。

#### 参考文献

- [1] M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F. P. Brooks, Jr, M. Behensky, Feeling and Seeing: Issues in Force Display, Computer Graphics, 24,2, (1990)pp.235-243.
- [2] Iwata, H, "Artificial Reality with Force-feedback", Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, Computer Graphics, 24,4,(1990)pp.165-170.
- [3] Y. Adachi, "3D Modeling with Virtual Space", Proc. 1st JAPANESE-FRENCH Congress of MECHATRONICS, Institut des Microtechniques, FRANCE, (1992)
- [4] 高橋秀智, 金井理, 渡邊賢司: 人工現実感を用いた自由曲面加工用NCプログラミングの研究(第1報), 1995年精密工学会春季全国大会講演論文集, (1995) pp.55-56.
- [5] 高橋秀智, 金井理, 山本拓未: ハップティックインタフェースによる自由曲面形状の知覚, 1995年精密工学会秋季全国大会講演論文集, (1995) 639-640.