

# マスタ・スレーブ機構のための 柔軟物検出と柔軟さ提示

## Softness detection and display of grasping objects for master-slave system

鈴木佑太 福田 眞

Yuuta Suzuki Makoto Fukuda

弘前大学

Hirosaki University

キーワード: マスタ・スレーブ機構(Master-slave system) , バイラテラル制御(Bilateral control) , 柔軟さ検出( Softness detection ) , 柔軟さ提示 ( Softness display ) , MR 流体(Magneto rheological fluid) , 力覚提示(Force display) , PVDF フィルム(Polyvinylidene fluoride film)

連絡先: 〒036 - 8561 弘前市文京町 3 番地 弘前大学大学院 理工学研究科 福田研究室 福田 眞 ,  
Tel.:(0172)39-3678 , Fax.:(0172)39-3678 , E-mail: fukuda@cc.hirosaki-u.ac.jp

### 1 . はじめに

バイラテラル制御を用いたマスタ・スレーブ型遠隔操作システムの研究は古くから研究されている<sup>1,2)</sup>。近年, 低侵襲かつ遠隔操作可能な点から, 手術用ロボットが医療用として試用されてきている<sup>3)</sup>。このような応用において確度の高い操作を行うためには, 操作者の経験に基づく高い技能が必要となる。手術用ロボットでは, 主に映像による位置情報に基づいて操作されるが, 操作性・作業品質の向上を図るためには位置制御と同時に力覚提示を同時に行うことが望まれる。特に, 医療用では, 操作機構への反力と同時に把持対象物の柔らかさを操

作者に提示することが望まれている<sup>4)</sup>。

これまでの力覚提示では, 把持動作時の把持力を提示する方法が多く, 把持対象物の硬さ, 柔らかさを提示することはあまりなかった。

そこで, 本研究では把持力と同時に, 把持対象物の柔らかさを提示することをねらいとしている<sup>5)</sup>。本報告では, PVDF( Polyvinylidene fluoride ) フィルムと MR(Magneto Rheological )流体を用いた柔軟さ検出とその提示機構を検討したので, このMR 流体と PVDF フィルムを用いたマスタ・スレーブ機構について述べる。

## 2. 柔軟さの検出および提示原理

### 2.1 柔軟さの検出

PVDF フィルムは、圧電型の起電力を発生するフィルムで、フィルムに加える力と面積に依存して電圧を発生する。ただし、出力検出のための負荷抵抗をつなぐことにより、電荷が流れ出るため、パルス状の波形となる。また、パルス幅は、加圧時間に依存して長くなる。このため、波形を測定することにより、押し付け力と、測定対象物との接触面積を求めることができる。

さらに、2枚のPVDF フィルムを予め剛性のわかっている柔軟材を挟み込み、両者からの信号を測定することにより、対象物の柔らかさ（剛性）を測定することが可能である。

### 2.2 柔軟さの提示

柔軟さの提示には、MR 流体を用いる。MR 流体は、磁場によりせん断力が変化する性質を有している。このため、通過する磁束密度を変化させることにより、MR 磁性流体内に設置した板の動かし易さを変えることができる<sup>6)</sup>。把持動作時に、磁束を変化させることにより、MR 磁性流体内の板の動きで、柔軟さ（硬さ）を提示させる。

### 2.3 マスタ・スレーブ機構およびシステム構成

マスタ、スレーブともに操作および対象物把持機構として、駆動に DC モータ、位置検出に

はエンコーダを使用した。スレーブ側で対象物の柔らかさを検出するためのセンサには PVDF フィルムを使用する。また、操作器であるマスタ側で柔軟さを提示するために磁束密度によってせん断応力を変化させることができる MR 流体を使用する。

制御はデジタル制御とし、PC を介して行う。PVDF フィルムの出力はマイコン（Arduino Uno, Arduino 製）の A/D 変換器で取込む。エンコーダ付の DC モータは、位置制御型のドライバ(iMCs01, iXs Research Corp 製)で制御する。Fig.1 は実験装置に適用したバイラテラル制御系のブロック図である。力逆送型バイラテラル制御は、マスタとスレーブ間の相対変位からスレーブの位置決め制御を行う。一方で、PVDF フィルムにより、スレーブに加わる力を検出してそれをマスタで再生する方式である。

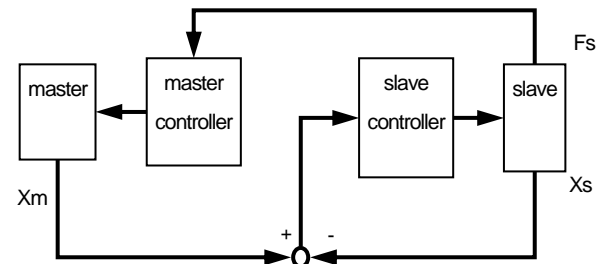


Fig.1 The block diagram of force reflecting type bilateral control

## 3. PVDF フィルムの特性

### 3.1 球の落下実験

まず PVDF フィルムの出力特性を明らかにするため、アルミ板(40 mm × 20 mm × 5 mm)に PVDF フィルム(DT1-028k, 東京セン

サ製)を貼り、硬さの異なる部材を様々な高さから落下させた。

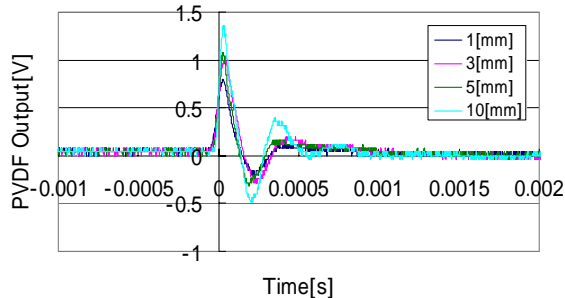


Fig.2 The PVDF output by steel ball impact

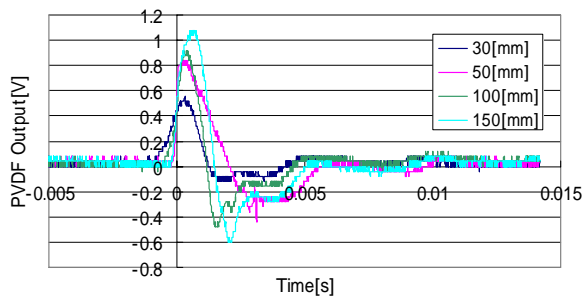


Fig. 3 The PVDF output by rubber ball impact

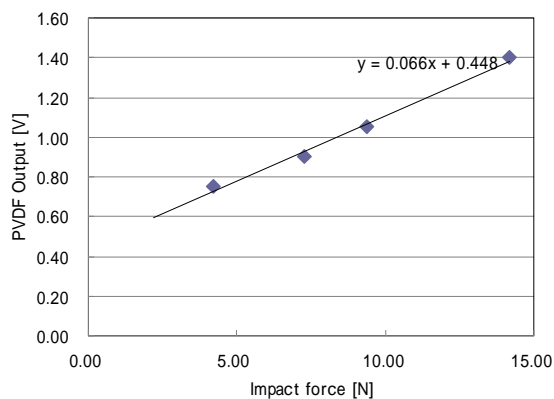


Fig. 4 The relation of impact between force and PVDF output

結果を Fig. 2 , Fig. 3 に示す . 硬い部材であるスチールボールを落下させた場合 , 短い時間

( 0.5 ms ) の出力となり , ゴム製ボールは長い時間 ( 5 ms ) の出力が得られた .

これから , 落下時の運動量と , 力積の関係から , フィルムに加わる力と出力との関係を見みると , Fig. 4 のようになる . 加わる力に比例した電圧が出力されることがわかる .

### 3 . 2 柔軟さ検出センサの構成

次に本研究で用いるセンサの概略図を Fig.5 に示す . この基本的な考え方は曾根らによって提案されている <sup>7)</sup> . 2 枚のアルミ板 ( 40 mm × 20 mm × 5 mm ) の上にシリコンシート ( 12 mm × 12 mm × 1 mm ) と 2 枚のガラス板 ( 12 mm × 9 mm × 1 mm ) を積層し , PVDF フィルムの 1 枚は 2 枚のアルミ板の間 , もう 1 枚はアルミ板とシリコンシートの上に設置しそれぞれのセンサに加わる力を測定する .

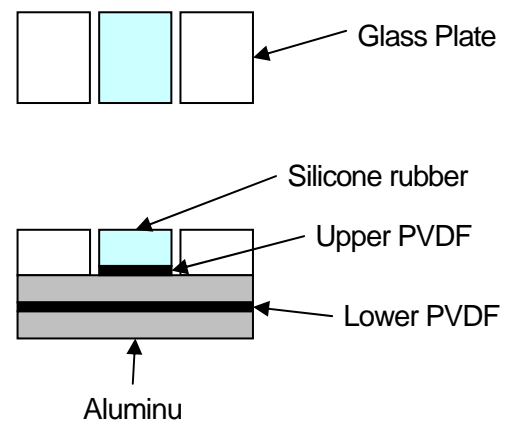


Fig. 5 Structure of the sensor

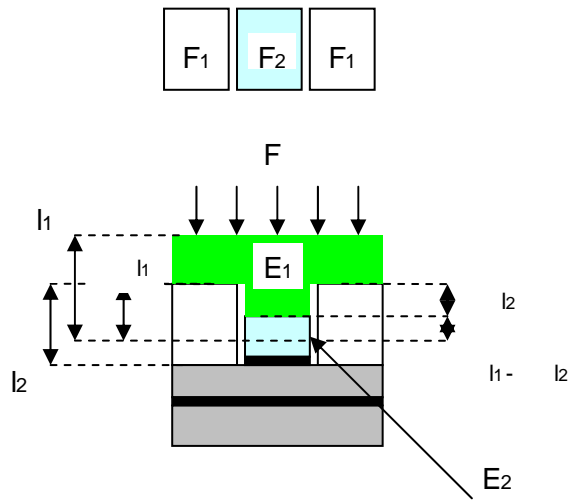


Fig. 6 The figure of measurement theory

Fig. 6 にセンサの測定原理を示す。測定対象のヤング率を推定する方法は以下に示すとおり。

- $A_a$ :  $F_1$ が加わる部分の面積 [m<sup>2</sup>]
- $A_b$ :  $F_2$ が加わる部分の面積 [m<sup>2</sup>]
- $l_1$ : 測定対象の厚さ [m]
- $l_2$ : センサ測定部位の厚さ [m]
- $E_1$ : 測定対象のヤング率 [Pa]
- $E_2$ : 中央のシリコンゴムのヤング率 [Pa]
- $\Delta l_1$ :  $A_a$ に対する測定対象物の変位量 [m]
- $\Delta l_2$ : 測定対象物に対する $A_b$ 部分の変位量 [m]

シリコンの両脇の部材は、シリコンと比べヤング率が非常に大きい場合、剛体と見なすことができる。下部のPVDF フィルムで計測することができるセンサ全体に加わる力  $F_1$  はフックの法則から式(1)で表される。

$$F_1 = \frac{E_1 \cdot A_a \cdot \Delta l_1}{l_1} \quad (1)$$

同様に上部のPVDF フィルムで検出できるシリコンに加わる力  $F_2$  は式(2)で表すことができる。

$$F_2 = \frac{E_2 \cdot A_b \cdot \Delta l_2}{l_2} = \frac{E_1 \cdot A_b \cdot (\Delta l_1 - \Delta l_2)}{l_1} \quad (2)$$

式(1), (2)を用いて上部のPVDF フィルムに加わる力  $F_2$  と下部のPVDF フィルムに加わる力  $F_1+F_2$  の比を取ると式(3)が導かれる。

$$\frac{F_2}{F_1 + F_2} = \frac{A_b / A_a}{1 + l_2 \cdot E_1 / l_1 \cdot E_2 + A_b / A_a} \quad (3)$$

さらにそれぞれのPVDF フィルムの出力  $V_1$ ,  $V_2$  が  $F_2$ ,  $F_1+F_2$  に比例していることから式(4)が成り立つ。

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{F_2}{F_1 + F_2} \quad (4)$$

### 3.3 センサ実験結果

実際にセンサが測定対象物のヤング率を計測することができるのかを調べるために、センサに5 mm 厚のアルミ板(ヤング率: 69 GPa), 1 mm 厚でセンサに用いられているものと同一のシリコンシート(シリコンシート 1), とそれと別の1 mm 厚のシリコンシート(シリコンシート 2, ヤング率: 0.16 MPa) を用い任意の力を加える実験をそれぞれ3 回行った。変数  $k$  を式(5)

$$k = \frac{l_2 \cdot E_1}{l_1 \cdot E_2} \quad (5)$$

とし、式(3)から横軸を  $k$ , 縦軸を上部と下部のPVDF フィルムの出力比である  $V_1 / V_2$  にと

した場合の理論値とアルミ板，2種類のシリコンシートを押し付けた場合の実測値を Fig. 7 に示す．中央のシリコンシートには一般的なシリコンシート(ヤング率 0.6 MPa)を用いた．

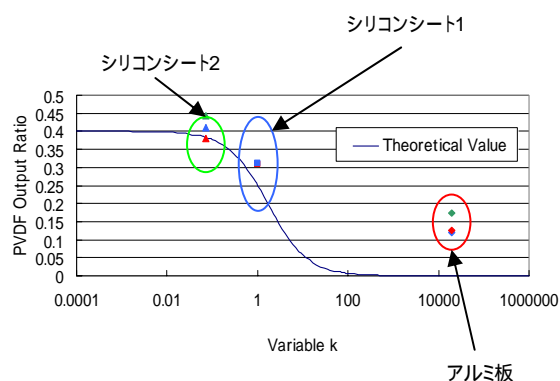


Fig.7 The theoretical curve and experimental values

Fig. 7 よりセンサに使用されているシリコン部材より硬いアルミ板の場合は実測値が理論値よりも大きくなっていることがわかる．また2種類のシリコンシートの場合は理論値に近づいていると言える．実験結果が理論値よりも大きくなっている原因は，シリコン部材が両脇の部材との厚さが不均一であること，測定対象物が硬すぎる場合センサに垂直応力以外にせん断応力も加わり上部の PVDF フィルムの出力が大きくなっているためと考えられる．

## 4 . MR 流体の特性

### 4 . 1 実験装置

MR 流体の磁束密度に対するせん断応力の関係を明らかにするため次の実験装置を作製した．アルミ板に溝(15 mm × 60 mm × 15 mm)を設けそこに MR 流体を高さ 10 mm まで

満たす．容器の下部にマイクロメータヘッドで位置調節可能なアルミ板を設け，15 mm の磁石 2 個を溝に沿って直線に配置する．マイクロメータヘッドにより磁石と MR 流体との距離を調節することで MR 流体にかかる磁場を変化させ MR 流体の粘度を変化させた．溝にそってアルミのバーをフォースゲージを取り付けた一軸ステージで動作させ，MR 流体のせん断力を測定した．



Fig. 8 Experimental setup of MR fluid

### 4 . 2 磁石の磁束密度

実験に使用した磁石の磁束密度をガウスメータ(東陽テクニカ 425 Gaussmeter)を用いて測定した．はじめに磁石 1 個の中心から高さ 0, 1, 3, 5, 10 mm の地点の磁束密度を測定し，次に磁石を 2 個直列に配置しその接点上空での磁束密度を同様に測定した．実験結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す．

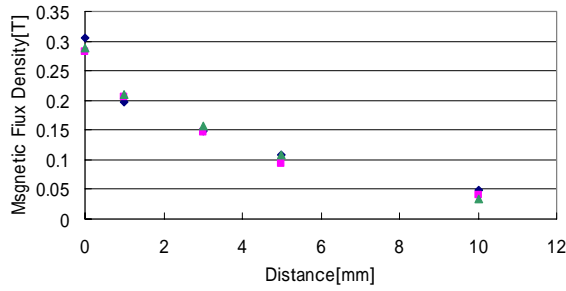


Fig. 9 Magnetic flux density of the center of magnet

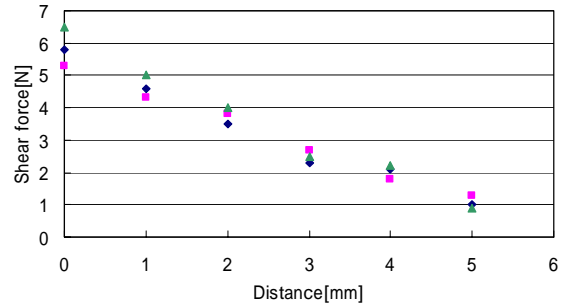


Fig. 11 Shear force change when the magnet distance change

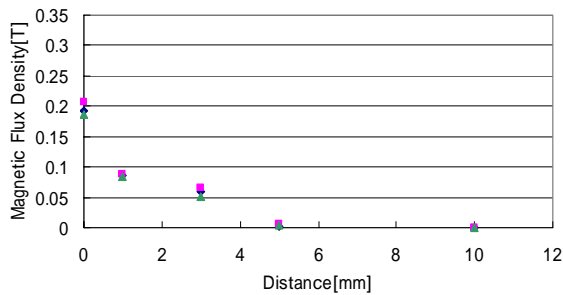


Fig. 10 Magnetic flux density of the edge of magnet

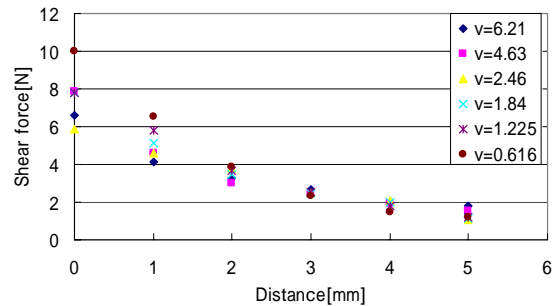


Fig. 12 Shear force change when the stage velocity change

磁石の中心部と端部では0.1 T ほど磁束密度が異なることが分かる。MR 流体に磁石を複数個用いて磁束密度を加える場合、位置により磁束密度が不均一になると考えられる。

#### 4.3 磁束密度とせん断応力の関係

マイクロメータヘッドで磁石とMR 流体を満たした容器との距離を0~5 mm まで1 mm 間隔で変化させ、そのときのMR 流体を流動させるためのせん断力の最大値をフォースゲージを用いて測定した。次に、フォースゲージを搭載した一軸ステージの速度を0.616, 1.225, 1.84, 2.46, 4.63, 6.21 mm/s と変化させ同様にMR 流体のせん断力の変化を測定した。

結果を Fig. 11, Fig. 12 に示す磁石との距離とMR 流体が流動するために必要なせん断力は線形の関係にあることがわかる。また速度変化に対してMR 流体の流動に必要なせん断力は磁石とMR 流体との距離が2 mm から5 mm の範囲では大きくは変化していないことがわかる。磁石とMR 流体との距離が0 mm, 1 mm の場合に測定結果に差が表れているのは、MR 流体が磁場の影響を強く受け流路全体に盛り上がりアルミバーとの接触面積が不規則に増大したためだと考えられる。このことからMR 流体のせん断力は加える磁場によって決めることができると考えられる。

## 5 . まとめ

本研究では柔軟物の検出と柔らかさ提示を実現するため ,PVDF フィルムと MR 流体の特性測定実験を行い実験装置への適用を検討した .PVDF フィルムは受ける力によって出力が比例することを明らかにした .MR 流体のせん断応力は加える磁束密度に線形に変化する .このことからマスタ・スレーブ機構の柔軟さ検出に PVDF フィルムを用い ,また柔軟さの提示機構として MR 流体を用いることができると考えられる .

今後 ,PVDF フィルムにより柔軟さの検出と MR 磁性流体による柔軟さ提示機構をマスタ・スレーブ機構に組み込み ,柔軟さの提示システムを構成していく .

## 参考文献

- 1) 戸田義継 ,町田和雄 ,岩田敏彰 ,川田政国 :  
宇宙用マスタ・スレーブ・マニピュレータ・システムの開発 ,日本航空宇宙学会誌 ,第 35 巻 ,406 号 , (1987.12) ,  
pp .546-553
- 2) 戸羽篤也 ,桑野晃希 ,バイラテラル方式による力覚制御技術 ,北海道工業試験場報告 No . 297 , (1998)pp.23-30
- 3) 真島澄子 ,松島皓三 ,竹原直樹 : サーボマイクロマニピュレータを用いた生体組織の硬さの測定とファジィ論的硬さの評価 , バイオメカニズム学会誌 , Vol.15 ,  
No.1 , (1991) , pp42-48
- 4) 森川康英 : 外科医の求めるロボットハンド , バイオメカニズム学会誌 , Vol.32 ,  
No3 , (2008) , pp130-133
- 5) 入江隆 , 藤田尚文 , 中西秀男 , 太田学 :  
やわらかさ知覚のメカニズム , 電子情報通信学会論文誌 A , Vol.J91-A , No.1 ,  
(2008) , pp.162-171
- 6) 中山 健二 ,古荘 純次 ,山口雄平 ,小柳 健一 : MR 流体を用いた新しい三次元触覚ディスプレイの提案 , 日本機械学会講演論文集 No.044-1 , (2004) , pp1-23
- 7) 田中真美 , 曾根美紀子 , 長南征二 , 棚橋善克 : PVDF フィルムを用いた内視鏡装着用生態硬さ測定センサの開発 , 日本機械学会 , 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集(07 .3 .19 .20 東京)No.7 ,  
pp303-306