

# ジャイロスコープを用いた力覚生成装置による振動覚情報の提示方法

## A Method of Presenting Vibratory Sense Information by Haptic Force Device Using Gyroscope

池田 知純, 垣本 映, 新家 寿健, 鈴木 重信 (職業能力開発総合大学校)  
中村 友基 (福島職業能力開発促進センター)

Tomozumi Ikeda, Akira Kakimoto, Toshitake Araie, Shigenobu Suzuki  
and Tomoki Nakamura

視覚障がい者や打検士は、物体から発生する音が与えられなくても、棒に伝わる振動のみで物体を判別することができる。本論文の目的は、人は棒に伝わる振動のみの情報で材質を判別することが可能であるかを知覚実験によって明らかにすること、ジャイロスコープを用いた力覚生成装置が創り出す仮想的な振動が、利用者に対してどのような情報を与えることができるかを検討することである。振動覚による材質判別実験では、被験者に5種類の材質を提示し、振動のみで材質判別を行わせた結果、高い正答率で材質判別が可能であることを示す。提示物体を叩いたときに生ずる棒の振動を力覚生成装置によって再現する方法を示す。力覚生成装置を用いて行った仮想的な振動に対する評価実験を行い、事前の学習は必要となるが高い正答率で仮想振動が判別可能であることを示す。

キーワード：ジャイロスコープ、力覚生成装置、仮想振動、材質判別、

### 1. はじめに

人は、目の前に提示された対象の材料が何であるかわからないとき、対象に身体が直接触れなくても、棒や爪の先などで物体を軽く叩いたり触れたりすることで、対象物の材質や硬さなどの情報を得ることができる<sup>1)</sup>。物体を叩いたときに生ずる音と棒に伝わる振動は物体によって異なり、この違いが物体判別の手掛かりとなる<sup>2)</sup>。例えば、視覚障がい者は、白杖が障害物に接触したときに生じる音と白杖に伝わる振動を手掛かりとして、障害物の存在と種類を判別している。また、缶詰製品を検査する打検士は、先端に小さな球のついたスチール製の棒で缶詰を叩き、生じる音とスチール棒に伝わる振動で製品の品質を判断し、不良品を判別している<sup>3)</sup>。視覚障がい者や打検士は、物体から発生する音が与えられなくても、棒に伝わる振動のみで物体を判別することができる。

人は、視覚・聴覚の側面を無視し、探索動作で得られる触覚情報のみで対象の材質や硬さを知ることができる。この感覚は“ダイナミックタッチ”と呼ばれ、手触りのような身体表面の感覚とは違い、身体が直接触れていない遠くの対象物の性質を知覚することができる<sup>4)</sup>。

近年の生態心理学の中でもダイナミックタッチに関する実証的研究が行なわれている。ダイナミックタッチの様態が解明されつつあり、ダイナミックタッチの知覚特性や機能を解明するための方法としてバーチャルリアリティ技術の活用が望まれている。バーチャルリアリティの技術の一つとして、触覚や力覚に情報を提示し、仮想

物体を感じさせる装置である“ハプティックインタフェース”がある。ダイナミックタッチへ情報を提示するハプティックインタフェースを開発することができれば、視覚情報なしに物体全体の印象を仮想的に与えることができ、さらにダイナミックタッチの未解明の問題を学術的に解明するための手段として期待できる。

このような背景から、中村<sup>5)</sup>と池田ら<sup>6)</sup>は、ダイナミックタッチへの力覚提示方法として、非接地非装着型のジャイロスコープを用いた力覚生成装置を開発している。提案した力覚生成装置は、主にジャイロスコープからなり、振り動作に応じてジャイロスコープを制御することで外部トルクを発生させ、そのトルクの変化を見かけの慣性モーメントの変化として利用者に与えることができる。提案した力覚生成装置を利用して、棒などで物体を叩くような仮想的な振動を利用者に与えることができれば、福祉分野やバーチャルリアリティの分野に応用できるものと考えられる。

本論文では、棒に伝わる振動のみの情報で人はどの程度、材質を判別することが可能であるかを調べ、ジャイロスコープを用いた力覚生成装置が創り出す仮想的な振動が、利用者に対してどのような情報を与えることができるかについて検討した。

### 2. 振動覚による材質判別実験

#### 2.1 材質判別実験の方法

提示する材質として、スポンジ (300×300×15mm)、

紙束 (A4 サイズ, 厚さ 10mm), ゴムシート (300×300×10mm), 木板 (300×300×15mm), アルミ板 (300×300×5mm) の 5 つの素材を選んだ. 実験では, アルミ製の棒 (中空, 全長 1m, 直径  $\phi$  15mm, 質量 109g) とアクリル製の棒 (中空, 全長 1m, 直径  $\phi$  15mm, 質量 84g) を用いた.

被験者には, まず聴覚をマスキングノイズによって遮断し, 開眼状態にて 2 種類の棒で落とすように提示した材質を叩かせ, 各材質の固有の振動を学習させた. 次に, 被験者の視覚と聴覚をそれぞれアイマスクとマスキングノイズによってともに遮断し, 提示した材質を棒で落とすように叩かせ, 棒に伝わる振動のみを手掛かりとして材質を判別させた. 被験者が判別終了と判断したのち, 判別した種類の材質名を報告させた. なお, 材質を提示する回数は, 2 種類の棒につき各材質 2 回, 計 10 回とし, 提示順序は毎回ランダムに選定した. 棒は被験者の利き手に持たせ, 叩く回数は被験者の自由とした.

実験には, 20 歳から 33 歳の右利きの大学生および社会人 10 名 (男性 4 名, 女性 6 名) が参加した. 実験に先立ちインフォームドコンセントを得た.

2.2 材質判別実験の結果

表 1 に実験結果を示す. 横方向は提示した材質名, 縦方向は被験者が報告した材質名である. 各マスの数値は回答数であり, 網掛けをした対角線上の位置にあれば正答, それ以外の位置にあれば誤答である. 2 種類の棒での実験結果を比較すると, 判別の正答率は, アルミ製の棒を用いたとき 70%, アクリル製の棒を用いたとき 62% であり, アクリル製の棒よりアルミ製の棒の方がやや正答率が高かった. 誤答については, 棒の種類によらず, 木板とアルミ板, 紙束とゴムシートが互いに判別しにくい材質であることがわかった.

表 1 材質判別実験の結果

(a) アルミ製の棒で提示材料を叩いたとき

		提示				
		スポンジ	紙束	ゴムシート	木板	アルミ板
回答	スポンジ	18	1	1	0	0
	紙束	2	12	1	0	1
	ゴムシート	0	4	13	1	0
	木板	0	2	3	13	5
	アルミ板	0	1	2	6	14

(b) アクリル製の棒で提示材料を叩いたとき

		提示				
		スポンジ	紙束	ゴムシート	木板	アルミ板
回答	スポンジ	20	1	0	0	0
	紙束	0	14	5	1	1
	ゴムシート	0	5	11	2	3
	木板	0	0	3	10	6
	アルミ板	0	0	1	7	10

2.3 振動波形の計測

物体を叩いたときに生じる棒の振動を図 1 に示す方法で計測した. アルミ製の棒はグリップ先端を支点として自由に回転できるようになっており, 棒を水平位置から自由落下させて物体に衝突させる. 棒には 2 つの加速度センサ(H560, Hitachi)S1,S2 が取り付けられており, 2 つのセンサ出力の差をとることで角加速度に比例した電圧  $e_c(t)$  が得られる. 材質判別実験の提示素材である, 紙束, ゴムシート, 木板に対して, それぞれ 5 回ずつサンプリング周期 1ms で振動計測を行なった.

図 2 から図 4 に紙束, ゴムシート, 木板を叩いたときの加算平均した振動波形を示す. ここで, 図中の太い実線は棒の自由落下による角加速度を除いた振動波形を示している. 各計測結果を比較すると, 棒が物体に接触した瞬間の角加速度の変化量, 振動の持続時間, 波形全体のパターンが物体によって異なることがわかった.

人は棒で物体を叩くだけでその種類を判別することが可能であったため, 人の振動覚は物体ごとに異なる振動波形を判別できると考えられる.

以上のことから, 事前の学習があれば, 人は棒の種類によらず振動のみを手掛かりとして物体の判別が可能であり, 棒に伝わる振動パターンを再現すれば, 振動に対する錯覚を生じさせることができると考えられる.

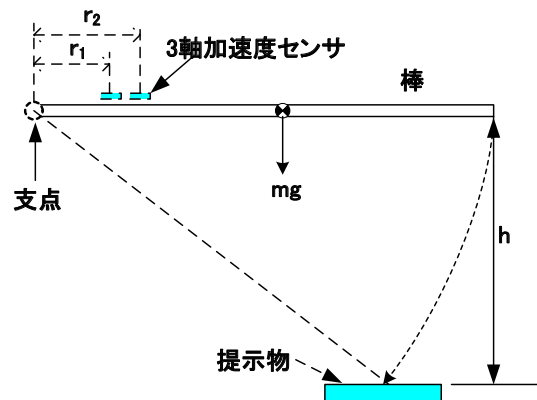


図 1 振動波形の計測方法

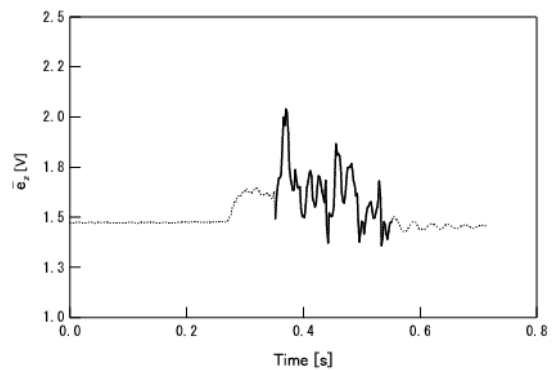


図 2 アルミ製の棒で紙束を叩いた時の振動波形

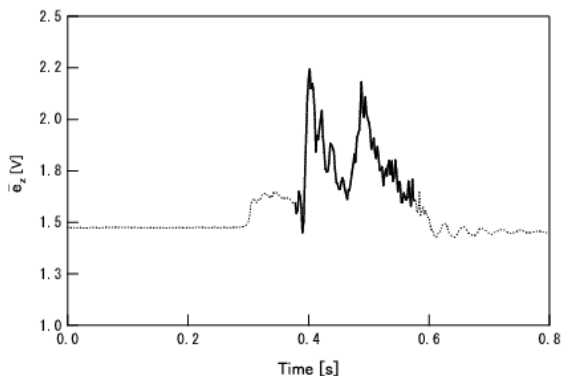


図3 アルミ製の棒でゴムシートを叩いた時の振動波形

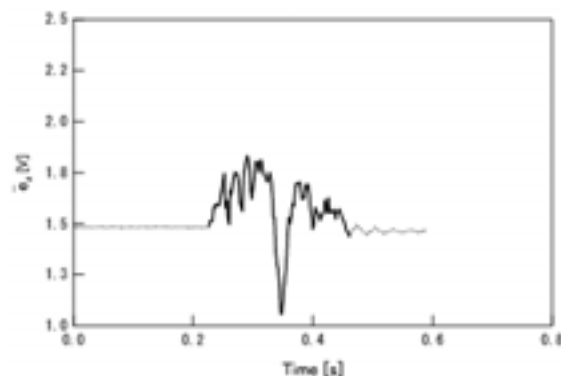


図4 アルミ製の棒で木板を叩いた時の振動波形

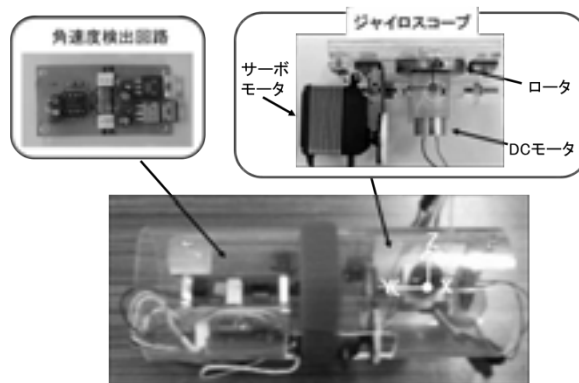


図5 ジャイロスコープを用いた力覚生成装置の外観

表2 試作した力覚生成装置の緒元

ロータの半径	20.0mm
ロータの重量	0.105kg
ロータの慣性モーメント $I_g$	$2.10 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$
ロータの角速度 $\omega_g$	$1.05 \times 10^3 \text{rad/s}$
プリセッション最大角速度	$15.0 \text{ rad/s}^2$
最大発生トルク	0.33Nm

とすると、ジャイロモーメント  $T_{gX}$  によって装置は X 軸のまわりに回転する。X 軸まわりの角加速度を  $\dot{\Omega}_{dX}$  とすると、装置の回転に対する運動方程式は次式で表される。

$$T_{dX} = I_d \dot{\Omega}_{dX} \quad (2)$$

ここで、 $I_d$  は装置の慣性モーメントである。式(2)は、ジャイロモーメント  $T_{gX}$  によって装置の角加速度  $\dot{\Omega}_{dX}$  が制御できることを示している。棒で物体を叩くと棒には物体固有の振動を生じ、この振動によって棒には角加速度  $\dot{\Omega}_X$  が生じる。もし、力覚生成装置が発生するジャイロモーメント  $T_{gX}$  を制御して  $\dot{\Omega}_{dX} = \dot{\Omega}_X$  とできれば、力覚生成装置によって棒に伝わる振動波形が再現されたと言ってよい。よって、棒の角加速度  $\dot{\Omega}_X$  を再現するには、式(1)と式(2)からロータ回転軸の傾け角度  $\theta(t)$  を次式に従って制御すればよい。

$$\theta(t) = K \frac{I_d}{I_g \omega_g} \int \dot{\Omega}_X(t) dt \quad (3)$$

ここで、定数  $K$  の値によって再現される振動の振幅は変化するため、予備実験を行い利用者に違和感を与えない振幅となるよう  $K=0.75$  とした。また、力覚生成装置の周波数特性の制約から、時間軸を 2 倍にスケールした。

式(3)で算出したロータ回転軸の傾け角度  $\theta(t)$  になるように、プリセッション制御部への入力電圧  $e_i(t)$  を時系列

### 3. 力覚生成装置による振動波形の再現

#### 3.1 ジャイロスコープを用いた力覚生成装置

先行研究<sup>5,6)</sup>で試作したジャイロスコープからなる力覚生成装置の外観を図5に、緒元を表2に示す。ジャイロスコープは、ロータ回転部、プリセッション制御部、振り動作の角速度を計測する角速度センサ部からなる。ジャイロスコープの大きさは、 $62 \times 110 \times 66 \text{mm}$  であり、質量は  $0.23 \text{kg}$  である。力覚生成装置を把持しやすくするために、ジャイロスコープ及びセンサ部を直径  $77 \text{mm}$ 、長さ  $200 \text{mm}$ 、厚み  $3 \text{mm}$  のアクリルパイプ内に搭載している。力覚生成装置全体の質量は  $0.5 \text{kg}$  である。

一定角速度  $\omega_g$  で回転する慣性モーメント  $I_g$  のロータに角速度  $\Omega_p$  のプリセッションを与えると、式(1)で示すジャイロモーメント  $T_g$  が発生し、利用者に力を与えることができる。

$$T_g = I_g \omega_g \Omega_p \quad (1)$$

#### 3.2 再現方法

図5に示す力覚生成装置を考える。装置は X 軸のみ自由に回転できるものとする。いま、力覚生成装置が X 軸の方向にジャイロモーメント  $T_{gX}$  を発生した

データとして計算機内のメモリに保存し、計算機内に保存されたプリセッション制御部へ出力することで、力覚生成装置により仮想振動が再現される。再現される波形を実際に確認するため、力覚生成装置が発生するジャイロモーメント  $T_{gx}$  を計測した。力覚生成装置の角加速度ではなくジャイロモーメントを計測した理由は、装置の持ち方および握り方による影響を排除するためである。材質判別実験において判別した紙束、ゴムシート、木板の3種類とし、各材質を叩いた時の振動を再現した。測定結果を図6から図8に示す。各図の上段は測定したジャイロモーメント  $T_{gx}(t)$  と2.3節で示した加速度センサの加算平均後の出力電圧  $\bar{e}_z(t)$  であり、下段はプリセッション制御部への入力電圧  $e_i(t)$  である。測定結果より、ジャイロモーメント  $T_{gx}(t)$  と加速度センサの加算平均後の出力電圧  $\bar{e}_z(t)$  はよく似た形状の波形となっていた。ただし、 $\bar{e}_z(t)$  に対しては  $T_{gx}(t)$  いずれも 40 ms 程度遅れていることを確認した。

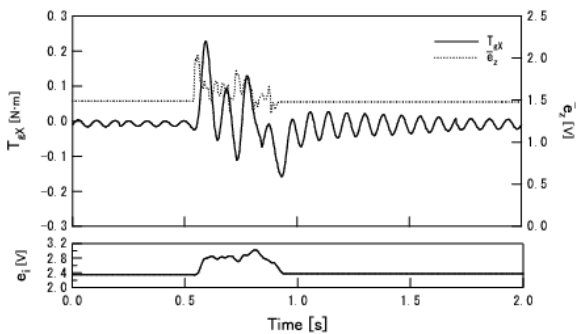


図6 再現された振動波形 (紙束)

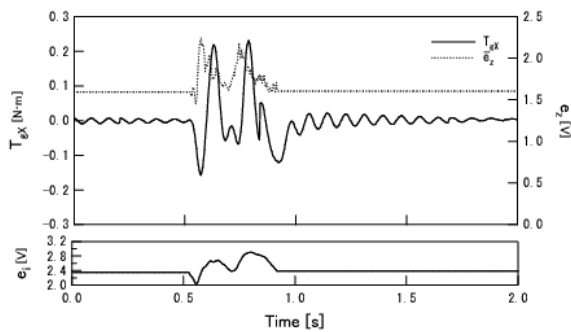


図7 再現された振動波形 (ゴムシート)

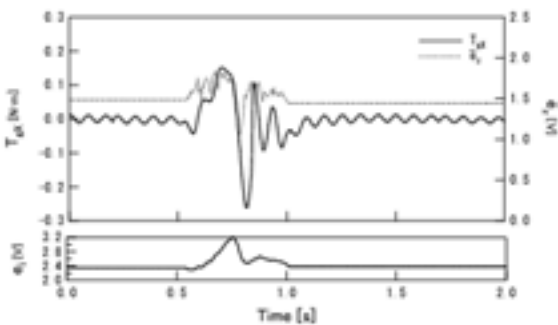


図8 再現された振動波形 (木板)

## 5. 仮想振動に対する知覚実験

### 5.1 実験方法

前節では、時間遅れはあるものの提示物体を叩いたときに生ずる棒の振動が力覚生成装置によって仮想振動として再現されることを示した。力覚生成装置によって仮想振動が再現されても、人に振動の錯覚が与えられるとは限らない。そこで、力覚生成装置を用いて行った仮想振動に対する知覚実験を行った。

前節で示したように、計算機内に保存された  $e_i(t)$  をプリセッション制御部へ出力することで、力覚生成装置により仮想振動が再現される。計算機から  $e_i(t)$  を出力するごとに1回の振動が再現されるが、被験者による材質判別が容易となるように、2秒間隔で5回の再現を行った。被験者には力覚生成装置を利き手で軽く把持させ、探索動作をせずに提示した振動の振動感覚と提示物体との対応づけを事前に学習させた。評価実験では紙束、ゴムシート、木板の仮想振動をランダムに選定して提示するが、提示回数は特に制限せず、被験者の要求に応じて何度でも提示した。被験者自身が判別できたと判断した時点で実験を終了し、判別した物体名を報告させ、結果を記録した。なお判別できない場合には判別不能と報告させた。

被験者は21歳から23歳の右利きの大学生男性5名、女性3名、合計8名である。実験に先立ちインフォームドコンセントを得た。

### 5.2 実験結果

評価実験の結果を表3に示す。横方向は提示した物体名、縦方向は被験者が報告した物体名である。各マスの数値は回答数であり、網掛けをした対角線上の位置にあれば正答、それ以外の位置にあれば誤答である。実験結果によると、木板とゴムシートは75%以上の正答率であるのに対し、紙束は50%という低い正答率であった。木板の振動波形は二峰、ゴムシートの振動波形は下向き一峰といった特徴があるのに対して、紙束には特徴的な振動波形ではなく、力覚生成装置のロータ等の振動が振動感覚に影響を与えたため正答率が低かったと考える。さらに、低い正答率の原因として、仮想振動の被験者に対する事前学習が不足していたことが挙げられる。

音を伴わない振動のみの感覚や探索動作を伴わない材質の判別は、すべての被験者にとっては初めての体験であり、数回の経験で、被験者は振動感覚と提示物体との対応づけが行えるようであったが、似たような振動感覚を判別する場合には、もう少し事前学習が必要となる。また、材質判別実験で用いた棒と比較して、力覚生成装置の把持部の形状は大きい。形状の違いや把持の仕方によっても振動感覚は異なることから、装置が持ちやすくなるよう形状の工夫が必要である。



表 3 知覚評価実験の結果

回答	提示		
	紙束	ゴムシート	木板
紙束	4	1	0
ゴムシート	1	7	0
木板	0	0	8
合計	5	8	8

### 6. おわりに

棒に伝わる振動のみで物体を判別する実験と棒に伝わる振動の計測実験を行なった。人は、棒の種類によらず物体ごとに異なる振動波形を識別して物体の判別を行っていることを示した。次に、棒で物体を叩いたときの振動を力覚生成装置により再現した。棒で物体を叩いたときの振動と試作した力覚生成装置により生成された仮想振動を比較した。試作した力覚生成装置で生成される仮想振動は物体ごとの振動パターンを再現していることを確認した。また、複数の被験者による振動の判別実験から、事前学習により力覚生成装置で再現される仮想振動を判別することが可能であることを確認した。

ハプティックインタフェース技術は、仮想的な感覚を人工的に創り出し、本来アクセスが難しいものも表現できる。本研究で試作した力覚生成装置は、性能向上は必要ではあるが、ジャイロスコープを制御することで利用者に様々な大きさの力覚や振動覚を提示でき、通常の棒を振ったときには得られない仮想感を提示できるものと考ええる。

### 参考文献

1. ダービット・カツ：触覚の世界－実験現象学の地平線－，新曜社(2003.)
2. ホイトマン・リチャーズ：ナチュラル・コンピューテーション－聴覚と触覚・力センシング・運動の計算理論－，パーソナルメディア(2004).
3. M.T.Turvey : Dynamic Touch, American Psychologist,

Vol. 51, No.11, pp.1134-1152(1996).

4. 佐々木正人，三嶋博之：アフォーダンスの構想，東京大学出版，pp.173-211(2001).
5. 中村友基：力覚生成装置の開発とその応用に関する研究，修士論文(2002).
6. 池田知純，松田英夫，中村友基，塩田泰仁，坂本和義，清水 豊：ダイナミック・タッチへの見かけの慣性モーメントを利用した触覚情報の提示方法，電子情報通信学会論文誌 D ， J89-D(6), pp.1403-1412(2006).

(原稿受付 2015/3/18、受理 2015/4/14)

\* 池田知純，博士（工学）  
職業能力開発総合大学校，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:ikeda@uitech.ac.jp  
Tomozumi Ikeda, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

\* 垣本 映，博士（工学）  
職業能力開発総合大学校，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:kakimoto@uitech.ac.jp  
Akira Kakimoto, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

\* 新家寿健  
職業能力開発総合大学校，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:araie@uitech.ac.jp  
Toshitake Araie, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

\* 鈴木重信  
職業能力開発総合大学校，〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email:sgsuzuki@uitech.ac.jp  
Shigenobu Suzuki, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

\* 中村友基，修士（工学）  
福島職業能力開発促進センター，〒960-8054 福島県福島市三河北町 7-14 email:Tomoki.Nakamura@jeed.or.jp  
Tomoki Nakamura, Fukushima Polytechnic Center, 7-14  
Mikahokucyo, Fukushima, Fukushima, 980-8054