

偏心プーリを用いた非接地型の力覚提示装置の試作

川畑 淳也^{1,a)} 大村 悦彰¹ 北須賀 輝明² 有次 正義²

概要: 近年、携帯電話のバイブレーション機能や体感型のゲームのように、デバイス自身が私たちに何らかの力をフィードバックしてくれる力覚提示装置が普及してきている。本論文では身体内に反力を支えているベースがあるこれまでの非接地型の力覚提示装置に対して、中村らが提案している身体内にベースを用いない「Gyro Cube Sensuous」と同じ原理の力覚提示装置を試作し、実用化する際の細かい制御による感覚の特性を知るために、刺激間隔や角加速度を変化させることで力覚の感じ方にどのような違いが出るのかを調べる。6名の被験者による主観評価実験により、なるべく速い回転速度でモータを回転させ、モータの加減速により2周に1回ほどの間隔で半周期分ほどの刺激を与えた時に最も力覚を感じやすいことがわかった。

キーワード: 偏心プーリ、力覚提示装置、非接地装置、非身体内ベース型装置、トルク、遠心力、並進感覚

A Prototype of Non-Grounded Force Feedback Device with Eccentricity Pulley

JUNYA KAWABATA^{1,a)} NOBUAKI OHMURA¹ TERUAKI KITASUKA² MASAYOSHI ARITSUGI²

Abstract: In recent years, haptic devices providing vibration functions are widespread, such as mobile phones. In this paper, we make a prototype that same principle of “Gyro Cube Sensuous” which does not have a base to support the reaction force in the body. We vary the angular acceleration and stimulus interval, to determine the difference of the perception of force. Through experiment, we confirm that the perception of force is larger if the device accelerates in a half of a cycle and decelerates in the next half cycle for each two cycles with higher rotating speed.

Keywords: Eccentric pulley, Haptic device, Ungrounded device, Non-in-body-base device, Torque, Centrifugal force

1. はじめに

近年、私たちの身の回りには、携帯電話のバイブレーション機能であったり体感型ゲーム機の操作リモコンであったり、デバイスからユーザーに何らかの力をフィードバックしてくれる「力覚提示装置」が日常生活の様々な場面で普及してきている。このようにデバイスから直接、力のフィー

ドバックを受けることでユーザは仮想世界を疑似体験でき、実際にその場にいるような臨場感を味わうことができる。またこれらを応用することで、遠隔操作や医療福祉機器の開発も期待されている。

1.1 力覚提示装置

力覚提示装置とは、先に述べたとおり、ユーザに対して振動や、回転などの何らかの力をフィードバックするようなデバイスのことを指す。

力覚提示装置は大きく分けると「接地型」と「非接地・可搬型」、「非接地・非身体内ベース型」の3つに分類することができる。「接地型」はアームやワイヤの抗力や張力に

¹ 熊本大学工学部
Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto,
Kumamoto 860-8555, Japan
² 熊本大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Uni-
versity, Kumamoto, Kumamoto 860-8555, Japan
^{a)} kawabata@dbms.cs.kumamoto-u.ac.jp

より力覚を提示するもので、その際に発生する反力を支えるベースが存在する。そのため大きな力の感覚を提示することができるが、携帯での利用には適していない。その反面「非接地・可搬型」は、反力を支えるためのベースを身体の一部に備えているため、携帯での利用に適している。しかし、反力を支えるためのベースがユーザの身体の一部にあるため、提示される感覚が乏しいという欠点がある。「非接地・非身体内ベース型」は「非接地・可搬型」で身体内にあったベースを利用せずに力覚感覚が得られるようにしたものである。

本論文では、「非接地・非身体内ベース型」の力覚提示装置を研究対象とし、実用化する際の細かい制御による感覚の特性を知るために、モータの制御の違いによる力覚の感じ方の違いを調べることを目的とする。

本論文は7章からなり、2章では現在提案されている「非接地・非ベース型」の力覚提示装置を紹介する。3章では、比較する力覚提示方法を述べる。4章では今回試作した装置についての仕様を示す。5章では装置の力を解析する。6章では実験の結果を示す。そして7章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 Gyro Cube

次世代のマルチメディアと関連して、五感のすべてを情報提示に用いるマルチモーダル・インターフェイスが開発されており、中でも臨場感の大幅な増大につながるであろう、物体に触っている感覚（触覚）やその物体から受ける反力（力覚）などの触力覚を提示するインターフェイスが注目されている。従来はマニピュレータームなどを用いた手法が主流であったが、この手法は装置が大きかったり、拘束されるなどの問題点があり、携帯での利用に適していなかった。

そういった問題を解決するために、身体内の一部にベースを設ける「非接地・可搬型」の力覚提示装置が開発された。これは携帯での利用には適していたが、物を押している感覚や外部から力を受けたという感覚に乏しいという問題点があった。

そこで、身体内に反力用のベースがなくても外部からの力覚感覚が得られるような「非接地・非身体内ベース型」装置として Gyro Cube[1][2]が開発されている。

Gyro Cube は、x-y-z 軸上にそれぞれ3つのプーリが配置され、それらをまわすモータの動きを制御することで、任意の方向にトルクを提示するものである。3つのモータの回転により合成された各運動量の時間的な変化がトルクと呼ばれるものであり、加減速を繰り返すことで任意の方向にトルクを提示できる。

- 利点

3つのプーリにより瞬間的に任意方向へと力覚感覚を

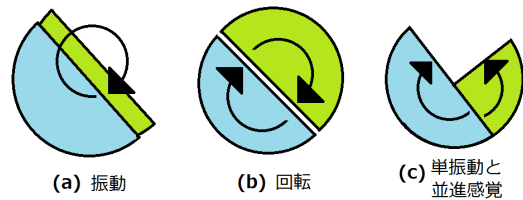


図1 位相差と力覚

提示することができる

- 欠点

モータを回す際に大きな電力が必要

モータの加減速でトルクを発生させるため連続的に一定方向への力の提示ができない

2.2 Gyro Cube Sensuous

Gyro Cube の問題点であった連続的な力の提示が難しいという点を解決するため、二つの偏心プーリを用いた力覚提示装置として Gyro Cube Sensuous [2][3]が開発されている。

Gyro Cube と同じようにモータの加減速を利用し、トルクを発生させ力覚感覚を提示させる。しかし x-y-z 軸の3軸方向すべてにプーリを配置した Gyro Cube とは違い、著者らは2つの偏心プーリを向かい合わせて回転させる「ツイン偏心回転方式」を考案している。二つのプーリの位相差と回転方向を制御することで、ひとつのデバイスで「回転」「振動」「並進感覚」の3つの力覚感覚を提示することができる。

位相差と力覚感覚の関係性を説明すると、図1(a)のように位相差を持たせずに同じ方向に回転した場合は「振動」を、図1(b)のように逆位相で同じ方向に回転した場合は「回転」を、そして図1(c)のように任意の位相差を与え逆方向に回転させた場合は「単振動」をそれぞれ提示することができる。

また、提示された単振動の力覚感覚を利用し「並進感覚」を提示できる。そのためにはモータの速度を加減速させ、その際に必要なトルクの力と、速い動きには敏感で遅い動きには鈍感であるという人間の「非線形感覚特性」を利用する。[4]

- 利点

回転方向や位相差を制御してやることで連続的な並進感覚を生み出すことが可能

- 欠点

並進感覚は、非線形感覚特性によるものなので個人による差が大きい。

これら以外にも、ジャイロモーメントを利用した装置 [5] や、トルクを利用した装置 [6][7] がある。

3. 力覚提示方法

これから力覚提示装置を実際に制御し実用化していく際に、細かい制御による感覚特性を知ることが必要になる。

本論文の目的は、Gyro Cube Sensuous と同種の力覚提示装置を使って、並進感覚を効果的に提示することである。力覚提示装置のモータを制御することによってモータの角速度や動きを変え、それによる力覚の変化を調べる。

並進感覚を効果的に提示できるようにするために変化させる要素として、刺激間隔の長短、角加速度、そして回転速度の大きさの3つを考える。最も効果的に力覚を提示できる条件として、刺激間隔は長く、角加速度と回転速度は大きい方がよいと考えている。その理由は、角加速度と回転速度はそれぞれ、トルクによる力と遠心力に関係する要素であり、導出した式より角加速度と回転速度がそれぞれ大きい方がプーリに与える力が大きくなるからである。トルクによる力と遠心力については5章で詳しく述べる。力覚感覚については、制御により刺激を与えるときに、感覚が長い方が、刺激を与えている時点と与えていない時点の区別をつけやすく力を感じやすいと考えたからである。

そこで、これらの仮説を確かめるために以下の制御で力覚感覚の受け方の違いを調べる。

まず、非線形感覚特性をよりよく利用する場合に、刺激を与える間隔と力覚の感じ方との関係性を調べるために、図2(a)のように1回転ごとに加減速する場合と、図2(b)のように2回転ごとに加減速をする場合を比較する。

次に、トルクによる力と力覚の関係性を調べる。トルクによる力の大きさには角加速度が関係しているため、図3(a)と図3(b)のように図2の2つの角速度を図2より大きくして、図2の場合と比較する。

最後に、遠心力と力覚の関係性について調べる。遠心力には角加速度ではなく角速度が関係しているため、図4(a)と図4(b)のように最高速度を変化させて比較する。最高速度を240[rpm]に加えて150[rpm], 200[rpm], 250[rpm]とする。図4(a)と(b)には図2(a), (b)より最高速度を小さくした場合を示している。

4. 試作

試作した装置の部品を表1に、それぞれの質量と密度を表2に示す。試作品のモータ部分の写真を図5に示す。2章で述べたGyro Cube Sensuousは円柱形となっているが、本研究では、直方体で試作した。モータに取り付けているプーリは図6のように切断している。試作品は2つのプーリを向かい合わせて固定している。

試作品の回路図を図7に示す。

制御用のプログラムの大まかな流れは、まずモータを回し始めて10回転までに指定した最高速度まで回転速度を

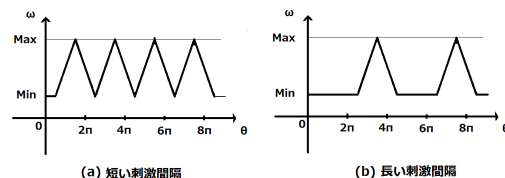


図2 刺激間隔の長短による比較

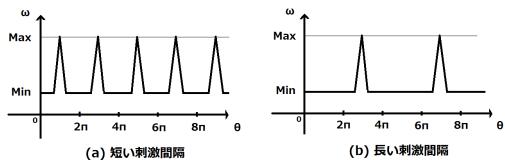


図3 角加速度を図2より大きくする場合

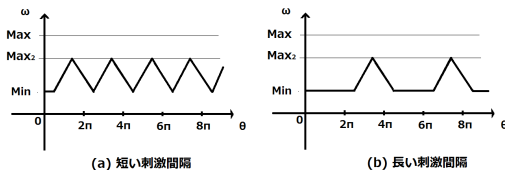


図4 最高回転速度を図2より小さくする場合

表1 使用部品

部品名	型番	メーカー
ステッピングモータ	PMSB-U28	シナノケンシ株式会社
モータドライバ	PDSA-UK	シナノケンシ株式会社
モータベース	—	—
PIC マイコン	PIC18F26K22	Microchip Technology
PIC ライタ	PICkit3	Microchip Technology
プーリ	—	ミスミ社
真鍮 (回転軸)	—	—

表2 質量と密度

部品名	質量 [g]	密度 [g/cm ³]
ステッピングモータ (1 個)	110.000	—
プーリ (未切断)	94.933	2.123
真鍮 (回転軸)	15.134	8.029

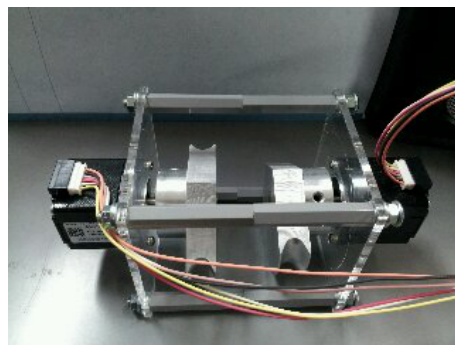


図5 試作品 (モータ部分)

上げ、その後の20回転で速度の加減速を行う。その後の10回転で減速していきモータを停止させるというものである。加減速する20回転の間に並進感覚を提示するこのプログラムの値を変化させることで加減速を制御して刺激の違いを表す。

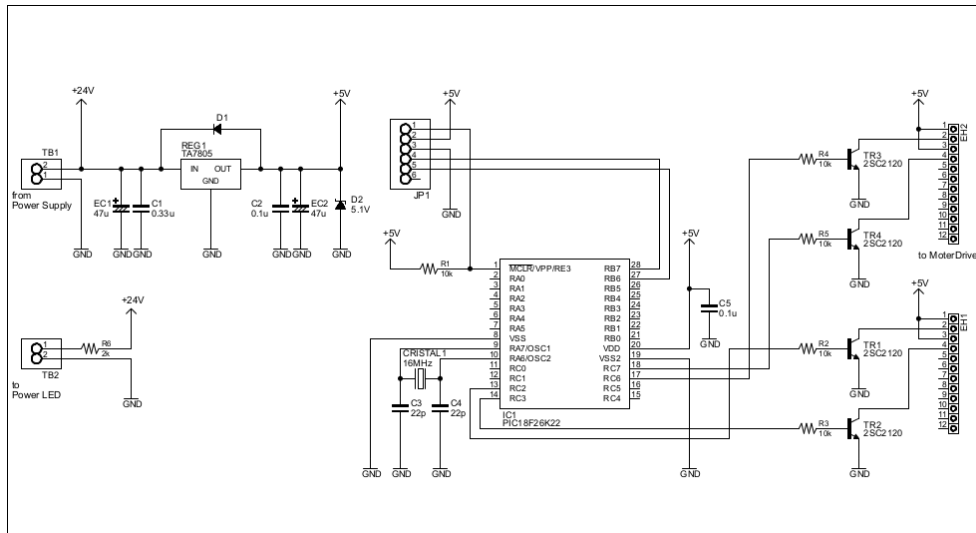


図 7 試作品 (回路図)

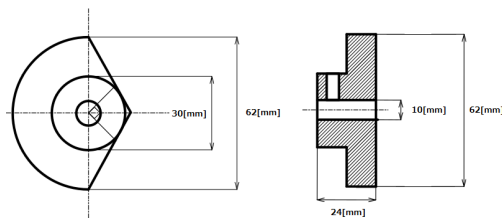


図 6 プーリ切断図

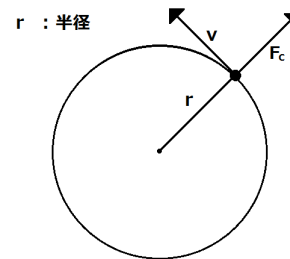


図 8 質点に働く遠心力

5. 力の解析

本章では試作した力覚提示装置の力の解析について述べる。本章では簡単のためプーリを半円とみなして近似する。また本章で解析する力はプーリ 1 つ分のものである。

5.1 遠心力

力覚を引き起こす力の 1 つ目は、遠心力である。遠心力とは、回転運動をしている質点において観測される慣性力の一種で見せかけの力である。円運動のある時点での接線方向に働く慣性力と円軌道との差異が、回転の中心から見て外側へと向かう方向に力が加えられているように見え、遠心力が働いているように感じる。[8]

実際には円運動する物体には遠心力という力は働いておらず、慣性力とその向きを変えようとする向心力が働いている。

図 8 のように半径 r 、速度 v で回転運動する質量 m の物体が、回転の中心から r の位置にあるとき、遠心力 F_c は以下のように表される。

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

式 (1) に角速度 ω を使用すると、式 (2) になる。

$$F_c = mr\omega^2 \quad (2)$$

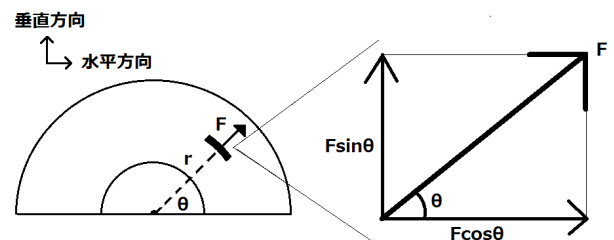


図 9 遠心力の分解

本論文の装置では質点ではなく半円状のプーリを利用しているので、中心から r 離れた微小領域を $rdrd\theta$ とし、プーリの密度を ρ 、厚みを t とすると、この微小領域にかかる遠心力 dF_c は以下になる。

$$dF_c = \rho r^2 \omega^2 drd\theta \quad (3)$$

この微小領域にかかる遠心力を積分することでプーリ全体にかかる遠心力を導出することができるが、遠心力は各質点でかかる方向が違うので水平方向と垂直方向に分けて導出する。水平方向の遠心力 F_{ch} を式 (4) に、垂直方向の遠心力 F_{cv} を式 (5) に示す。

$$F_{ch} = \int_0^\pi \int_0^r \rho r^2 \omega^2 \cos \theta drd\theta \quad (4)$$

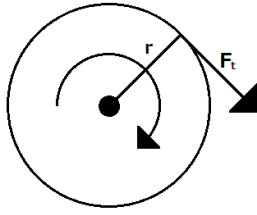


図 10 トルクによる力

$$F_{cv} = \int_0^\pi \int_0^r \rho t r^2 \omega^2 \sin \theta dr d\theta \quad (5)$$

実際に計算 [9] してみると、この場合の水平方向の成分 F_{ch} は 0 であることがわかる。これは左右対象である半円状のプーリを使っているためである。

垂直方向の遠心力 F_{cv} について試作した装置の重量などを当てはめる。内側の回転軸と外側のプーリに分けて計算する必要がある。

考えやすいように、プーリを半円と仮定して、外側の円の半径を a 、密度を ρ_1 、内側の円の半径を b 、密度を ρ_2 とすると、

$$F_{cv} = \int_0^\pi \int_b^a \rho_1 t r^2 \omega^2 \sin \theta dr d\theta + \int_0^\pi \int_0^b \rho_2 t r^2 \omega^2 \sin \theta dr d\theta \quad (6)$$

と表すことができる。式 (6) を実際の装置の値を当てはめて計算すると、

$$F_{cv} = \frac{2}{3} \pi \omega^2 (\rho_1 a^3 - \rho_1 b^3 + \rho_2 b^3) \approx 43 \pi \omega^2 \quad (7)$$

になる。ただし、式 (7) は半円と仮定して計算しているが、試作品はプーリや回転軸の形状が半円ではないので、試作品の遠心力は少なからず減少すると考えられる。

5.2 トルクによる力

力覚を提示する 2 つ目の力はトルクである。トルクとは動力を伝達する回転軸に作用するモーメントのことである。図 (10) のように半径 r [cm] の物体が接線方向に F_t [N] の力を受けて回転しているときトルク N [N·cm] は、以下の式 (8) で表される。

$$N = F_t \times r \quad (8)$$

式 (8) からわかるように、トルクとは F_t と r の外積で表されるベクトルでありその大きさは $F_t r$ である [10]。

回転の運動方程式としてのトルクの表し方として、もうひとつ以下の式 (9) がある。

$$N = I \alpha \quad (9)$$

ただし、 I は慣性モーメントであり、 α は角加速度である。

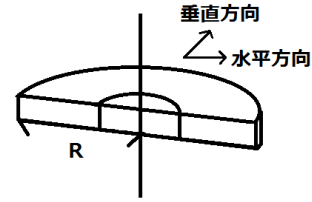


図 11 半円柱

慣性モーメントとは回転のしにくさを表す指標であり、回転体の質量と回転軸の位置で値が変わり、慣性モーメント I の値が大きいほどその物体は回転しにくくなる。角加速度 α は単位時間当たりの角速度の変化量を表している。

式 (8) と式 (9) を組み合わせて、接線方向に働く力を表すと以下の式 (10) になる。

$$F_t = \frac{I \alpha}{R} \quad (10)$$

式 (10) を使い図 11 のような質量 m の偏心プーリにおいて、微小領域にかかるトルク dF_t の大きさは次の式 (11) で表すことができる。

$$dF_t = \frac{\alpha}{R} dI \quad (11)$$

微小領域の慣性モーメント dI は、微小部分の質量に回転軸からの距離の 2 乗をかけたものなので、以下の式 (12) になる。

$$dI = \frac{m r^3}{\pi R^2} dr d\theta \quad (12)$$

式 (11) と式 (12) より微小領域のトルク dF_t は式 (13) で表される。

$$dF_t = \frac{m \alpha}{\pi R^3} r^3 dr d\theta \quad (13)$$

この式 (13) を積分するとプーリ全体にかかる力が求められる。その際、遠心力の場合と同じようにトルクによる力も図 12 のように分解して考える。水平方向の力 F_{th} を式 (14) に、垂直方向の力 F_{tv} を式 (15) に示す。

$$F_{th} = \int_0^\pi \int_0^R \frac{m \alpha}{\pi R^3} r^3 \sin \theta dr d\theta \quad (14)$$

$$F_{tv} = \int_0^\pi \int_0^R \frac{m \alpha}{\pi R^3} r^3 \cos \theta dr d\theta \quad (15)$$

計算すると、トルクによる垂直方向の力の成分 F_{tv} は 0 であることがわかる。

水平方向の成分は、

$$F_{th} = \frac{\alpha m R}{2\pi} \quad (16)$$

となり、角加速度の変化が力の大きさに関係していることがわかる。

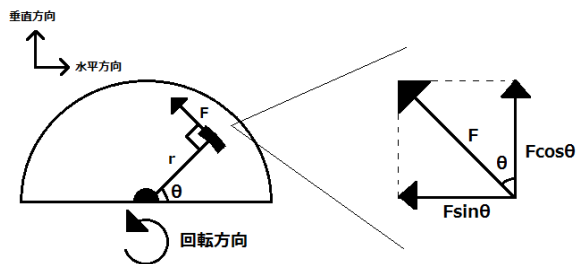


図 12 トルクによる力の分解

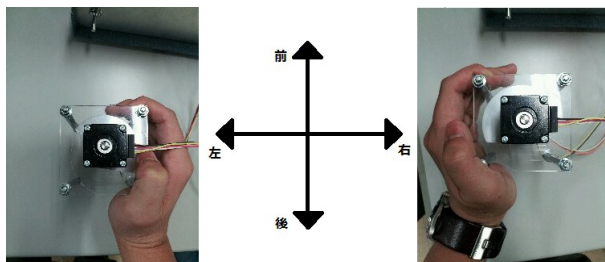


図 13 持ち方と方向

6. 実験

実験では、6名の被験者に図13のような持ち方で試作品を持ってもらい、図中の矢印のような前後左右の4つの方向に並進感覚を提示し、被験者の感じ方を調査する。

6.1 刺激間隔の長短による変化（実験1）

6.1.1 実験方法

実験1では、刺激間隔の変化による力覚の受け方の違いを調べる。図2(a)と(b)のように刺激間隔が短い場合は1回転ごとに加減速し、刺激間隔が長い場合は2回転ごとに加減速する。

まず被験者に並進感覚の提示方向を事前に伝達し、実際に試作品を持ってもらい受けた感覚を記録する。伝えた方向に力を感じたら○、単振動のように伝えた方向と逆方向にも力を受けたら△、判断できないときは×を記録する。

次に、4つの方向のうち1つをランダムに選び力覚を提示するが、この方向を被験者には伝達せずに被験者が受けた感覚を聞き取る。提示した方向と感覚との違いを記録する。ここでも先の実験と同じように○、△、×の3つで記録する。

6.1.2 実験結果

まず、事前に伝達した場合の割合を表3と表4に示し、○、△、×の割合を表5に示す。表3は1回転ごとに加減速した場合を、表4は2回転ごとに加減速した場合を示している。持ち手は左右それぞれにした。次に、ランダムに提示した場合の○、△、×の割合を表6に示し、被験者ごとの正答率を表7に示す。同じように持ち手を左右それぞれにした。表中の正答率は被験者ごとに、○を1に、△を0.5に、×を0に換算し、1を正答、0を誤答として導出する。

表 3 刺激間隔が短い場合

被験者	右手持ち				左手持ち				正答率
	左	右	前	後	左	右	前	後	
A	△	△	○	○	○	○	△	○	81%
B	○	○	△	△	△	○	×	○	69%
C	○	△	×	○	○	△	△	○	69%
D	△	○	○	○	△	○	○	○	88%
E	○	×	△	△	△	△	△	△	50%
F	○	△	△	○	○	○	△	○	81%

表 4 刺激間隔が長い場合

被験者	右手持ち				左手持ち				正答率
	左	右	前	後	左	右	前	後	
A	○	○	○	△	○	○	○	○	94%
B	○	○	○	○	○	○	△	○	94%
C	○	△	○	○	○	○	△	○	88%
D	○	△	○	○	○	○	○	○	94%
E	△	○	△	○	○	○	○	○	88%
F	×	×	△	○	×	△	△	○	43%

表 5 方向を事前伝達した場合の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	50%	42%	8%
	左手	54%	42%	4%
2 回転ごと	右手	67%	25%	8%
	左手	79%	17%	4%

表 6 ランダムに方向を提示した場合の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	53%	27%	2%
	左手	37%	30%	33%
2 回転ごと	右手	77%	17%	7%
	左手	70%	17%	13%

表 7 ランダムに力を提示した場合の被験者ごとの正答率

	A	B	C	D	E	F
1 回転ごと	55%	45%	50%	75%	75%	55%
2 回転ごと	80%	75%	85%	100%	95%	55%

事前に伝達して力覚を体験してもらったものと、ランダムな力覚を体験してもらった場合を比べてみると、ランダムに提示した場合に×の割合が増えているのがわかる。後向きに提示したはずの力を前に感じたり、左に提示したはずの力を右に感じたりとまったく逆に感じることはあまりなかったが、後に提示したときに左や右にも力を感じた場合があった。これは、加速や減速をする際にトルクによる力の方向が提示したい方向以外にも加わっているからだと考えられる。プーリにかかるトルクによる力は、5章で示したように力を提示したい方向と必ずしも平行ではない。そのため、いろいろな方向に力覚を感じてしまい判断が難しくなっていると考えられる。

また正答率についても、表3と表4を見て分かるように、持ち手や被験者で個人差がある。

表 8 角加速度が大きく刺激間隔が短い場合

被験者	右手持ち				左手持ち				正答率
	左	右	前	後	左	右	前	後	
A	○	○	△	○	○	○	△	△	81%
B	△	△	○	△	△	△	△	△	56%
C	△	△	△	△	△	△	×	△	44%
D	△	△	△	○	△	○	△	○	69%
E	△	△	△	△	△	△	△	△	50%
F	△	△	○	×	△	△	○	△	56%

表 9 角加速度が大きく刺激間隔が長い場合

被験者	右手持ち				左手持ち				正答率
	左	右	前	後	左	右	前	後	
A	○	○	○	○	○	○	○	○	100%
B	△	△	△	△	○	△	○	△	63%
C	×	△	×	○	○	△	○	○	63%
D	△	○	○	○	○	○	○	○	94%
E	○	○	○	△	○	○	△	△	81%
F	○	△	○	×	○	○	△	×	63%

表 10 大きな角加速度で方向を事前伝達した場合の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	25%	71%	4%
	左手	21%	75%	4%
2 回転ごと	右手	54%	33%	13%
	左手	71%	25%	4%

表 11 大きな角加速度でランダムに方向を提示した場合の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	40%	23%	37%
	左手	47%	17%	37%
2 回転ごと	右手	63%	17%	20%
	左手	70%	10%	20%

6.2 角速度の大きさによる変化 (実験 2)

6.2.1 実験方法

実験 2 では、角加速度の大きさによる力覚の違いを調べる。ここでは実験 1 で使ったプログラム (図 2) より角加速度が大きく刺激時間が短くなるようなプログラム (図 3) を作成し、実験 1 の結果と比較する。記録方法は実験 1 と同じく○, △, ×で示す。正答率は実験 1 と同じように導出する。

6.2.2 実験結果

まず、事前に並進感覚の提示方向を伝達した場合の結果を表 8 と表 9 に示し、割合を表 10 に示す。表 8 は 1 回転ごとに加減速した場合を、表 9 は 2 回転ごとに加減速した場合を示している。持ち手は左右それぞれにした。次に、ランダムに提示した場合の○, △, ×の割合を表 11 に示し、被験者ごとの正答率を表 12 に示す。実験 1 と同じように持ち手を左右それぞれにした。

表 10 と表 11 を実験 1 の結果である表 5, 表 6 と比べてみると、ほとんどの場合で○の割合が減り、△や×の割合

表 12 大きな角加速度でランダムに力を提示した場合の被験者ごとの正答率

	A	B	C	D	E	F
1 回転ごと	50%	45%	60%	70%	50%	45%
2 回転ごと	95%	70%	75%	80%	40%	70%

表 13 150[rpm] 時の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	30%	23%	47%
	左手	20%	43%	37%
2 回転ごと	右手	53%	13%	33%
	左手	37%	30%	33%

表 14 200[rpm] 時の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	67%	20%	13%
	左手	53%	30%	17%
2 回転ごと	右手	70%	20%	10%
	左手	63%	37%	0%

表 15 250[rpm] 時の割合

		○	△	×
1 回転ごと	右手	30%	13%	57%
	左手	17%	37%	47%
2 回転ごと	右手	93%	3%	3%
	左手	83%	17%	0%

が増えていることがわかる。また、2 回転ごとの加減速については表 6 と表 11 を比べると、さほど実験 1 と変わっているようには見えないが、多くの被験者が実験 1 の場合よりも力が弱かったと答えた。

また、表 12 を見てみると、被験者 1 回転ごとの刺激と 2 回転ごとに刺激のどちらも正答率に差があり、ここでも個人差があることがわかる。

これらの結果より、角加速度を大きくすることにより理論上は大きなトルクが発生し、より強い並進感覚が起こされるはずであるが、非線形感覚特性を利用して力覚を発生させる場合は瞬間的な大きな刺激より半周ほどの長い時間で加減速の刺激を与えた方が並進感覚を感じやすいことがわかった。

6.3 最高回転速度の大きさによる変化 (実験 3)

6.3.1 実験方法

実験 3 では、最高回転速度を変化させたときの力覚の違いを調べる。今回は事前伝達の方は行わず、ランダムに提示する実験のみ行う。記録方法は実験 1, 2 と同じく○, △, ×の 3 段階で示す。

6.3.2 実験結果

150[rpm] の時は表 13 に、200[rpm] の時は表 14 に、250[rpm] の時は表 15 にそれぞれ○, △, ×の割合を示す。

まず 150[rpm] から 200[rpm] に回転速度を上げた場合は

速さが速くなるほど並進感覚を感じやすくなることがわかった。しかし、それ以降は1回転ごとの刺激では速くなるほど感じにくくなり、2回転ごとの刺激では速くなるほど感じやすくなることがわかった。また、被験者からは250[rpm]のときに実験を通して最も大きい力を感じたという声が多数得られた。

この結果から、最高速度が速くなればなるほど力自体は比例して大きくなっていくが、刺激間隔の長短により並進感覚の感じ方に差が生じることがわかった。

7. おわりに

本研究では、「非接地・非ベース型」の力覚提示装置を研究対象とし、産業技術総合研究所のGyro Cube Sensuousと同じ原理を用いた力覚提示装置を試作し、この装置を使って実験した。6名の被験者による主観評価実験では、刺激間隔の長短、加減速時間の変化、最高速度の変化による力覚の受け方の違いを調べた。

刺激間隔の長短を変化させた実験1から、刺激は1回転に1回よりも2回転に1回の間隔で与えた方が力覚をよく感じられるということがわかった。加減速時間を短くした実験2では、大きい角加速度による刺激を $\frac{1}{4}$ 周期ほどの短い長さで与えるよりも、半周期ほどの長さで与えたほうが力覚がよく感じられ、角加速度の大きさより、刺激の時間の方が力覚に与える影響が大きいことがわかった。最高速度を変化させた実験3では、200[rpm]くらいまでは回転速度が大きくなるほど力覚の感じ方がよくなることがわかり、それ以降回転速度を上げると1回転に1回の刺激の場合には感じにくくなり、2回転に1回の刺激の場合は感じやすくなっていくことがわかった。

実験からわかったことを含めて力覚を最も感じやすくするためには、回転速度をより速く、半周期分の加速による刺激を2周に1回与えるのが最もよいということがわかった。

今後の課題について述べる。今回の実験は、いくつかの条件を変えた比較実験であり、その中でよい結果が得られた条件を力覚が感じやすい条件として示した。そこで今後の課題として、250[rpm]以上の回転速度や、刺激の大きさや感覚などを変化させ、より力覚を感じやすいモータの回し方を見つけることが挙げられる。また、様々な条件下での力覚の感じ方のデータを集め比較することも必要になる。例えば、本研究ではすべて右利きの被験者であったが、左利きの被験者に協力してもらったり、今回の実験での装置の持ち方から横に倒し、上下方向への力覚提示を試すなどが挙げられる。他にも、並進感覚の向きをより連続的に変化させたり、力の大小を制御したり、現在1次元で提示している力を3次元に広げることなども考えられる。

参考文献

- [1] Masataka Sakai, Yukio Fukui, Norio Nakamura.: *Effective Output Patterns for Torque Display*, ICAT 2003, pp.160–165, 2003.
- [2] 中村則雄, 福井幸男: 携帯型感覚情報通信における可触化技術の開発動向 ～非ベース型触力覚インターフェース‘GyroCube’について～, バイオメカニズム学会誌 Vol.31, No.2, pp.90–94, 2007.
- [3] 中村則雄, 福井幸男: 非接地型力・トルク提示インターフェースの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.4, pp.545–556, 2006.
- [4] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎: 知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.47–58, 2006.
- [5] 吉江将之, 矢野博明, 岩田洋夫: ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.3, pp.329–337, 2002.
- [6] 木村朝子, 佐藤宏介: 反動トルクを利用した指先装着ハプティックデバイス, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.4, No.1, pp.33–39, 2002.
- [7] 南澤, 深町, 梶本, 川上, 舘: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1, pp.15–23, 2008.
- [8] 小出昭一郎: 三訂版 物理学, 裳華房, 1997.
- [9] 原岡喜重: 教程微分積分, 日本評論社, 2008.
- [10] 穂刈四三二: ベクトル, 共立出版株式会社, 1968.