

回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置の開発

安藤 英由樹^{*1 *2} 尾花 和俊^{*3} 渡邊 淳司^{*3} 杉本 麻樹^{*1 *2} 前田 太郎^{*1 *2}

Development of a rotation moment-type force display using mechanical breaks

Hideyuki Ando^{*1 *2} Kazutoshi Obana^{*3} Junji Watanabe^{*3} Maki Sugimoto^{*1 *2} Taro Maeda^{*1 *2}

Abstract – Recently, research on wearable Non-grounded force display is carrying out. We propose a small and lightweight wearable force display to present motion timing and which joint and direction to move directly. This display outputs a torque using rotational moment and mechanical breaks. We test the effectiveness of this force display through experimentation and suggest design guidelines.

Keywords : Force display, Wearable, Rotation moment, Mechanical break

1. はじめに

ウェアラブルコンピューティングにおける情報提示において、視覚や聴覚に対する情報提示デバイスは多く開発されている。しかし、“いつ、どの方向に手を動かす”等の人間の運動に結びつく情報提示(以降、運動提示)を行うために、映像や音声を使用すると、その刺激の意味を意識上で解釈した後で運動を行うことになり、身体には間接的に作用する。意識上で解釈が必要な場合、運動に結びつく情報のコミュニケーションは困難である。例えば、テニスやゴルフにおけるフォームのインストラクションにおいて、動作を行っている人を観察して真似たり、言語的な指示を受けても理想的に動作することは困難である。したがって、細かな動作方向の提示等、動作のナビゲーションは映像や音声ではなく身体に直接働きかける刺激によって行われるべきである^{[1][2]}。このため映像、音声以外の情報提示手法としては、運動に直接結びつく力覚による情報提示手法の研究も行われている^{[3][4][5]}。力覚による刺激はその刺激自体が方向情報を持つので、運動の部位、タイミングだけでなく運動の方向も容易に提示可能である。運動方向と同じ方向を持った力覚を提示してやれば、直感的な理解が可能で、意識上の解釈を必要としないので刺激に反応するまでの時間も短くなる^[6]。このように、運動提示には意識の解釈を必要とする視覚や聴覚だけでなく、力覚による提示方法も効果的で

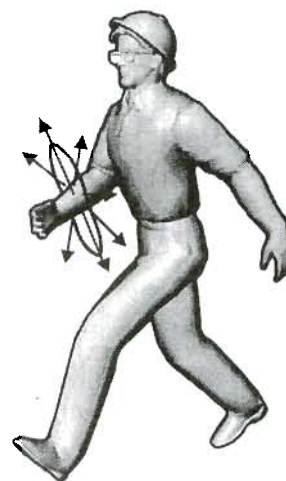


図1 小型力覚情報提示デバイスの概要
Fig.1 Outline of wearable force information display

あると考えられる。しかし、これらのデバイスは把持して使用することを目的としており、重量や形状からウェアラブルの形態には不向きである。一方で、ウェアラブルの形態の力覚提示装置について研究されている^{[7][8]}が、身体の支持や人間の増力を行うことを主体としており、タイミングや方向といった運動提示を目的とするウェアラブルな力覚情報提示装置は開発されていない。

本論文では、人間に知覚可能な程度の大きさの力覚を任意の方向、任意のタイミングに提示し、直感的な解釈による運動提示に繋がる小型力覚情報提示デバイスの提案を行う。具体的には図1のように、腕に装着した状態で持ち運ぶことが可能であり、腕に対して、任意のタイミング、任意の方向に力覚を与えることで、腕の動作のナビゲーションを行うことを目的とした力覚情報提示デバイスを開発する。

*1: 科学技術振興事業団
*2: 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所
*3: 東京大学大学院 情報理工学系研究科
*1: Japan Science and Technology Corporation
*2: NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation
*3: Graduate School of Information Science and Technology

2. 従来の力覚提示デバイス

2.1 力覚提示方式による分類

従来研究されてきた力覚提示装置は大きく3種類に分けられる。第1に、Haptic Master^[9]のような、装置の支点を地面などに固定する Earth grounding-type である。この方式は任意の方向に任意の力を提示することができるが、支点を地面等に固定するためウェアラブルに適用するのは困難である。第2に支点を人間に固定する、Haptic Gear^[10]のような Body grounding-type が挙げられる。この方式は任意の力覚を提示することができるが、作用反作用により生じる本来なら知覚されたくない力が装着者に提示されるため運動の方向を正確に提示するのは難しい。第3には回転運動によるモーメント力を利用した方法でありジャイロ効果を利用した方法^[4]や、回転体の角速度変化を利用した方法^{[3][5]}が挙げられる。回転モーメントを利用した非接地型力覚提示装置は長時間力を提示し続けることは困難であるが Earth grounding-type のように支点を固定する必要はなく、また、Body grounding-type のように知覚されたくない力が発生することもない。

本研究ではウェアラブル環境下における任意のタイミング、任意の方向に力覚を提示するデバイスを開発について、力覚を長時間提示する必要がなく、小型、軽量性に適する回転モーメントを利用した提示方式を採用した。

2.2 回転モーメントを利用した力覚提示の原理

回転モーメントを利用した力覚提示には、回転体の角速度変化で提示する方法と、ジャイロ効果で提示する方法の2つがある。以下では、それぞれの原理を説明する。

角速度の変化による方法

図2のように、慣性モーメント $J[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ のホイールが角速度 $\omega[\text{rad/s}]$ で回転しているとき、ホイールの速度を変化させるために必要なトルク $T[\text{N} \cdot \text{m}]$ は、

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \tag{1}$$

で与えられる。ホイールの速度を変化させる場合、モータやブレーキなどで必要なトルク $T[\text{N} \cdot \text{m}]$ を出力する必要がある。このとき作用反作用の関係から、モータやブレーキには $-T[\text{N} \cdot \text{m}]$ のトルクが発生するので、そのモータやブレーキを人間に固定すれば回転方向と逆方向のトルクが人間に伝達される。このトルクを使って力覚を提示を行うのが、角速度変化による提示方法である。この方法を利用した力覚提示装置として GyroCube^[3] や Virtual Chanbara^[5] が挙げられる。

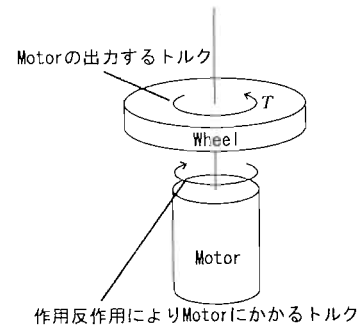


図2 角速度変化による方法
Fig.2 Angular Velocity Method

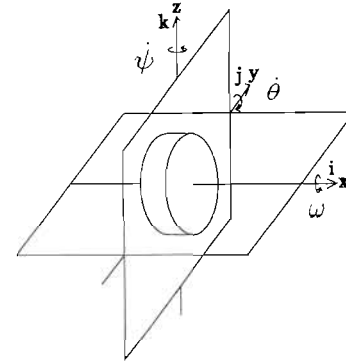


図3 ジャイロ効果による方法
Fig.3 Gyro Effect Method

ジャイロ効果による方法

図3のように慣性モーメント $J[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ のホイールが角速度 $\omega[\text{rad/s}]$ で回転しているとす。 x, y, z 方向の基本ベクトルを i, j, k とし、ジンバルの y 軸周りの角速度を $\dot{\theta}[\text{rad/s}]$, z 軸周りの角速度を $\dot{\psi}[\text{rad/s}]$ とする。ホイールの角運動量は式(2)で表せる。また、外部からホイールに加わる角速度 $\omega_p[\text{rad/s}]$ は式(3)となる。

$$H_0 \simeq J\omega i \tag{2}$$

$$\omega_p = \dot{\theta}j + \dot{\psi}k \tag{3}$$

このとき角運動量保存の法則によりトルク $T[\text{N} \cdot \text{m}]$ が発生し、その値は式(4)によって表され、式(2)(3)から式(5)となる。この回転軸とジンバルの回転方向のベクトルの外積の方向に発生するトルクを用いて力覚提示を行う。この方法を利用した力覚提示装置が GyroDisplay^[4] である。

$$-T = H_0 \times \omega_p \tag{4}$$

$$-T = J\omega\dot{\theta}k - J\omega\dot{\psi}j \tag{5}$$

3. 提案する力覚提示デバイス

3.1 採用する原理

本論文で提案する力覚提示装置は小型、軽量で人間の知覚できる力覚を任意の時間、任意の方向提示可能

であることが求められる。

角速度変化による力覚提示方式における出力トルクは、式(1)より、(ホイールの慣性モーメント) \times (ホイールの角加速度)で決定される。一方、ジャイロ効果を用いた提示方式によって出力されるトルクは、式(5)より、(ホイールの慣性モーメント) \times (ホイールの角速度) \times (ジンバルの角速度)によって決定される。つまり、同じホイール、モータを用いた場合ではジャイロ効果による方法の方が角速度変化による方法に比べ大きいトルクを出力可能である。しかし、ジャイロ効果による方法では、回転しているホイールとホイール回転用のモータの他に、これらを回転させるためのジンバル機構が必要となる。ジンバル機構にはホイール、モータを支える大きさ、強度が必要であり、装置を小型、軽量化するためには不向きと考えられる。一方、角速度変化による方法では、装置のサイズは主にホイール、モータ、ブレーキのサイズによって決まるため、小型・軽量化が容易であると考えられる。

そこで、本論文で提案するウェアラブルな力覚提示装置は腕や足に装着するため、装置が体からはみ出すことを極力避け、行動の妨げになりにくい形状、なおかつ、小型軽量にする必要があることから、角速度変化による方式を採用する。

角速度変化による力覚提示装置において、発生させるトルクを増大するためにはホイール自体の慣性モーメントを大きくする方法と、ホイールの角速度変化を大きくする方法がある。しかし、ホイール自体が大きくなると小型化、軽量化は困難である。そこで、ホイールの角速度変化を大きくすることを考える。これまで、角速度変化による力覚提示装置として GyroCube^[3] が報告されているが、これはホイールを回転させるモータの電圧変化によってホイールの角加速度を変化させる。したがってこの方式における、ホイールの角速度変化の最大値はモータの出力トルクに依存する。しかし、大きなトルクを発生させることが可能なモータは体積、重量が大きくなる。例えば 5[kgf-cm] のトルクを発生するためにはモータの停動トルクが 5[kgf-cm] 必要となるが、現存するモータであれば 100[W] クラスとなり重量が約 0.5[kg] は必要とする。また、装置を回転軸に直行する方向に移動させたときにジャイロ効果によって本来発生させたくない力が生ずる。同様に角速度変化による撃力提示装置として Virtual Chabara^[5] が報告されているが、大きなトルクを得るため減速ギアを用いているため、ホイールの角速度は小さくなる。このためホイールを大きくして慣性モーメントを稼ぐことになり結果としてサイズが大きくなり、重量もかさむ。明らかに装置全体の重量は数[kg] となり装着装置としては現実的ではない。そこで、本論

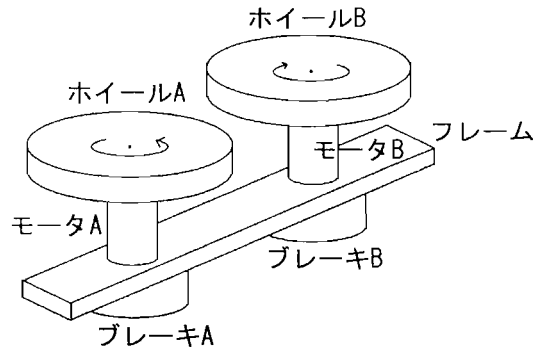


図4 提案するデバイスの概略図
Fig. 4 Outline figure of proposed device

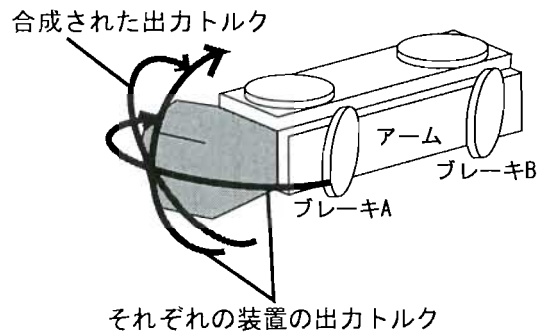


図5 トルク合成の概略図
Fig. 5 Outline figure of torque composition

文で提案するデバイスでは、小型軽量でモータよりも大きな減速トルクを発生させることが可能な機械式ブレーキを用い、ホイールの角速度を減じることで発生する反動トルクを利用して力覚を提示する方式を採用した。また、ジャイロ効果を打ち消すために回転方向の異なるホイールを対に配置した。

提案する装置の出力トルクはホイールを減速するブレーキの減速トルクで決まる。先行研究^{[3][4]}において、人間がトルクを知覚する閾値は 1[kgf-cm] 程度であると報告されている。これより、本研究で提案する装置では力の合成から任意の方向のトルクを得るためにブレーキの時間の制御によって、任意のタイミングとトルク (1~5[kgf-cm]) を目標出力とし、開発を行った。

3.2 装置の構成

本節では具体的に製作した装置の構成を述べる。1軸の力覚を発生させるための装置の概念図を図4に示す。ホイール、モータ、ブレーキの一式を1組とすると、2組ずつ設置するフレームで構成される。一般に、ホイールが等速回転している時に回転軸を傾げる向きに力が働くとジャイロ効果によるトルクが発生するが、本装置では、2つのホイールを互いに逆方向に回転させて装置全体の角運動量 ((2) 式における H_0) を 0 にすることでジャイロ効果によるトルク出力を打ち消す

表 1 装置の構成
Table 1 Composition of experimental model

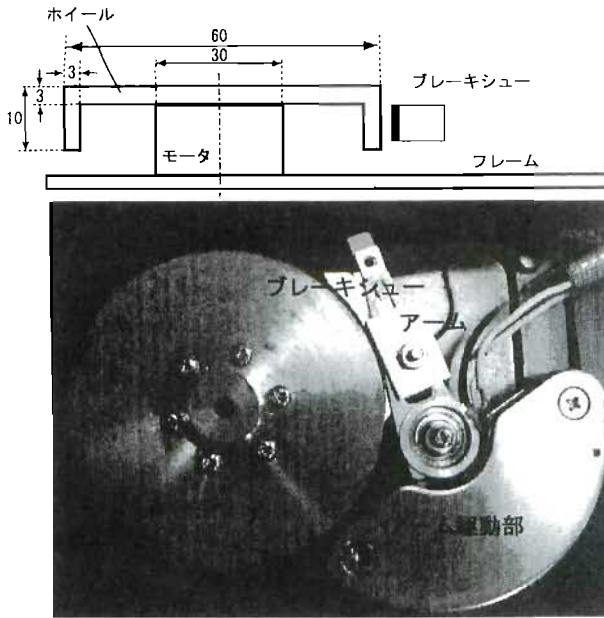


図 6 実験に使用した装置
Fig.6 Experimental model

ホイール	質量 120[g] 厚さ 10[mm] 直径 60[mm] 慣性モーメント 1.03×10^{-4} [kg·m ²]
定常状態での ホイールの回転数	5400 [rpm]
モータ	HDD 用スピンドルモータ 回転数 5400 [rpm] 起動トルク 0.46 [kgf·cm]
ブレーキ	HDD 用ヘッドアーム用モータ ブレーキシューによるサーボブレーキ 押付力/剥離力 0.40 [kgf]
重量 (フレームを除く)	モータ, ホイール, ブレーキの合計 270[g]

りトルクが出力され、最大トルクに達しホイールの回転が完全に止まったところで出力が 0[kgf·cm]になると予想される。装置は PC 上で制御プログラムにより制御される。計測と制御は 1[ms] ごとに行った。ホイールの定常状態での回転数は 5400[rpm] に設定し、定常回転からブレーキにより減速し、ホイールの回転が停止するまでの出力トルクを 6 軸力センサ（株）ニッタ製）により計測する。なお、トルク計測時において回転振れによる外乱を軽減するためカットオフ周波数が 30Hz のローパスフィルタの処理をおこなっている。

4.2 実験結果

実験から得られた出力トルクの時間変化の様子を図 7 に示す。出力トルクはブレーキをかけた後に立ち上がりその後減衰し、ホイールは時刻 300[ms] 付近で回転が停止した。なお、この付近において振動が観測されているが、これは停止する瞬間に動摩擦から静止摩擦に移行する際に発生する非線形なトルクがフレーム装置のマス成分と力センサのバネ成分に共振を引き起こしたことが原因であり、実際の出力トルクとは関係ないと考えられる。また、時刻 0[ms] にブレーキに通電しているにもかかわらず、ブレーキが作用し始めるのに 30[ms] 程度の遅延が認められた。この遅延時間は試行回数に依存しないことから、ブレーキ駆動コイルのリアクタンス成分による応答遅延や機械的空走による遅延であると推測される。

出力トルクの最大値は約 7[kgf·cm] であった。よって、ブレーキによる減速トルクは約 7[kgf·cm] と推定される。

力覚提示装置として使用するためには出力トルクを制御する必要がある。ここで、ブレーキをかけてからトルクが出始める時間（図 7 の A）と最大出力トルクの値となる時間（図 7 の B）に着目するとブレーキの作用している時間と出力トルクに線形関係が確認できる。したがって、ブレーキの作用する時間を制御する

いる。そのため、装置を装着している人間の動作による力覚は発生しない。ただし、人間にトルクを提示する瞬間は片方のホイールの回転速度が変化するのでその瞬間はジャイロ効果が起こる可能性がある。

また、ホイール、モータ、ブレーキ 2 組で 1 軸の力覚提示が可能であるので、その組を図 5 のように直交に 2 つ装着することによって、腕に対して直交する任意の方向に力覚を提示することが可能となる。

4. 評価実験 1:出力トルクの時間変化

本論文で提案するデバイスはホイール・ブレーキの組を 2 組逆回転させて 1 軸の力覚提示を行い、さらにこのセットを 2 つ直交に設置することにより、2 つの方向の力を合成して任意の方向の力覚を提示する。任意の方向の力覚を正確に提示するためには、それぞれの軸の力覚提示のタイミング及び力覚の大きさの精度が重要となる。そこで、本実験では提示する力覚の要素となる 1 組のホイール・ブレーキの組の出力トルク特性を計測し、装置の動作特性を調べた。実験に使用したホイール・ブレーキの組の概略図を図 6 上に実際に使用した装置の写真を図 6 下に示す。装置の仕様は表 1 である。

4.1 実験手順・装置

装置の動作特性を検証するために、回転時のホイールをブレーキにより減速させ、このとき出力されるトルクの時間変化を計測した。ブレーキをかけた直後よ

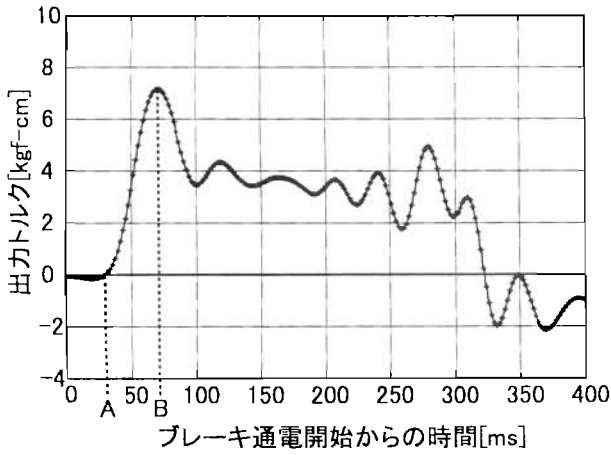


図7 出力トルクの時間変化 (5400rpm)
Fig.7 Time response of torque output

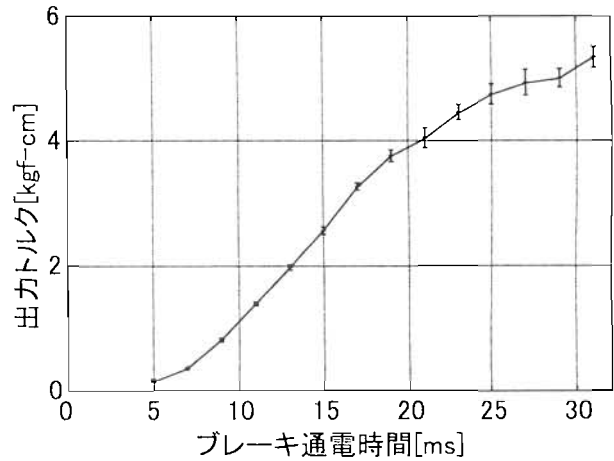


図8 ブレーキ通電時間と最大出力トルクの関係
Fig.8 Relation between break energization times and torque output

ことにより出力トルクの大きさ, 出力されるタイミングの制御が可能であると考えられる。

次に, この制御のためにブレーキ時間と出力トルクの線形関係を詳細に調べる実験を行った。

5. 評価実験 2:出力トルクの制御

5.1 実験手順・装置

実験1では, ブレーキを停止するまで作用させ続け, 出力されるトルクを計測した。実験2では実験1と同じ実験環境下で, 出力トルクとブレーキ通電時間の関係を求める。このために, ブレーキの通電時間を設定し設定時間に対する出力トルク計測した。このときの各設定時刻の試行回数は各々10[回]で, 設定時間は5[ms]から31[ms]まで2[ms]ずつ増加させた。このとき速やかにブレーキを解除するように設定時間後ブレーキは引き離す方向へ通電する。そして, 得られた計測値からブレーキ作用時間に対する最大出力トルクの平均値, 標準偏差を求める。また, ブレーキの動作指令を与えた時間から最大出力トルクが発生する時間の平均値, 標準偏差も求める。

5.2 実験結果

計測値からブレーキ作用時間に対する最大出力トルクの平均値, 標準偏差を計算した結果を図8に示す。図より, ほぼ線形関係にあることが見て取れる。また, 出力トルクを大きくするほど標準偏差も大きくなる。これは, 目標出力トルクを大きくすると目標に対する出力トルクの精度が悪化することを意味する。また, ブレーキの動作指令を与えた時間から最大出力トルクが発生する時間の平均値, 標準偏差を計算した結果を図9に示す。時間に関してもほぼ線形関係にあることが見て取れる。しかし, 標準偏差が1~2[ms]程度であるので実質ブレーキ作用時間の精度は1~2[ms]であることになる。このため, 出力トルクの精度の影響の

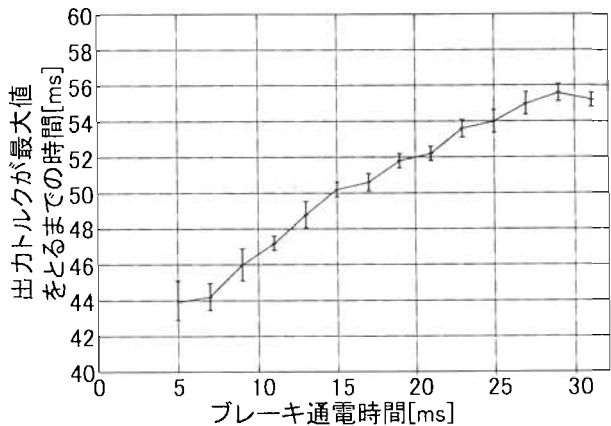


図9 ブレーキ通電時間と出力トルクのタイミングの関係
Fig.9 Relation between break energization times and timing of torque output

要因となると考えられる。また, このブレーキ作用時間の誤差要因として, ブレーキを動作指令に対する機械的な応答誤差が影響していると考えられる。また, 制御周期に対して, 制御対象の時間精度の要求が高いことも問題点である。

6. トルクの合成

前項までは, 1組のホイール・ブレーキについて評価してきたが, 本論文で提案する装置はこれを4組用いて図5のように直行に2つ配置し, 出力トルクの合成で任意方向のトルクを出力する。このとき, 前項で得られた制御可能なトルク出力の精度から出力トルクの合成による角度分解能が算出できる。ここでは, この出力トルク合成による角度分解能について考察する。

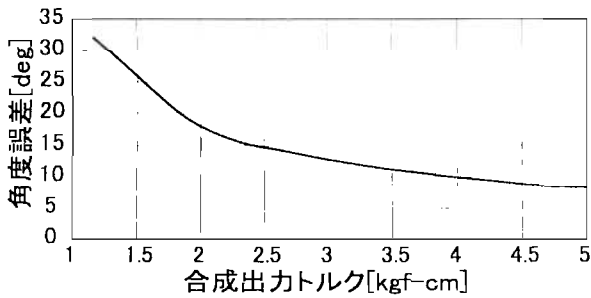


図 10 合成トルクと角度誤差の関係

Fig.10 Relation between angle resolution and torque output

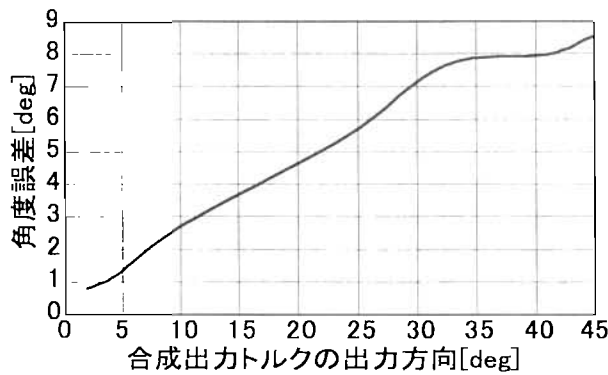


図 11 合成出力トルクの出力方向と角度誤差の関係

Fig.11 Relation between angle resolution and torque angle

出力される合成トルクの角度は以下の式で表される。

$$\theta = \tan^{-1}(T_1/T_2) \quad (6)$$

ここで、 T_1 、 T_2 はそれぞれのトルク出力で θ は出力される合成トルクの角度を示す。前項のトルク指令値に対する出力トルクの標準偏差から、角度分解能を計算する。合成トルクの大きさによって、合成トルクの出力方向の目標角度との誤差がどのような傾向にあるか計算した結果について図 10 に示す。このとき、合成トルクの出力方向は 45[deg] とした。また、合成トルクの出力方向の目標角度に対する、目標角度との誤差についても図 11 に示す。このとき合成出力トルクは 5.0[kgf-cm] とした。

図 10 より、合成トルクの大きさに応じて目標角度との誤差は小さくなるが見て取れる。

図 11 より、合成トルクの出力方向の目標角度に対する、目標角度との誤差は 45[deg] に近づくほど大きくなる傾向が見て取れる。また、グラフに示していないが 45[deg] 以上は 45[deg] を中心対照の傾向になった。

角度誤差は、合成出力トルクを 3[kgf-cm] より小さくした場合大きくなるが、3[kgf-cm] 程度のトルクは方向まで人間に知覚されにくい（評価実験 3 参照）3[kgf-cm] 以上の合成出力トルクにおいて、角度誤差の最大値は 10[deg] 程度であった。したがって、力覚を提示できる角度分解能は約 20[deg] である。したがって 16 方向の分解能をもっていると考えられる。この分解能が人間に対して十分であるか実験を行う必要があると考えられる。

7. 評価実験 3:出力トルクの知覚実験

評価実験 3 では被験者の腕に装置を装着してトルクを提示し、どの程度のトルク出力によって知覚されるか評価実験を行った。実験装置は図 4 の様にジャイロ効果を打ち消すためにモータ、ホイール、ブレーキの組を 2 組用いた。また、装置を装着している腕は腕時計を見ているように接地させず、胸の正面で肘を約 90[deg] 曲げる体勢で行った（図 12）。装置を装着し、目隠し、ヘッドホンによって視聴覚を絶った状態でトルクを出力する。このとき、2 組のどちらかにトルクを発生させ、そのトルクの極性として前方向か後方向のどちらかを必ず回答させた。出力トルクは前項より求めたブレーキ通電時間と出力トルクの関係からブレーキ通電時間を設定し、制御指令とした。1[kgf-cm]、2.5[kgf-cm]、4[kgf-cm]、5[kgf-cm] の 4 種類とし、それぞれの出力トルクについて、どちらかにトルクを発生させるかランダムとして、10[回] 出力し、その正答率を調べる実験を行った。実験設定として、完全に正解を知覚できる場合の正解率は 100[%] に近くなる。一方必ずどちらかの方向を回答させるため、回答が分からなくとも 50[%] は正答できる。心理実験において、通常は 75[%] の正答率になる場合を閾値としている^[11]。本実験においては、試行回数が比較的少ないため正答率が 80[%] をこえる値を閾値とした。

7.1 実験結果

3 人の被験者の実験結果を表 2 に示す。2.5[kgf-cm] から、知覚することはできるが、方向までは正確に限定できない結果であった。出力トルクを大きくすることにより正解率は向上し、4[kgf-cm] には正答率は 80[%] となり、閾値を超えたことから、この実験においては 4[kgf-cm] 以上の出力トルクにおいて、人間は極性を知覚できることが示された。

7.2 考察

出力トルクと人間の知覚について、先行文献^[4]の結果では 0.150[kgf-cm] のトルクにおいて弁別可能であると報告されている。しかし、実験 3 では知覚されるために 4[kgf-cm] 以上の出力トルクを必要とした。この原因として、先行文献では比較的小さな面積におい

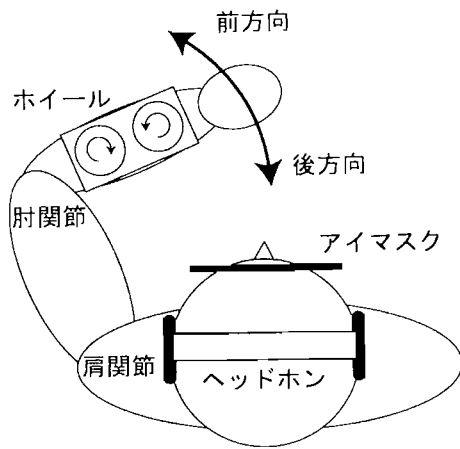


図 12 トルク知覚実験

Fig. 12 Torque perception experiment

表 2 極性の正答率

Table 2 Subject Accuracy Ratio

被験者	1[kgf-cm] の正答率 [%]	2.5[kgf-cm]	4[kgf-cm]	5[kgf-cm]
O	60	70	80	100
I	60	70	90	90
Z	50	50	90	100

て力が伝達されているのに対して本実験では上腕部の広い面積において力が伝達されたため、単位面積あたりの知覚に至る圧力（トルク）は小さくなるからであると考えられる。また、装置が出力するトルクに対し、人間に伝達されるトルクが体の弾性や装着方法に大きく依存することも考えられる。短時間に力覚を提示する場合においては装着方法も重要な問題の一つであり、人間へのトルク伝達に適した装着形態について検討する必要がある。

この実験において 4[kgf-cm] であれば人間は方向を知覚することができた。一回出力した状態から定常状態に復帰するまでにかかる時間は約 0.5[s] であった。連続的に出力トルクを発生するためには定常状態まで戻る時間を短縮する必要がある。このため、よりトルクの大きいモータを使用すれば定常状態までの時間を短縮できる一方、モータのサイズが大きくなり重量もかさむ。このように両者にはトレードオフが起こる。よって、用途に応じて設定する必要がある。

8. おわりに

本研究ではウェアラブル環境下における人間の運動に結びつく情報提示装置として、回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置を提案し、その 1 組における物理特性を測定した。また、この結果から、任意の方向のトルクを任意の時間に出力できることを示しその性能についても考察を行った。また、被験者

に対して十分に力覚を提示することが可能であることを心理物理実験により示した。その結論として、この方式の力覚提示装置は目的とする運動提示を行うのに有効な方法であると考えられる。今後は、この力覚提示装置を用いた具体的な情報提示の応用実験を被験者に対して行い装置の有効性を示す予定である。

謝辞

この研究は科学技術振興事業団 戦略的創造研究推進事業「協調と制御」領域の一環として行われたものである。

参考文献

- [1] 前田太郎: パラサイトヒューマンによる人間機能の研究; 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp.95-98, 1996.
- [2] 財津義貴, 稲見昌彦, 前田 太郎: 腱反射を利用した新たな運動提示装置の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.99-105, 2001.
- [3] Y.Tanaka, S.Masataka, et al.: "Mobile Torque Display and Haptic Characteristics of Human Palm"; ICAT 2001, pp.115-120, 2001.
- [4] 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提示装置"; 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.
- [5] D. Koga, I. Itagaki: Virtual Chanbara ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, p.83(Emerging Technologies), 2002
- [6] 杉本麻樹, 尾花和俊, 安藤英由樹, 前田太郎: 電気刺激を用いた運動誘導のためのウェアラブル装置: 日本バーチャルリアリティ学会 第7回大会論文集:2002
- [7] 満田隆, 久下幸子, 若林将人, 川村貞夫「粒子内蔵型機械拘束要素の開発と身体装着型力学呈示装置への応用」, 計測自動制御学会誌 Vol37, No.11, 2001
- [8] 小林宏, 内村明高, 椎葉太一, 石田佑輔「マッスルスーツの開発 マスタースレーブ式動作実験」日本ロボット学会 創立 20 周年記念学術講演会 講演概要集, 2002
- [9] 浅野, 矢野, 岩田: フォースディスプレイを用いた仮想環境における手術シミュレーションの要素技術開発; 日本バーチャルリアリティ学会第 1 回大会論文集, pp.95-98, 1996.
- [10] 寛直之, 矢野博明, 斎藤允, 小木哲朗, 廣瀬通孝: 没入型仮想空間における力覚呈示デバイス HapticGEAR の開発とその評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.4, pp.1113-1120, 2000.
- [11] 田中 良久: 講座 心理学 2 計量心理学, 東京大学出版

(2002 年 11 月 1 日受付, 2003 年 2 月 15 日再受付)

著者紹介

前田 太郎



昭 62 東大・工・計数工卒. 工博. 昭 62 通産省工業技術院機械技術研究所. 平 4 東大先端科学技術研究センター助手, 平 6 同大学院・工 助手, 平 9 同大学院・工 講師, 平 12 同大学院情報学環 講師. 平 14 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 主幹研究員. 人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレグジスタンスの研究に従事. 計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞.

安藤 英由樹



平 11 愛知工業大学大学院 工 電気電子工 修士課程修了. 平 11 同大学工学研究科 電気材料工博士課程. 平 12 理化学研究所 BMC JRA 配属. 平 13 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーとして 東京大学大学院情報学環研究員を経て現在 NTT CS 研 客員研究員. 生体工学, VR, 制御理論, ウェアラブルなどの研究に従事. 計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会 会員

尾花 和俊



平 14 東大・工・計数工卒. 現在, 東京大学大学院情報理工学系研究科 修士課程. テレグジスタンスの研究に従事

渡邊 淳司 (学生会員)



平 12 東京大学工学部計数工学科卒. 平 14 同大学院修士課程修了. 現在, 東京大学大学院情報理工学系研究科 博士課程. 眼球運動を利用したディスプレイ及び眼球運動中の視覚特性の研究を行う. ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 視覚学会, 映像情報メディア学会 会員. 2001 年 日本バーチャルリアリティ学会論文賞, 2002 年 同学会学術奨励賞受賞.

杉本 麻樹



平 12 千葉工業大・工・電子工卒, 平成 14 同大学院・情報工・博士前期課程修了. 東京大学大学院情報学環研究補佐員を経て現在, NTT コミュニケーション科学基礎研究所 客員研究員. 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバー. 日本バーチャルリアリティ学会会員