



## 6 自由度携帯型力覚提示装置の自己姿勢推定と力覚への反映

奥田悠斗<sup>1)</sup>, 小水内俊介<sup>1)</sup>, 近野敦<sup>1)</sup>

1) 北海道大学大学院情報科学研究科 (〒060-0814 北海道札幌市北区北14条西9丁目, okuda@scc.ist.hokudai.ac.jp)

**概要:** 仮想体験の没入感向上を目的として、力覚フィードバックを与える手法が研究されている。環境に非固定の装置によって力覚を提示する場合、装置の環境に対する姿勢変化によって意図しない提示が行われる可能性がある。本研究ではこれを解決するために、開発中の並進と回転を独立に提示可能な6自由度力覚提示装置に対して姿勢推定および提示力覚の計算制御モデルを構築し、検証を行った。

**キーワード:** 力覚 - ディスプレイ, 力覚 - ソフトウェア, 擬似力覚

### 1. はじめに

仮想現実 (VR) や拡張現実 (AR) の体験をより豊かにするために、力覚フィードバックを与える手法が研究されている。その手法は装置実装の観点から環境固定型・装着型・非接触型、知覚原理の観点から実際に力を作用させるか錯覚を利用するかなどと区分できる。

実際に力を作用させる例として、SPIDAR-I [1] やジャイロキューブ [2] など把持部に牽引力や慣性力を作用させる装置が挙げられる。一方、擬似力覚とは人間の知覚特性に起因する錯覚を利用し力覚が生じているように感じさせる手法であり、固定点からの反作用を利用せずに力覚を提示できることから携帯型・把持型の力覚提示装置への利用が期待される。雨宮らは、人間の知覚特性を利用し小さな加速度と大きな加速度が組み合わされた偏加速度振動を用いてリニア型振動子に特定の周波数・デューティ比の信号を入力することで牽引力錯覚 (擬似力覚) を得られることを報告している [3]。また、Tanabe らは、二つの振動子が生じさせる並進の擬似力覚を組み合わせ回転の擬似力覚を生じさせる手法 [4] を提案した。我々はこれら偏加速度運動によって生起される擬似力覚を利用し、把持・携帯型の6自由度 (並進3自由度・回転3自由度) 力覚提示装置を開発している。装置を用いて仮想体験を行う際、腕を動かす・手首をひねるといった動作によって環境に対する装置の姿勢が変化することが想定される。このとき、仮想体験側で想定する装置の姿勢と実際の姿勢が一致しない事で意図しない提示が行われ、体験への没入感を損なう恐れがある。

本論文ではこの問題を解決するために ①装置の自己姿勢推定と提示力覚への反映 ②希望の力覚提示を行うための装置の駆動計算を行う制御の考案と、実装した制御の検証について述べる。

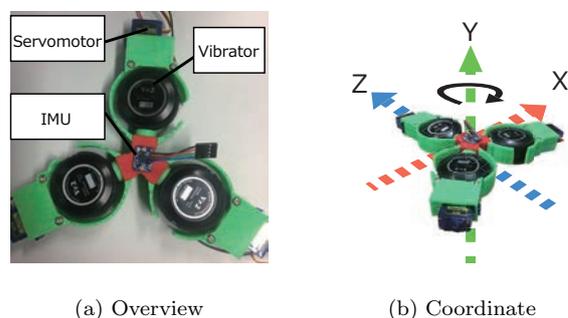


図 1: Developed force display

### 2. 6 自由度携帯型力覚提示装置

制御対象である力覚提示装置の外観を Fig. 2. (a) に示す。装置は振動子の数増加や大型化を抑えるために開発された提示力偏向機構 [6]、三つの振動子、および姿勢推定のための慣性計測装置 (IMU) から構成される。振動子は図で見えている側を表面とし、それぞれ紙面に垂直な二方向に対し力覚を提示可能である。提示力偏向機構は二重リング状構造と駆動子 (サーボモータ) を有しており、振動子を配置した内側リングを駆動子が回転させる事によって、各振動子と装置中心を結ぶ紙面に平行な一軸上で力覚を偏向する。ユーザは装置中心部をつまむように把持し、三つの振動子が生じさせる疑似力覚を感じる。力覚提示の振動子にはアクーラボ製 “VibroTransducer Vp2” を用いた。本素子に Tanabe ら [4] の手法と同様の、Fig. 2. (a) に示す正弦波 2 周期のうち 1 周期の半分を反転させた信号 (電圧) を入力することで、振動体の加速度は Fig. 2. (b) に示すように振動子の一方に大きな加速度が短時間生じ、他方にはそれより小さな加速度が長時間生じる。人間の知覚特性は短時間の大きな加速度変化を鋭敏に捉える [3] ため、素子を把持することで一方に牽引されるような擬似力覚を得られる。駆動入力にはマイクロコンピュータ “Arduino M0 Pro” によ

Yuto OKUDA, Shunsuke KOMIZUNAI and Atsushi KONNO

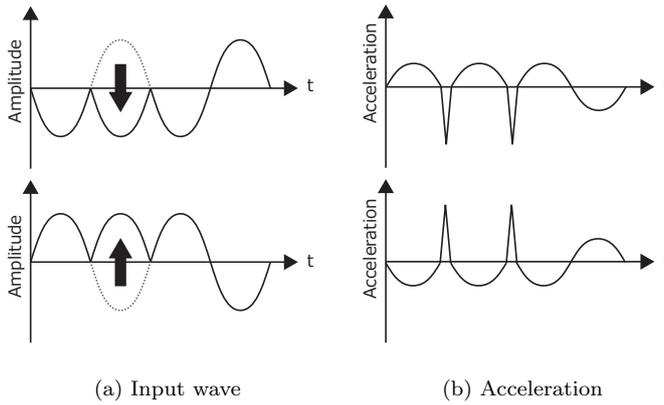


図 2: Proposed wave

て行い、本論文では入力信号（電圧）の周波数を 75[Hz]，振幅は最大 5 [V] とした。

装置の座標系を Fig. 2. (b) に示す．本装置の座標系は振動子のうち一つの回転軸を中心から振動子への向きを正として Z，装置の表側方向を正とした Y，これら二軸に対し直交する左手系の X と定めた．各軸まわりに装置が提示する力覚について、並進力覚  $F_X, F_Y, F_Z$ ，回転力覚（各軸正方向から見て時計回りを正とする） $M_X, M_Y, M_Z$  とおく．図の Z 軸上の振動子を振動子 1，Y 軸正方向から見て振動子 1 の左下を 2，右下を 3 とする．中心から各振動子までの距離を R，各振動子がラベル面に牽引力が生じるよう振動した場合の提示力覚を  $T_1, T_2, T_3$ ，図のように装置外殻と振動子が同一平面状にある場合を無偏向として  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  [rad] とおく．

### 3. 装置の駆動入力と提示力覚の定式化

6 自由度携帯型力覚提示装置の駆動パラメータ（振動子の角度  $\theta_i$  と駆動入力  $T_i$ ）と提示力 F, M との関係は次のように考えられる．本装置が提示する感覚は物理力ではなく人間の知覚に依存した擬似力覚であり、振動子の駆動入力によって決定されるため、 $F_{X-Z}, M_{X-Z}$  は無次元とする．

$$F_X = -T_1 \sin \theta_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_2 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_3 \sin \theta_3 \quad (1)$$

$$F_Y = T_1 \cos \theta_1 + T_2 \cos \theta_2 + T_3 \cos \theta_3 \quad (2)$$

$$F_Z = -\frac{1}{\sqrt{2}} T_2 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_3 \sin \theta_3 \quad (3)$$

$$M_X = -RT_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} RT_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} RT_3 \cos \theta_3 \quad (4)$$

$$M_Y = -RT_1 \sin \theta_1 - RT_2 \sin \theta_2 - RT_3 \sin \theta_3 \quad (5)$$

$$M_Z = -\frac{\sqrt{3}}{2} RT_2 \cos \theta_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} RT_3 \cos \theta_3 \quad (6)$$

これを用い、装置の駆動計算について考える．希望する F, M を出力するための駆動パラメータ（各振動子の角度  $\theta_i$  および力覚強度  $T_i$ ）を導出したい．これは各出力の式 (1) ~ (6) を  $\theta_i, T_i$  について解く事に等しいが、解析的な解を得る事は難しい．そのため、これを希望出力に対する振動子

の角度・力覚強度についての最適化問題におきかえ、数値解法によってその解を近似的に得る．

目的関数を以下のおく．

$$\text{minimize } J = \sum_{i=X-Z} (\mathbf{F}'_i - \mathbf{f}_i)^2 + \sum_{i=X-Z} (\mathbf{M}'_i - \mathbf{m}_i)^2$$

$$\text{subject to } f_X = -T_1 \sin \theta_1 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_2 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_3 \sin \theta_3$$

$$f_Y = T_1 \cos \theta_1 + T_2 \cos \theta_2 + T_3 \cos \theta_3$$

$$f_Z = -\frac{1}{\sqrt{2}} T_2 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} T_3 \sin \theta_3$$

$$m_X = -RT_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} RT_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} RT_3 \cos \theta_3$$

$$m_Y = -RT_1 \sin \theta_1 - RT_2 \sin \theta_2 - RT_3 \sin \theta_3$$

$$m_Z = -\frac{\sqrt{3}}{2} RT_2 \cos \theta_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} RT_3 \cos \theta_3$$

$$-\frac{\pi}{2} < \theta_1, \theta_2, \theta_3 < \frac{\pi}{2}$$

$$-1 < T_1, T_2, T_3 < 1$$

F, M は希望の出力、 $f_{X-Z}, m_{X-Z}$  はある振動子の角度・力覚強度に対し式 (1) ~ (6) によって得られる各出力である．目的関数は希望出力と数値解によって得られる出力との差分とした．

変数  $\theta_i, T_i$  について、 $\theta_i$  は提示力偏向機構に制御される振動子の角度であり、 $-\frac{\pi}{2} < \theta_i < \frac{\pi}{2}$ ． $T_i$  は振動子によって生じられる擬似力覚の大きさであり、生起する二方向に対しそれぞれ印加電圧の振幅最大時が最大となるため、 $-T_{max} < T_i < T_{max}$ ．しかし、擬似力覚は人間の感覚に依るものであり厳密にその大きさを計測する事は困難である．そのため、配置された三つの振動子に印加される電圧の最小・最大値が等しい（= 各振動子の最大力覚が等しい）事から  $-1 < T_1, T_2, T_3 < 1$  とし、希望出力 F, M についても同条件で設定する．計算には数値計算ソフトウェア MATLAB を利用し、非線形最小二乗ソルバー lsqnonlin によって許容誤差（停止条件） $10^{-6}$ ，ステップ数  $N = 600$  の元で数値解を求めた．

### 4. 装置の自己姿勢推定

本装置を用いユーザが仮想体験を行う際、ユーザが腕を動かす・手首をひねるといった動作を行うことで環境に対する装置の姿勢が初期状態より変化することが想定される．このとき、装置が生じさせる力覚が想定した方向と異なる方向になり、体験への没入を阻害する恐れがある．この解消のため、装置の姿勢を計測する事で環境座標系と装置座標系を区別し、任意の装置姿勢において環境座標系における指定方向への力覚提示を可能とする．

Fig. 3 に制御の流れを示す．装置の制御は大きく以下の三つの処理に分けられる．

- 姿勢を計測
- 環境座標系において設定された希望出力 F, M を、推定した装置座標系における  $\mathbf{F}', \mathbf{M}'$  に変換

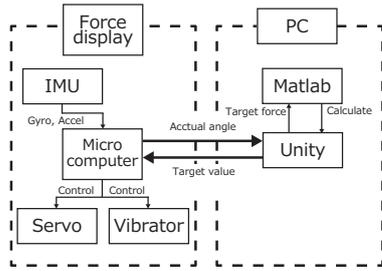


図 3: System configuration

- $F'$ ,  $M'$  を生じさせるための装置の駆動パラメータ (各振動子の角度  $\theta_i$  および力覚強度  $T_i$ ) を前章に基づき計算

姿勢の計測について, Madgwick らによって提案された手法 [5] を用い, 初期姿勢を基準として現在の姿勢をクォータニオンによる姿勢表現 ( $w, x, y, z$ ) で表す.

Madgwick らによる手法では, 離散時間  $t$  における姿勢  ${}^S_E q_t$  は以下の通り求められる.

$$\begin{aligned} {}^S_E q_t &= {}^S_E \hat{q}_{t-1} + {}^S_E \dot{q}_t \Delta t \\ {}^S_E \dot{q}_t &= {}^S_E \dot{q}_{G,t} - \beta {}^S_E \dot{q}_{A,t} \end{aligned}$$

${}^S_E \dot{q}_{G,t}$  は角速度  $G_X, G_Y, G_S$  から回転角を推定し計算された姿勢表現,  ${}^S_E \dot{q}_{A,t}$  は加速度  $A_X, A_Y, A_Z$  について重力加速度のみが計測されると仮定し, 環境座標系と装置座標系が一致する姿勢における重力加速度との差を最小にする姿勢を最急降下法によって求めた姿勢表現である. 本研究ではサンプリング時間  $\Delta T = 1[\text{ms}]$ , 補正係数  $\beta = 0.1$  とした.

力覚提示装置の中心部に配置した IMU から, ジャイロセンサより  $X, Y, Z$  各軸まわりの角速度  $G_X, G_Y, G_S[\text{rad/s}]$  を, 加速度センサより各軸方向の加速度  $A_X, A_Y, A_Z[\text{m/s}^2]$  を取得し, 上式によって姿勢を計測する. 得られた姿勢表現から回転行列を生成し, 環境座標系における  $F, M$  を座標変換し, 装置座標系における  $F', M'$  を導出する.

## 5. 動作検証

実装したシステムについて, 1. 最適化問題の数値解法による計算出力の検証, 2. 自己姿勢推定の精度検証 および 3. 全体の動作検証 の三つの検証を行った.

### 5.1 最適化問題の数値解法による計算出力の検証

駆動計算の精度検証を行った. 装置の姿勢が環境座標系と一致していると仮定し ( $F, M = F', M'$ ), ある希望出力  $F_{X-Z}, M_{X-Z}$  を入力とする. 計算解  $\theta_{1-3}, T_{1-3}$  を式 1~6 に代入して得られる  $F''_{X-Z}, M''_{X-Z}$  と入力  $F_{X-Z}, M_{X-Z}$  の残差を求め評価した.

結果を Table.1 に示す. 表は各行の希望出力 (正規化) ( $F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z$ ) に対し, 最右列が対応する目的関数の残差である. 設定した計算の許容誤差  $10^{-6}$  と結果を比較すると, 「 $F_X = 1$ 」, 「 $F_Z = 1$ 」, 「 $M_Y = 1$ 」の場合について誤差が許容範囲内に収まっており, 設定したステップ数以内に解が収束している事が分かる. 一方, 残

表 1: Result of optimization experiment

| $F_x$                | $F_y$                | $F_z$                | $M_x$                | $M_y$                | $M_z$                | Error                |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | $5.1 \times 10^{-7}$ |
| 0                    | 1                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | $2.1 \times 10^{-6}$ |
| 0                    | 0                    | 1                    | 0                    | 0                    | 0                    | $1.7 \times 10^{-7}$ |
| 0                    | 0                    | 0                    | 1                    | 0                    | 0                    | $2.9 \times 10^{-4}$ |
| 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 1                    | 0                    | $5.0 \times 10^{-7}$ |
| 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 1                    | $5.5 \times 10^{-4}$ |
| $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | 0                    | 0                    | 0                    | $5.9 \times 10^{-4}$ |
| 0                    | 0                    | 0                    | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\sqrt{3}}$ | $1.7 \times 10^{-4}$ |

りの「 $F_Y = 1$ 」, 「 $M_X = 1$ 」, 「 $M_Z = 1$ 」, 「 $(F_X, F_Y, F_Z) = 1$ 」, 「 $(M_X, M_Y, M_Z) = 1$ 」の場合については許容誤差を超えており, 設定したステップ内では解が収束しなかった. これらの誤差の中で最大値は「 $(F_X, F_Y, F_Z) = 1$ 」の場合における  $5.9 \times 10^{-4}$ であった. 入力のノルム (= 1) に対し  $0.059[\%]$  である事から, 十分に高い精度で解を導出できていると言える. 計算時間は平均  $56 [\text{ms}]$  であった.

### 5.2 自己姿勢推定の精度検証

自己姿勢の推定精度について検証を行った. 装置を把持し, 初期姿勢から 1. X 軸まわりに約  $-90^\circ$  回転させた姿勢, 2. Z 軸まわりに約  $+90^\circ$  回転させた姿勢, 3. Y 軸まわりに約  $+90^\circ$  回転させた姿勢 の三つの姿勢について, (初期 1 初期 2 初期 3) のように変化させた. その間システムが計測したクォータニオンによる姿勢表現から, 各軸まわりの回転角度を得て実環境における回転角度と比較した. 実験の結果を Fig. 4 に示す. 上段のグラフは X, Y, Z 各軸について得られた推定回転角度, 中段は実際の装置の姿勢, 下段はその時の推定角度を Unity 上に配置した装置のモデルに反映した図である. 1,2,3 がそれぞれ対応する.

この結果から, X, Z 軸まわりについては概ね追従できている事が分かる. 一方で Y 軸まわりについて回転時の角度の増加が  $90 [\text{deg}]$  より低く, また無回転時にも回転してしまっている事が分かる. 本検証は手で把持し回転させたことから回転時の誤差や意図しない軸まわりの回転が生じる事が想定されるが, それを踏まえても回転角は明らかに小さい. これは, 重力軸まわりについて加速度センサによる補正が不可能であるためと考えられる.

### 5.3 全体の動作検証

希望出力 (力覚) を  $F = \frac{1}{\sqrt{3}}[1, 1, 1]$ ,  $M = [0, 0, 0]$  で一定として入力し, 装置を初期姿勢から 1.X 軸まわりに  $-90^\circ$  回転, 2.Z 軸まわりに  $+90^\circ$  回転, 3. Y 軸まわりに  $+90^\circ$  の通り回転した. 推定姿勢および駆動パラメータ  $\theta_i, T_i$  について逐次計算を行い, 式 1~6 から計算出力  $F'', M''$  を求め, これと  $F, M$  との残差を計測した.

結果を Table.2 に示す. 表は ( $F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z$ ) についての希望出力と計算出力の誤差, および全体の残差

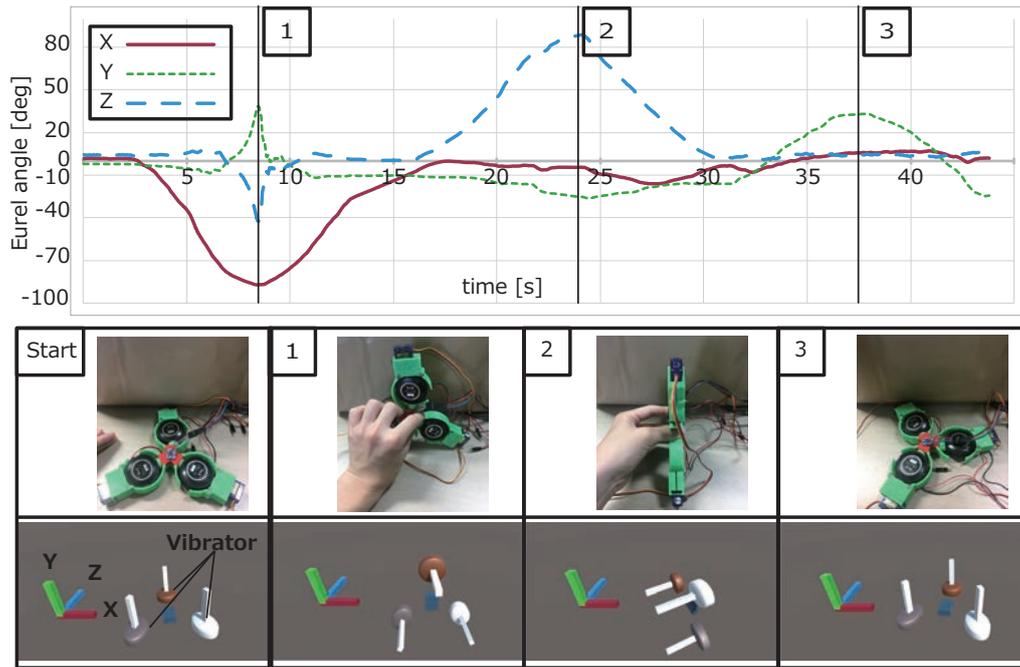


図 4: Result of orientation estimation experiment

表 2: Result of overall experiment

|         | $F_x$                 | $F_y$                 | $F_z$                 | $M_x$                | $M_y$                 | $M_z$                | overall (Error)      |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Max     | $1.4 \times 10^{-2}$  | $5.6 \times 10^{-3}$  | $9.1 \times 10^{-4}$  | $3.4 \times 10^{-2}$ | $2.8 \times 10^{-2}$  | $2.4 \times 10^{-2}$ | $1.3 \times 10^{-3}$ |
| Average | $-2.5 \times 10^{-4}$ | $-7.8 \times 10^{-4}$ | $-4.1 \times 10^{-4}$ | $1.4 \times 10^{-2}$ | $-6.5 \times 10^{-4}$ | $9.2 \times 10^{-3}$ | $7.2 \times 10^{-4}$ |

の最大値・平均値である．最大誤差は  $M_x$  における  $3.4 \times 10^{-2}$  (5.8[%]) であった．この結果より， $M_x$  について精度が若干低いものの，装置の姿勢が変化しても概ね希望の方向へ力覚提示を行うことができていることが確認された．

## 6. おわりに

本論文では，装置の自己姿勢計測と提示力覚の駆動制御について述べた．装置姿勢の計測により任意の装置姿勢で環境座標系における指定方向への力覚提示を可能とした．また，装置座標系における任意の力覚提示を実現するために，駆動入力と出力の関係を定式化し数値的に解いた．今後は推定精度の低かった重力軸まわりの姿勢計測の改善や，実験を通し本制御によってユーザが感じる力覚に生じる影響についての検証を行っていく．

### 参考文献

- [1] 田島寛之 et al. : “6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について”，電子情報通信学会技術研究報告 HIP ヒューマン情報処理，vol. 112, no. 483, pp. 137–142, 2013.
- [2] 吉江将之 et al. : “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.
- [3] 雨宮智浩 et al. : “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. 47–57, 2006.
- [4] Takeshi Tanebe et al. : “Proposal and Implementation of Non-Grounded Translational Force and Torque Display Using Two Vibration Speakers,” in AsiaHapics 2016 Proceedings, 2016.
- [5] Sebastian Madgwick: “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays,” Report x-io and University of Bristol (UK), vol. 25, 2010.
- [6] 奥田悠斗，小水内俊介，近野敦: “提示力偏向機構を用いた携帯型 6 自由度力覚提示装置の開発”，第 18 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1B5-10, 2017.