

6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について

田島 寛之^{1,a)} 季 雨農¹ 馬 姝涵¹ 赤羽 克仁¹ 佐藤 誠¹

概要：ワイヤ駆動型力覚提示装置 SPIDAR について，最大提示力の等方性という指標のもと構造最適化を行った．SPIDAR-I は，方向によって提示力の最大出力が異なるという従来型 SPIDAR が抱える問題を解決するため，デバイスの幾何学的な構造に着目し，最大提示力を平均化した構造を持つ．しかし，先行研究において最大提示力の平均化を主軸 6 方向のみで行なっているため，主軸方向以外の方向における最大提示力については十分に考慮されていない．そのため，本論文では主軸方向以外の方向も対象に入れた最大提示力の偏りを最小にするために，最大提示力に関して min-max 最適化を行う．

About Isotropic Force of a 6 DoF Haptic Interface SPIDAR-I

TAJIMA HIROYUKI^{1,a)} JI YUNONG¹ MA SHUHAN¹ AKAHANE KATSUHITO¹ SATO MAKOTO¹

Abstract: In this paper, I describe design of a wire driven haptic device. It is one of problems of wire driven haptic devices that peak force feedback are different by directions. If we solve this problem, we will be able to consider design of wire driven haptic device by minimal actuator output. Using min-max method, we sought the optimal geometric structure for omnidirectional isotropic peak force feedback, and I made a prototype has it.

1. はじめに

1.1 研究背景

3次元物体操作のためのインタフェース，特に，フォースフィードバック機能を有するヒューマンインタフェースであるハプティックインタフェースは，ユーザと物体との間で力覚インタラクションを提供することで，VR 空間への没入感を増加させ，操作効率を向上させることができると考えられており，研究開発が広く行われている．[1] [2]．

我々は，SPIDAR [3] というパラレルワイヤ機構により力覚提示を実現するハプティックインタフェースの研究を進めており，その用途に合わせて様々な派生のデバイスが開発してきた．そのうちの一つにデスクトップ環境に特化した，小型のグリップ型 6 自由度ハプティックインタフェースがある．

SPIDAR は様々な観点から性能を高めるための研究が行

われてきた．五十嵐 [4] は，幾何学的構造の最適性について，位置・姿勢計算精度と提示力分配計算精度が最大となる構造を求めた．小山 [5] は，五十嵐と同様に幾何学的構造の最適性について，主軸 3 方向について最大提示力^{*1}が等しくなる構造を求めた．

1.2 研究目的

SPIDAR は複数本のワイヤ張力の合力によりユーザへ力覚提示を行うという機構上，力提示方向によって最大提示力は異なる．そのため，ある大きさの力をユーザへ提示させたい場合に，最大提示力が十分である方向では提示可能であるが，最大提示力が小さい方向では提示できないという問題がある．そのため，ハプティックインタフェースを設計する際には全方向に十分な最大提示力を確保することを考えなければならない．最大提示力の偏りを可能な限り少なくする構造を求めることは，アクチュエータの出力を無駄なく利用することにつながるため，ハプティックインタフェースの設計において有用である．

¹ 東京工業大学 精密工学研究所
Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Kanagawa 226-8503, Japan

^{a)} tajima.h.ab@m.titech.ac.jp

^{*1} 最大提示力：力覚提示装置のエンドエフェクタ（以降グリップと呼ぶ）がユーザに加えることができる最大の力

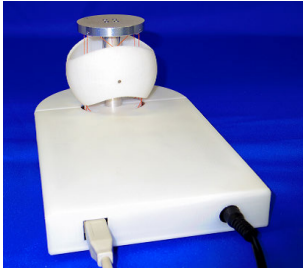


図 1 力覚提示装置 SPIDAR-I [5]
Fig. 1 Haptic Device SPIDAR-I

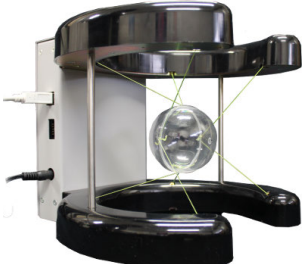


図 2 力覚提示装置 SPIDAR-G [7]
Fig. 2 Haptic Device SPIDAR-G

本研究では、最大提示力の等方性という観点から幾何学的構造の最適化を取り扱うこととする。

2. スtring内蔵型力覚提示装置 SPIDAR-I

2.1 概要

SPIDAR は位置・姿勢計測機能と力覚提示機能を持つ、パラレルワイヤ駆動型力覚提示装置である。特徴としては、剛性が高く軽量に装置を構築できる、他の機構よりも装置を小型に作成できる、構成要素の一つがワイヤであるため透明性が高いなどがある。

SPIDAR-I はデスクトップ環境における力覚提示装置としての以下の様な優れた特徴がある。

- ワイヤがグリップの内側に配置されるため、コンパクトである
- ユーザの手とワイヤが接触しないため、グリップを持ちやすく、操作性も優れている
- 従来型の SPIDAR-G に比べ、力のモーメントがより効率的に出力可能

2.2 SPIDAR の力覚提示（張力分配計算）

この節では SPIDAR の力覚提示を説明する。SPIDAR がユーザへフィードバックする提示力は複数本のワイヤ張力の合力である。よって、提示力を実現するために各ワイヤが加える張力をそれぞれ求める必要がある。その計算を張力分配計算と呼ぶ。

目標とする提示力を成分としたベクトルを力覚ベクトル $\mathbf{f}$ 、 n 本のワイヤの各張力を成分としたベクトルを張力ベクトル $\boldsymbol{\tau}$ とする。張力ベクトル $\boldsymbol{\tau}$ によって提示される力

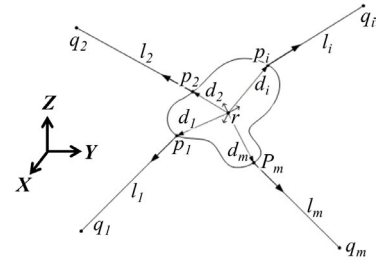


図 3 グリップとワイヤ概念図
Fig. 3 Conceptual Diagram between a Grip and Wires

覚ベクトル $\mathbf{f}$ は以下のように表される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{W}\boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

$$\mathbf{W} = [\Phi_i \ \Psi_i] \quad (2)$$

$$\Phi = (\phi_1 \cdots \phi_m) \quad (3)$$

$$\Psi = (d_1 \times \phi_1 \cdots d_m \times \phi_m) \quad (4)$$

ここで、 $\phi_i = (\mathbf{q}_i - \mathbf{p}_i)/l_i$ は各ワイヤの単位方向ベクトル、 $\mathbf{d}_i$ はグリップ中心から各ワイヤ接続点への相対位置ベクトルである（参考：図 3）。

SPIDAR は、 m 自由度の提示力を実現するために $m+1$ 以上のワイヤ張力を決定しなければならないため、方程式が未知数より少なくなり、通常は解が一意に決まらない。そのため、井上ら [6] が提案した二次計画法を用いた最適化問題（式 (5)）を解くことで各ワイヤの張力を決定している。

$$\text{minimize} : J = \|\mathbf{f} - \mathbf{W}\boldsymbol{\tau}\|^2 + \lambda\|\boldsymbol{\tau}\| \quad (5)$$

$$\text{subject to} : \tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max}$$

ここで、 $\tau_{\min}$ はアクチュエータがワイヤにかけられる最低限の張力 *2 であり、 $\tau_{\max}$ は最大限の張力である。そして、 λ はこの目的関数を正定値関数とするための係数であり、かつ、この項は目標とする提示力を実現するときの各ワイヤ張力をできるだけ弱い張力で実現するためのものである。

3. 等方性に関する最適構造

3.1 モデル設定

SPIDAR-G や SPIDAR-I と同様の構成である 8 本のワイヤを用いた 6 自由度操作が可能なタイプの SPIDAR をモデル化する。SPIDAR は単純化すると球形状のグリップとそれを空間に保持し、力覚を提示するワイヤからなる。ここで、グリップがホームポジション *3 にあるときを考え、ワイヤの張り方は X 軸方向と Y 軸方向について等方であるとする。グリップと 8 本のワイヤを図 4-[1] に示すように、3 つの角度 (ϕ, θ, ξ) とグリップの半径 (R) によって定義する。また、ワイヤ単位ベクトル Φ_i はそれ

*2 最低限の張力を設定する必要があるのは、SPIDAR が各ワイヤの長さ変化からグリップの位置・姿勢計算を行う都合上、ワイヤが弛んだ状態にしてはならないためである。

*3 原点のこと

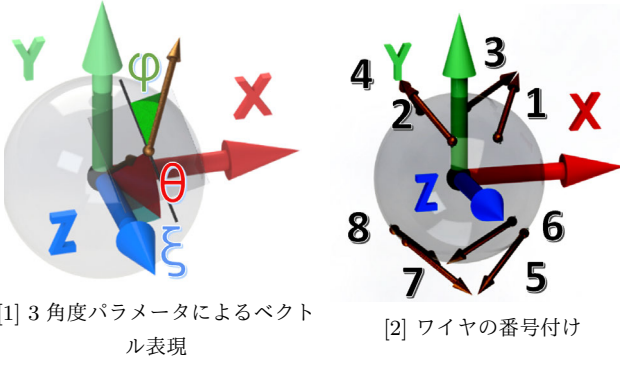


図 4 ワイヤベクトル
Fig. 4 Wire Vector

ぞれ図 4-[2] に示すように番号付けをする。

グリップ中心からグリップ表面上の各ワイヤ接続点の位置ベクトルを $\mathbf{p}_i$ とし、その点からワイヤが引かれる方向の単位ベクトルを Φ_i とすると、以下ようになる。

$$(\mathbf{p}_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta \sin \xi & \sin \theta & \cos \theta \cos \xi \\ -\cos \theta \sin \xi & \sin \theta & \cos \theta \cos \xi \\ \cos \theta \sin \xi & \sin \theta & -\cos \theta \cos \xi \\ -\cos \theta \sin \xi & \sin \theta & -\cos \theta \cos \xi \\ \cos \theta \cos \xi & -\sin \theta & \cos \theta \sin \xi \\ \cos \theta \cos \xi & -\sin \theta & -\cos \theta \sin \xi \\ -\cos \theta \cos \xi & -\sin \theta & \cos \theta \sin \xi \\ -\cos \theta \cos \xi & -\sin \theta & -\cos \theta \sin \xi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$(\mathbf{q}_i) = \begin{bmatrix} B & C & -A \\ -B & C & -A \\ B & C & A \\ -B & C & A \\ -A & -C & B \\ -A & -C & -B \\ A & -C & B \\ A & -C & -B \end{bmatrix} \quad (7)$$

そして、グリップ中心を回転中心として考えたとき、モーメントベクトル Ψ_i は次のようになる。

$$(\Psi_i) = (\mathbf{p}_i \times \mathbf{q}_i) = \begin{bmatrix} -A' & C' & -B' \\ -A' & -C' & B' \\ A' & -C' & -B' \\ A' & C' & B' \\ -B' & -C' & -A' \\ B' & C' & -A' \\ -B' & C' & A' \\ B' & -C' & A' \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし、式 (7)、(8) の各要素は

表 1 並進力またはトルクを提示する張力パターン

Table 1 Tension Pattern presents torque or force

	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8
X 軸並進力	1	0	1	0	α	α	β	β
Y 軸並進力	1	1	1	1	0	0	0	0
Z 軸並進力	α	α	β	β	1	0	1	0
X 軸回転力	0	0	1	1	α'	β'	α'	β'
Y 軸回転力	0	1	1	0	1	0	0	1
Z 軸回転力	β'	α'	β'	α'	1	1	0	0

$$\begin{cases} A = \cos \phi \sin \theta \cos \xi + \sin \phi \sin \xi \\ B = -\cos \phi \sin \theta \sin \xi + \sin \phi \cos \xi \\ C = \cos \phi \cos \theta \\ A' = \sin \phi \sin \theta \sin \xi + \cos \phi \cos \xi \\ B' = \sin \phi \sin \theta \cos \xi - \cos \phi \sin \xi \\ C' = \sin \phi \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

である。なお、式 (1) の $\mathbf{W}$ は式 (7)、(8) より、

$$\mathbf{W} = [\Phi_i \Psi_i]^T = \begin{bmatrix} B & C & -A & -A' & C' & -B' \\ -B & C & -A & -A' & -C' & B' \\ B & C & A & A' & -C' & -B' \\ -B & C & A & A' & C' & B' \\ -A & -C & B & -B' & -C' & -A' \\ -A & -C & -B & B' & C' & -A' \\ A & -C & B & -B' & C' & A' \\ A & -C & -B & B' & -C' & A' \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

3.2 最大提示力のパラメータ表現

提案するデバイスは 8 本のワイヤによる張力の合力により力を提示する。そこで、各モータに配分された張力により生じる XYZ 軸方向の並進力と回転力を求める。以下、張力パターンを表 1 に示す。

なお、表 1 中の張力 T の添え字は、図 4-[2] 中の番号に対応している。ここで T_i が 1 とは i 番のモータが最大張力を発生しており、 T_j が 0 とは j 番のモータが張力を生じていないことを表す。表 1 の各張力パターンのとき、主軸方向のみに力を提示する。ただし、X 軸方向の回転力のみを提示するパターンと Z 軸方向の回転力のみを提示するパターンは負方向への提示力であるとする。以上のように設定すると、表 1 の各張力を重ね合わせたときに T_3 が最も大きな値を取る。最大張力を 1 としているため、ここが最大提示力の上限に影響する。

3.3 解析的導出

SPIDAR の最も力が出にくい方向の力ベクトルを求めて、その力ベクトルが最大となるパラメータ (ϕ, θ, ξ) を

求める。(min-max 最適化) ここでは、X、Y、Z 軸全てが正方向の並進力を提示するときの力ベクトルを考える。なお、SPIDAR の構造は対称であるため同様の力ベクトルが 8 通り存在する。

まず、SPIDAR の並進力とモーメントは式 (10)、表 1 より、

$$\begin{cases} F = 2(\beta - \alpha)A + 2B = 2\left\{\left(\frac{B'}{A'}\right)A + B\right\} \\ F_y = 4C \\ M = 2(\beta' - \alpha')B' + 2A' = 2\left\{\left(\frac{A}{B}\right)B' + A'\right\} \\ M_y = 4C' \end{cases} \quad (11)$$

となる。ここで、 F は X、Z 軸の最大並進力、 F_y は Y 軸の最大並進力、 M は X、Z 軸の最大トルク、 M_y は Y 軸の最大トルクである。また、 $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ は

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{B'}{A'}\right) \\ \beta = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{B'}{A'}\right) \\ \alpha' = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{A}{B}\right) \\ \beta' = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{A}{B}\right) \end{cases} \quad (12)$$

である。

最大提示力が最低となる力ベクトルは

$$f_{min} = \begin{pmatrix} dcbF \\ d(1-c)F_y \\ dcaF \\ d'c'b'M \\ -d'(1-c')M_z \\ -d'c'a'M \end{pmatrix} \quad (13)$$

である。ここで、 $a, b, c, d, a', b', c', d'$ は f_{min} を最低の最大提示力とするための係数である。

また、 a, b, d, a', b', d' 間の条件を以下のように与える。

$$\begin{cases} a\beta + b = 1 \\ a'\beta' + b' = 1 \\ d + d' = 1 \end{cases} \quad (14)$$

力ベクトルのノルム 2 乗を J とおく、

$$J = \|f_{min}\|^2 = d^2c^2(a^2 + b^2)F^2 + d^2(1-c)^2F_z^2 + d'^2c'^2(a'^2 + b'^2)M^2 + d'^2(1-c')^2M_z^2 \quad (15)$$

J を最小化するように、 $a, b, c, d, a', b', c', d'$ を求める。

$$\begin{cases} a = \frac{\beta}{1+\beta^2} \\ b = \frac{1}{1+\beta^2} \\ c = \frac{F_z^2}{F^2/(1+\beta^2)+F_z^2} \\ d = \frac{J_M}{J_F+F_M} \\ a' = \frac{\beta'}{1+\beta'^2} \\ b' = \frac{1}{1+\beta'^2} \\ c' = \frac{M_z^2}{M^2/(1+\beta'^2)+M_z^2} \\ d' = \frac{J_F}{J_F+F_M} \end{cases} \quad (16)$$

ここで、

$$J_F = J_{(d'=0)} = \frac{F_z^2 F^2 / (1 + \beta^2)}{F^2 / (1 + \beta^2) + F_z^2} \quad (17)$$

$$J_M = J_{(d=0)} = \frac{M_z^2 M^2 / (1 + \beta'^2)}{M^2 / (1 + \beta'^2) + M_z^2} \quad (18)$$

である。

式 (16) に示した $a, b, c, d, a', b', c', d'$ を J に代入すると、

$$J = \frac{J_F J_M}{J_F + J_M} \quad (19)$$

となる。

最も力を出しにくい力ベクトルのノルムの 2 乗である J が最大になるように (ϕ, θ, ξ) を求めることで、Min-Max 最適化問題とする。ここでは、 $J \rightarrow \max$ とする代わりに $\frac{1}{J} \rightarrow \min$ とし目的関数を設定する。

式 (11)、(12)、(18)、(19) をそれぞれ代入し、目的関数を求めると

$$\frac{1}{J} = \frac{4(B^2 + A'^2) + (A + B)^2 + (A' + B')^2}{16(AB' + BA')^2} + \frac{C^2 + C'^2}{16C^2 C'^2} \quad (20)$$

となる。この式を最小化する (ϕ, θ, ξ) をダウンヒルシンプレックス法を用いて数値計算を行った。その結果、先行研究とは異なる構造パラメータ $\phi = 45.000[deg]$, $\theta = 42.013[deg]$, $\xi = 0.000[deg]$ を導出することができた。ちなみに、先行研究 [5] の構造パラメータは $\phi = 45.000[deg]$, $\theta = 42.941[deg]$, $\xi = 0.000[deg]$ である。

4. SPIDAR-I 最適構造設計

4.1 デバイスの仕様

デバイスの仕様を以下のように設定する。

- グリップがホームポジションにあるとき、3.3 節で求めた角度パラメータ通りに各ワイヤが配置されていること。
- SPIDAR-I はデスクトップ環境での利用を想定しているデバイスであるため、コンパクトに設計を行うこと。

4.2 デバイスの設計・製作

以上の仕様を満たすデバイスを設計する。グリップの半径 R は、グリップの可動範囲に影響する。そのため、可能な限り大きく設定することが望ましい。成人男性の手に収まる程度のサイズを想定し、半径 $44[\text{mm}]$ とした。デバイスをコンパクトにするため、上下にそれぞれ 4 つのモータを配置するのではなく、下部に 8 つのモータを配置し、そのうち 4 つのワイヤを上方へ伸ばし、2 つのガイドローラを介してワイヤを引くように設計した (図 5)。

SPIDAR-I は、モータに直接取り付け付けたプーリによって巻き取り、ワイヤに張力を発生させる。このモータの最大連続トルクは $10.6[\text{mN} \cdot \text{m}]$ である。プーリ直径は $10[\text{mm}]$

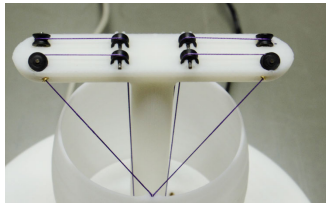


図 5 上部へ引くワイヤガイドローラ

Fig. 5 Guide Rollers to Pull Wires up

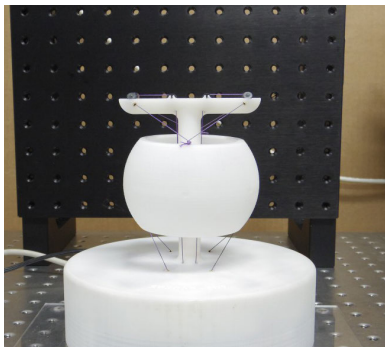
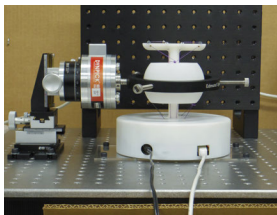
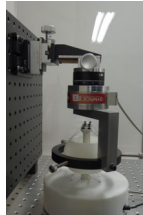


図 6 製作した SPIDAR-I

Fig. 6 new SPIDAR-I



[1] 側面から



[2] 上面から

図 7 提示力測定

Fig. 7 Measuring Force

であるため、最大連続トルク内での使用を前提としたとき、ワイヤの最大連続張力は $2.12[\text{N}]$ である。このデバイスの制御には、 1kHz の高速な更新周期で力覚提示が可能なコントローラを使用した。実際に製作したデバイスを図 6 に示す。

5. SPIDAR-I 評価実験

5.1 最大提示力測定実験

3.3 節で述べたように、最大提示力の等方性について最適な構造はほぼ解析的に求めることができた。しかし、ハプティックインタフェースとして製作する上で、コンパクトに設計を抑えるために加えたワイヤガイドローラや、糸取り付け位置の誤差などの要素があるため、力覚提示性能は理論通りに出るとは限らない。そのため、提示力測定実験を行い、理論値と比較を行う。

最大提示力測定実験の実験装置を図 7 に示す。

実験装置はワコーテック社製の 6 軸力覚センサ Dyn-

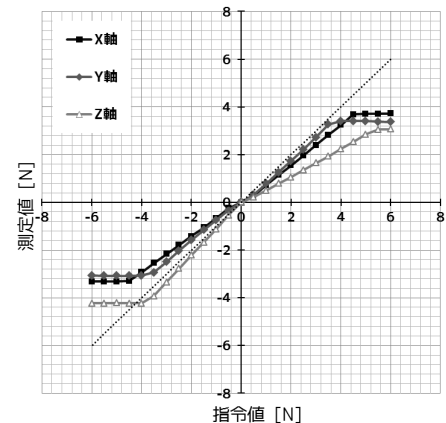


図 8 原点における並進力提示性能

Fig. 8 Force Presentation Performance

表 2 最大提示力比較

	測定値		理論値
	正方向	負方向	正負
F_x [N]	4.321	-4.002	± 4.327
F_y [N]	4.167	-4.310	± 4.434
F_z [N]	4.287	-4.223	± 4.327
M_x/R [N]	4.164	-4.425	± 4.327
M_y/R [N]	4.515	-4.307	± 4.434
M_z/R [N]	4.338	-4.436	± 4.327

Pick(型番: WDF-6A50-1-UG2) と Edmund Optics 社製のパーツを組み合わせたものである。構成要素を以下に示す。

- XYZ 軸ステージ

X 軸 (Y 軸) 方向に $\pm 10.0[\text{mm}]$, Z 軸方向に $\pm 20.0[\text{mm}]$ の平行移動が可能。定盤に取り付けられている。

- 回転ステージ

360 度の回転が可能。XYZ 軸ステージに取り付けられている。

- 6 軸力覚センサ

各軸方向に最大 $50.0[\text{N}]$ の並進力と最大 $1.0[\text{N} \cdot \text{m}]$ の回転力の計測が可能。回転ステージに取り付けられている。

- グリップホルダ

グリップを保持するもの。6 軸力覚センサに取り付けられている。

上述した実験装置構成で、グリップがホームポジションにあるときの最大提示力を測定した。主軸 3 方向の測定を行った。各ワイヤの最大張力は $2.12[\text{N}]$ とし (この値は 4.2 節に由来する), 最低張力は $0.01[\text{N}]$ とする。並進力の測定結果を図 8 に、回転力の測定結果を図 9 に示す。各最大提示力の測定結果を表 2 に示す。なお、このモデルにおいて最も力が出にくい方向の最大提示力の理論値は $\sqrt{J} = 1.880[\text{N}]$ である。

表 2 を見ると、測定値と理論値の差が最大でも $0.3[\text{N}]$ ほどの誤差はあるものの、ワイヤやガイドローラの摩擦など

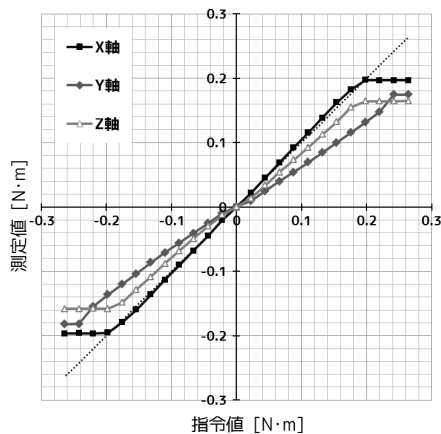


図 9 原点におけるトルク提示性能
Fig. 9 Torque Presentation Performance

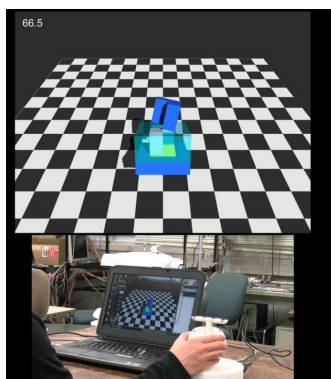


図 10 アプリケーション
Fig. 10 Application

の影響があることを考えると概ね理論値通りの結果が得られたと言えるだろう。

5.2 タスク評価実験

ハプティックインタフェースの性能を測るためには、実際に操作して評価することが必要である。そのため、L 字形のブロックを箱に収納するタスクを行い、ユーザのアンケートによる評価を実施した。被験者は 23~24 歳の成人男性 10 名である。

以下に、アンケート項目を示す

- 使用感はどうだったか
- 思った通りの力を感じたか
- 思った通りの位置に動かせたか
- デスクトップデバイスとして適切な大きさか
- タスク中にストレスを感じたか

以上の項目で 5 段階の評価を行った。

そのアンケートの平均を出したものが図 11 である。ここで、数値が大きい方が良い、小さいほうが悪いという評価としている。アンケートの結果から、SPIDAR-I は小型化しているにもかかわらず、従来型の SPIDAR-G と遜色ない性能を確保していることが確認できた。特に、使用感

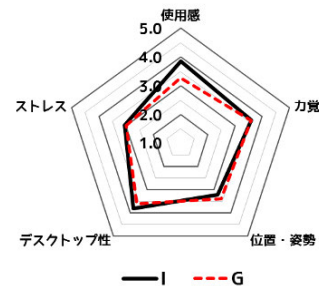


図 11 アンケート結果
Fig. 11 Results of Questionnaire

については向上している。

6. おわりに

本研究では、8 本のワイヤによる 6 自由度の力覚提示装置のグリップがホームポジションに位置している時の最大提示力の全方位等方性について最適な構造を求めた。そして、その構造を持つデバイスを製作し、性能評価実験を行った。その結果、若干の誤差はあるものの、計測した範囲では計算通りの性能が得られた。

また、タスク評価実験を行い、実際のハプティックインタフェースとして使用した場合においても、従来型と比較し使用感を損なわずに小型化できたことを確認した。

参考文献

- [1] Massie, T.H.: *The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects*, Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, vol.55 (1994).
- [2] 川村貞夫, 崔 源, 田中 訓, 木野 仁: パラレルワイヤ駆動方式を用いた超高速ロボット FALCON の開発, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.1, (1997).
- [3] 佐藤 誠, 平田 幸広, 河原田 弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 信学論, D-2, Vol.74, No.7 (1991).
- [4] 五十嵐達郎, 田島寛之, 小山達也, 朱 顔, 赤羽克仁, 佐藤 誠: スtring内蔵型ハプティックインタフェース SPIDAR-I の開発, インタラクシオン 2012, 情報処理学会 (2012).
- [5] 田島寛之, 小山達也, 赤羽克仁, 佐藤 誠: 提示力の等方性を考慮したハプティックインタフェースの開発, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2012).
- [6] 金 時学, 長谷川 晶一, 小池 康晴, 佐藤 誠: 7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.3 (2002).
- [7] 長谷川晶一, 井上雅晴, 金 時学, 佐藤 誠: 張力型力覚提示装置のための張力計算法, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.5 (2004).