# ストリング内蔵型ハプティックインタフェース SPIDAR-Iの開発

五十嵐	達郎 <sup>†</sup>	田	島	寛	之†	小	山	達	也†
朱	顏 <sup>†</sup>	赤	羽	克	仁†	佐	藤		誠†

本論文はストリング内蔵型ハプティックインタフェースの設計と実現について述べる.本デバイス は、ハプティックインタフェース SPIDAR の位置・姿勢計算アルゴリズムを再検討し、性能改善を 目的として最適設計したものである.その結果、パームサイズの小型でありながら、十分な忠実性の 高い位置・姿勢計算が実現可能となった.提案するデバイスはグリップの内側に糸を配置するため小 型化が可能であるとともに、ユーザビリティに優れている.本デバイスは6自由度(3自由度の平行 移動と3自由度の回転)の位置・姿勢測定とともに6自由度の力覚提示が可能である.

# Development of Inner Strings Haptic Interface SPIDAR-I

TATSURO IGARASHI,<sup>†</sup> HIROYUKI TAJIMA,<sup>†</sup> TATSUYA KOYAMA,<sup>†</sup> YAN ZHU,<sup>†</sup> KATSUHITO AKAHANE<sup>†</sup> and MAKOTO SATO<sup>†</sup>

This paper describes design and implementation of an inner string haptic device. This device is designed analytically to improve performance of calculation. Therefore, this device can calculate position and orientation more faithfully. This device has structure that strings are inside a grip, and it became possible to miniaturize by placing mechanics inside a grip too. This device can measure posture of 6 degrees of freedom (3 for translation, 3 for rotation) and display force of 6 degree of freedom.

# 1. はじめに

# 1.1 研究背景

計算機性能の飛躍的な向上により,3次元 VR 空 間をリアルタイムにシミュレートすることが通常のデ スクトップ環境でも可能になってきた.3次元空間内 との物体のやりとりには,既存のマウスのような2次 元入力装置では直感的な操作が困難である.そこで, 3次元空間内の物体とインタラクションができるハプ ティックインタフェースが注目され,研究が進んでい る<sup>3)2)1)</sup>.ハプティックとは触覚の中でも力の感覚のこ とであり,物体を把持したときの重みや障害物と衝突 したときの感触を提示することができる.これらのイ ンタフェースデバイスは手術シミュレーションや組み 立てシミュレーションにおける訓練からエンターテイ メントなど幅広い分野への応用が期待されている.

#### 1.2 研究目的

本研究では、デバイスの設計が容易で多様な構造で

実現可能なストリング駆動型ハプティックインタフェー ス SPIDAR<sup>6)</sup>を扱う.ハプティックインタフェースが よりリアルな力覚をユーザに与え VR 空間に没入させ るためには,位置・姿勢・力覚計算の精度を高くし, 忠実性を高める必要がある.しかしながら,忠実性と 安定性はトレードオフの関係にあり危険な発振を起こ してしまう恐れがある.赤羽<sup>4)</sup>は,更新周波数を高く することにより,安定性は維持したまま高忠実性を実 現している.

しかしながら今まで、最適な力覚提示装置の自体の 幾何学的構造の最適性については十分に議論されてな かった.SPIDARのフレーム・グリップの大きさやス トリングの配置は位置・姿勢・力覚計算に大きく影響 を与える.本研究で、デスクトップ環境での使用を目 的としてパームサイズのデバイスの実現を目指して、 位置・姿勢・力覚計算の忠実性を向上させた新しい構 造の SPIDAR を開発し、インタフェースとしての有 用性を確かめる.

<sup>†</sup> 東京工業大学 精密工学研究所

Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology



図 1 力覚提示装置 SPIDAR-G<sup>5)</sup> Fig. 1 Force Display Device : SPIDAR-G

# 2. SPIDAR システム

# 2.1 力覚提示装置 SPIDAR

SPIDAR は、アクチュエータとエンドエフェクタ を軽量なストリングで接続するため、エンドエフェク タの慣性を小さくすることが可能である.また、スト リングを複数利用したパラレル構造のため、エンドエ フェクタの剛性も高くすることができる.加えて、ス トリングを張り替えるだけで力覚提示のワークスペー スを任意に変化させることが可能であり、デスクトッ プ環境からヒューマンスケールまで、幅広い対応が可 能である.

#### 2.2 位置·姿勢計算方法

力覚ポインタの位置・姿勢計算は、各ストリングの 長さ*l*<sub>i</sub>からエンドエフェクタの位置・姿勢*r*を推定 する計算である.また、張力に基づく力覚提示のため には、(提示自由度+1)次元以上のアクチュエータが 必要であるため、計算式は冗長となる.一般には入力 ベクトルと位置・姿勢ベクトルの関係は非線形となる が、複雑な非線形方程式を解く代わりに、ヤコビアン Jの擬似逆行列を用いた逐次近似により位置・姿勢ベ クトルを求めている.この方法は機構の変更に柔軟に 対応でき、汎用性が高い.

現在では、更新周波数 10kHz という高速な制御を 用いることができるため<sup>4)</sup>,機構の変更に柔軟に対応 できる逐次近似法を用いて力覚ポインタの位置・姿勢 を求める.以下に,位置・姿勢計算方法を示す.

m 個の糸長計測センサからの入力ベクトル *l*と力 覚ポインタの位置・姿勢ベクトル *r*の関係は,一般 に非線形の関係となる.

$$\boldsymbol{l} = f(\boldsymbol{r}) \tag{1}$$

ここで,*し*はストリングの長さベクトル

$$\boldsymbol{l} = (l_1 \cdots l_m)^{l}$$
(2)  
r は力覚ポインタの位置・姿勢ベクトルである.

$$\boldsymbol{r} = (x \ y \ z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z)^T \tag{3}$$

この複雑な非線形方程式を解く代わりに,式(1)を 差分近似して,ヤコビアン行列(以後,ストリング行 列Mと呼ぶ)を用いた逐次計算法で力覚ポインタの



図 2 位置・姿勢計算 Fig. 2 Position and Orientation Estimation

位置・姿勢を求める.

$$\Delta \boldsymbol{l} = \mathbf{M} \Delta \boldsymbol{r} \tag{4}$$

式 (4) から計算される  $\Delta r$  によって以下に示す r の更新を行うことで、力覚ポインタの位置・姿勢を求める.

- (i) 1ステップ前 (t-1) に得られた位置・姿勢  $r_{t-1}$ に対するストリング長ベクトル  $l'_{t-1} = f(r_{t-1})$ とストリング行列 M を求める
- (ii) ストリング長ベクトル  $l_t$ を計測し, 誤差  $\Delta l_t = l_t l'_{t-1}$ を計算する
- (iii) 式(4)を解いて、位置・姿勢ベクトルの変化量
   **Δr**を計算する
- (iv)  $r_t = r_{t-1} + \Delta r$ により, r を更新する

次に、ストリング行列 M の算出について具体的に 述べる.図2の通り、アクチュエータの位置を q、ス トリングとエンドエフェクタの接続点を p、ストリ ング長を l、単位ストリング方向ベクトルを φ、エ ンドエフェクタの位置・姿勢ベクトルを r、エンドエ フェクタの重心から、ストリングとエンドエフェクタ の接続点までのベクトルを dとする.

まず,ストリング長,アクチュエータの位置とスト リングとエンドエフェクタの接続点の間には,

$$\Delta l_i = -\phi_i \cdot \Delta p_i \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\phi}_i = \frac{\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{p}_i}{\boldsymbol{l}_i} \tag{6}$$

次に,エンドエフェクタとストリングの接続点とグ リップの位置・姿勢の間には

$$\Delta p_i = \Delta x + \Delta \theta \times d_i$$
 (7)  
という関係がある. ただし

$$\boldsymbol{x} = (x \ y \ z)^T \tag{8}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \left( \begin{array}{cc} \theta_x & \theta_y & \theta_z \end{array} \right)^T \tag{9}$$

最後に、上記の2式(式(5),式(7))をまとめると

$$\Delta \boldsymbol{l}_{i} = -\boldsymbol{\phi}_{i} \cdot (\boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{x} + \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{d}_{i})$$

$$= -\boldsymbol{\phi}_{i} \cdot \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{x} - \boldsymbol{\phi}_{i} \cdot (\boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{d}_{i})$$

$$= -\boldsymbol{\phi}_{i} \cdot \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{x} - (\boldsymbol{d}_{i} \times \boldsymbol{\phi}_{i}) \cdot \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{\theta}$$

$$= -\begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_{i} \\ \boldsymbol{d}_{i} \times \boldsymbol{\phi}_{i} \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix}$$
(10)

また,

$$\boldsymbol{\Phi} = (\boldsymbol{\phi}_1 \cdots \boldsymbol{\phi}_m) \tag{11}$$

$$\Psi = ( \boldsymbol{d}_1 \times \boldsymbol{\phi}_1 \cdots \boldsymbol{d}_m \times \boldsymbol{\phi}_m)$$
(12)

$$\mathbf{M} = - \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi} \\ \mathbf{\Psi} \end{bmatrix}^{2} \tag{13}$$

としてまとめると式 (4) のストリング行列 M は以上 のように得られる.

#### 2.3 提示力計算方法

提示したい力・トルクを各ストリングの張力に分配 する計算を,張力分配計算という.並進力に関するス トリング張力と提示力 **f** の関係式を以下に得る.

 $\boldsymbol{f} = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\tau}$ (14) *τ* は張力ベクトルである.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{t} \end{bmatrix}$$
(15)

回転力に関するストリング張力と回転力 *t*の関係式 を以下に得る.

$$\boldsymbol{t} = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\tau} \tag{16}$$

上記の2式 (式 (14), 式 (16)) をまとめる.

$$\mathbf{F} = \mathbf{W} \ \boldsymbol{\tau} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{\tau} = (\boldsymbol{\tau}_1 \cdots \boldsymbol{\tau}_m)^T \tag{18}$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi} \\ \mathbf{\Psi} \end{bmatrix} = -\mathbf{M}^T \tag{19}$$

行列 W と, このストリング行列は, 位置・姿勢計 算に用いたストリング行列 M との間には式 (19) の関 係があり, 位置・姿勢計算と提示力分配計算に双対な 関係があることが分かる.

## 3. SPIDAR-Iの最適設計

#### 3.1 SPIDAR-Iの最適構造の導出

#### **3.1.1** 最適化の指標

SPIDAR を設計する際に重要なのは

(i) 入力の最適化:位置・姿勢計算の精度が良いこと
(ii) 出力の最適化:力覚の提示の精度が良いことの2点である.(i)は「式(4)の解の精度が良いこと」と言い換えられる.また(ii)は「式(17)の解の精度が良いこと」と言い換えられる.さらに,式(19)の

双対関係から(i)と(ii)の最適化は両立している.そ こで本研究では(i)の入力の最適化を行う.ここでは ロボティクス分野における可操作性向上と同様の手法 を用いる.

位置・姿勢を求めるためには式 (4) を解く必要があ る.しかし,式(4)は,冗長な連立方程式であるため, 最小二乗法を用いて Δ *r* の推定を行う.

$$\| \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{l} - \mathbf{M} \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{r} \|^2 \to \min$$
(20)  
式 (20) を  $\Delta r$  で偏微分して解を求める.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \| \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{l} - \mathbf{M} \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{r} \|^2}{\partial \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{r}} = \mathbf{M}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{r}$$
$$-\mathbf{M}^T \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{l}$$
$$= 0$$

 $\mathbf{M}^T \Delta \mathbf{l} = \mathbf{M}^T \mathbf{M} \Delta \mathbf{r}$  (21) 以上より式 (21) を解くことにより、 $\Delta \mathbf{r}$  が求まる. 式 (21) の求解の容易さは  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  の性質に依存する.  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  の固有値を  $\lambda_i$ ,対応する固有ベクトルを  $\mathbf{x}_i$ とすれば

$$\mathbf{M}^T \mathbf{M} \ \boldsymbol{x}_i = \lambda_i \ \boldsymbol{x}_i \tag{22}$$

となる.式(23)のように $\Delta r$ を表すと,  $\Delta r = a_1 r_1 + \dots + a_e r_e$  (23)

$$\Delta \mathbf{r} = u_1 \, \mathbf{x}_1 + \dots + u_6 \, \mathbf{x}_6 \tag{23}$$

式 (21) は

# $\mathbf{M}^T \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{l} = \mathbf{M}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\Delta} \boldsymbol{r}$

 $= a_1\lambda_1 x_1 + \dots + a_6\lambda_6 x_6$  (24) となる.ここで、各固有値 $\lambda_i$ は、それぞれの固有ベ クトル方向の感度を表していると言える.つまり、固 有値が大きい程、固有ベクトル方向の影響が強まる. よって、各固有値の平均を大きくし、分散が少なくな ると計算の忠実性・安定性が良くなると言える.そこ で、固有値の平均的な大きさを最大化することを目標 として最適化の評価関数を

$$J = \det \left( \mathbf{M}^T \mathbf{M} \right)$$
$$= \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6 \tag{25}$$

とする.

#### 3.1.2 パラメタの設定と評価関数の導出

6 自由度ハプティックインタフェース SPIDAR-G は 直方体フレームと球のグリップからなる.X 軸方向と Y 軸方向はストリングの張り方の対称性を考慮して, フレームの大きさは図 3 のように X,Y 軸方向に 2D, Z 軸方向に 2D<sub>z</sub> とする.グリップの半径は R とする. また,SPIDAR-G のグリップとストリングの接続点 を図 4 に示す.最適化の設計パラメタは D, D<sub>z</sub>, R で ある.

また, SPIDAR を使用するときグリップはホーム ポジションにある時がほとんであるため,その最適評 価関数式 (25) を算出し最適化を行う.フレームの位



図3 SPIDAR-G フレーム Fig. 3 Frame of SPIDAR-G



図 4 グリップとストリング拡大図 Fig. 4 Grip and String Enlarged View

$$\begin{array}{c} \boldsymbol{q}_{1}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{2}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{3}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{3}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{4}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{5}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{5}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{5}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{6}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{8}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{8}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{8}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{8}^{T} \\ \boldsymbol{q}_{8}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{2}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{3}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{7}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{8}^{T} \\ \boldsymbol{p}_{8}^{T}$$

各ワイヤの単位方向ベクトル  $\phi_i$ を式 (6) より求めと, となる. 6 個の固有値  $\lambda_i$   $(i = 1, \cdots, 6)$  は ● は次式で与えられる.

$$\boldsymbol{\Phi}^{T} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{D}-R}{L} & \frac{D}{L} & \frac{D_{z}}{L} \\ \frac{\underline{D}-R}{L} & -\frac{D}{L} & \frac{D_{z}}{L} \\ -\frac{\underline{D}-R}{L} & \frac{D}{L} & \frac{D_{z}}{L} \\ -\frac{\underline{D}-R}{L} & -\frac{D}{L} & \frac{D_{z}}{L} \\ \frac{\underline{D}}{L} & \frac{\underline{D}-R}{L} & -\frac{D_{z}}{L} \\ \frac{\underline{D}}{L} & -\frac{\underline{D}-R}{L} & -\frac{D_{z}}{L} \\ -\frac{D}{L} & -\frac{D-R}{L} & -\frac{D_{z}}{L} \\ -\frac{D}{L} & -\frac{D-R}{L} & -\frac{D_{z}}{L} \end{bmatrix}$$
(28)

ただし

$$L^{2} = (D - R)^{2} + D^{2} + D_{z}^{2}$$
(29)  
さらに, グリップがホームポジションにある場合,

 $\boldsymbol{p}_i = \boldsymbol{d}_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$ (30)となるので,式(12)のワイヤモーメント行列 Ψは

$$\Psi^{T} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{RD_{z}}{L} & \frac{RD}{L} \\ 0 & -\frac{RD_{z}}{L} & -\frac{RD}{L} \\ 0 & \frac{RD_{z}}{L} & -\frac{RD}{L} \\ 0 & \frac{RD_{z}}{L} & \frac{RD}{L} \\ -\frac{RD_{z}}{L} & 0 & -\frac{RD}{L} \\ -\frac{RD_{z}}{L} & 0 & \frac{RD}{L} \\ -\frac{RD_{z}}{L} & 0 & -\frac{RD}{L} \\ \frac{RD_{z}}{L} & 0 & -\frac{RD}{L} \end{bmatrix}$$
(31)

置  $\boldsymbol{q}_i$  とグリップ上の接続点  $\boldsymbol{p}_i$  は以下のようになる. となる.以上より、行列  $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$  は以下のようになる.

$$\mathbf{M}^{T} \mathbf{M} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi} \\ \mathbf{\Psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi} \\ \mathbf{\Psi} \end{bmatrix}^{T}$$
$$= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} (32)$$

ただし

$$\begin{cases}
a_{11} = a_{22} = \{4(D-R)^2 + 4D^2\}/L^2 \\
a_{33} = 8D_z^2/L^2 \\
a_{44} = a_{55} = 4(RD_z)^2/L^2 \\
a_{66} = 8(RD)^2/L^2 \\
a_{15} = a_{24} = -\{4RD_z(D-R)\}/L^2 \\
a_{42} = a_{51} = -\{4RD_z(D-R)\}/L^2
\end{cases}$$
(33)

$$\begin{cases} \lambda_1 \lambda_5 = a_{11} a_{55} - a_{15} a_{51} \\ \lambda_2 \lambda_4 = a_{22} a_{44} - a_{24} a_{42} \\ \lambda_3 = a_{33} \\ \lambda_6 = a_{66} \end{cases}$$
(34)

で与えられるので,評価関数 J は  

$$J = |\mathbf{M}^{T}\mathbf{M}|$$

$$= \lambda_{1}\lambda_{2}\lambda_{3}\lambda_{4}\lambda_{5}\lambda_{6}$$

$$= (a_{11}a_{55} - a_{15}a_{51})$$

$$(a_{22}a_{44} - a_{24}a_{42})a_{33}a_{66}$$
(35)

すなわち

$$J = \frac{2^{14}}{L^{12}} (DD_z R)^6 \tag{36}$$

となる.

3.1.3 パラメタの最適化

式 (36) に関して,

$$J' = \frac{DD_z R}{L^2} = \frac{DD_z R}{(D-R)^2 + D^2 + D_z^2}$$
(37)

とおくと, Jの最適化は J'の最適化と等価となる. は じめに  $D_z$  を最適化する.  $D_z$  で J' を偏微分すると,

$$\frac{\partial J'}{\partial D_z} = -\frac{DR\{D_z^2 - (D - R)^2 - D^2\}}{\{(D - R)^2 + D^2 + D_z^2\}^2}$$
(38)

となる。 最適化の条件より  
$$D_z^2 = (D-R)^2 + D^2$$
(39)

を得る. このとき J' は

$$J'\Big|_{D_z^2 = (D-R)^2 + D^2} = \frac{DR}{2\sqrt{(D-R)^2 + D^2}} = \frac{D}{2\sqrt{2(D/R - 1/2)^2 + 1/2}}$$
(40)

となる.式(40)の分母に注目すると,式(40)を最大 化する *R* と *D* の条件は

$$R = 2D \tag{41}$$

の時が最大である.以上をまとめると,

$$\begin{cases} R = 2D\\ D_z = \sqrt{2}D \end{cases}$$
(42)

が最適値である.

## 3.2 SPIDAR-I の最適装置構成

## 3.2.1 SPIDAR-I 概形

3.1.3 で求めた最適化パラメタにより,新しい SP-IDAR は図 5 のようになる.図のように糸はすべて グリップの内側に配置されている.そのため,グリッ プ自体も従来の球形ではなく,リング状の円筒形を採 用する.これによりある範囲では糸が干渉することな



Fig. 5 General Form of SPIDAR-I

く,グリップの6自由度操作が可能となる. 糸を支え る内部フレーム形状より,以後この形の SPIDAR を SPIDAR-I と呼称する.

## 3.2.2 SPIDAR-I の開発

設計した SPIDAR-I の全体図は図 6 のようになる. この設計に基づき実際に開発した SPIDAR-I の写真 を図 7 に示す.

グリップの外径はユーザが握りやすいとされる 70[mm] とした.材質は十分な剛性を持ち,軽量で加 工しやすいアクリルを採用した.

フレームや土台の材質は軽くて加工がしやすいジェ ラルミンを採用した.モータは十分な力覚性能を出す ために maxon 社製の RE-max17 を採用した.この モータは小型ながら,最大で 14.5[mNm] のトルクを 提示することができる.このモータ8個をデバイスの 下部に配置した.

ストリングは8本伸びておりグリップと2本ずつの 4点で接続されている.その内2ペアはフレームの上 部に取り付けられたプーリを介して,上方よりグリッ プに接続され,残り2ペアはフレームの下方よりグ リップと接続される.

#### 3.3 SPIDAR-Iの特徴

SPIDAR-I は位置・姿勢計算および力覚提示の忠実 性確保と合わせて副次的な特徴を有している. 一つは 省スペース化である. 70[mm] のグリップに収まる様 に設計したため全体のサイズも 100[mm] 四方に収ま るサイズとなった. 従来の SPIDAR-G と比べると体 積にして約 27% に縮小され,手のひら大のパームサ イズのデバイスが実現した.

二つ目はストリングの絡みにくさである.SPIDAR-G はグリップから外側に向かってストリングが伸びて いるためユーザの手に触れてしまうことがある.それ によって,計測される位置・姿勢に誤差が生じる場合



図 6 SPIDAR-I 全体図 Fig. 6 Overview of SPIDAR-I



図 7 SPIDAR-I 試作機 Fig. 7 SPIDAR-I Prototype

もある. SPIDAR-I はグリップの可動範囲に制限はあ るもののグリップの内側に向かってストリングが伸び ているためユーザの手に触れることはなく操作するこ とができ,ユーザビリティが向上している.

# 4. SPIDAR-Iの評価

## 4.1 位置・姿勢計算精度の評価

SPIDAR-Iは、SPIDAR-Gを元に位置・姿勢計算の 忠実性確保を目的として設計された.そこで、グリッ プを移動させたときの忠実性を検証した.

#### 4.1.1 実験方法

SPIDAR を利用して,ストリングの長さから計算 した位置・姿勢と,図8に示す3軸並進ステージを用 いて測定した位置・姿勢を比較した.

実験は、SPIDAR のグリップに固定器具を取り付け、固定器具を取り付けたステージをハンドルで精密



図8 並進3軸ステージによる測定 Fig.8 Measured by three-axis translation stage

に並進移動させることで行った.また、回転について はステージを軸回りに1度ずつ動かすことで測定した。

#### 4.1.2 結果·考察

並進方向,回転方向について測定を行った.X軸の 結果を図 9,図 11 に,Z軸の結果を図 10,図 12 に示 す.グラフは横軸はグリップの実際の移動量,縦軸は SPIDAR-I および SPIDAR-G の計測した移動量であ る.なお,Y軸についても実験を行い,X軸と同様な 結果が得られた.

並進方向,回転方向の結果より,SPIDAR-I は SPIDAR-Gと比較して同等以上の忠実性があると言 える.

## 4.2 提示力分配計算精度の評価

位置・姿勢計算と提示力分配計算は双対の関係にあ る.位置・姿勢計算の忠実性が向上すれば提示力分配 計算の忠実性も向上する.そこで,提示力の忠実性に ついて検証した.

4.2.1 実験方法

グリップとロードセルをストリングで水平に繋ぎ, SPIDAR への提示力指令値とロードセルの測定値を SPIDAR-I・SPIDAR-G で比較する.ロードセルセン サは共和電業社製の LTS-2KA を使用した.

グリップはホームポジションに固定し,提示力指令 値を入力する.その際,グリップがホームポジション でつり合う様にストリングで引っ張りその張力をロー ドセルで計測する.今回はX軸方向に0.0[N]~2.0[N] まで0.4[N] 刻みで上昇させた値を計測した.

4.2.2 結果·考察

計測結果を図13に示す. グラフの横軸は指令値,縦 軸は出力値である. SPIDAR-I が実線, SPIDAR-G が点線で表してある.

図 13 の通り SPIDAR-G, SPIDAR-I と共に指令 値に近い値が出力されている.しかし, SPIDAR-G と比べて SPIDAR-I は出力値がより低くなっている.



その原因として SPIDAR-I のストリングはガイドや ヒートンなどによる摩擦の影響が考えられる.

## 4.3 タスク実験

SPIDAR-Iのユーザインタフェースデバイスとして の使いやすさを,被験者によるブロック操作の実験に より,SPIDAR-Gと比較して総合的に検証した.

#### 4.3.1 実験方法

被験者には、様々な形のブロックを箱に収納する タスクを行ってもらう.このタスクを SPIDAR-I と SPIDAR-G で行い、ブロックを箱に収めるタスクのタ スク完了時間とアンケート結果から評価する.ブロッ クを箱に収めるタスクは、SPIDAR-I と SPIDAR-G でそれぞれ 10 回行ってもらい、時間の短い2タスク と時間の長い2タスクを除いた6タスクの平均を用い る.また、アンケートでは5段階評価で下記にあげる 7項目について答えてもらう.

- グリップとブロックの挙動が一致するか(並進方向)
- グリップとブロックの挙動が一致するか(回転方向)



- 力覚に違和感がないか
- グリップは握りやすいか
- 手と糸の絡みは気にならないか
- デバイスの大きさは適当か
- 発振しても安全にデバイスを停止できるか

#### 4.3.2 結果·考察

本実験の被験者はあらかじめ操作に慣れてもらった 成人男性5人である.平均タスク完了時間のグラフと, アンケート結果を図15,16に示す.

タスク完了時間では、5人の被験者のうち2人が SPIDAR-Iの方が早く、3人がSPIDAR-Gの方が早 かった.全被験者の平均完了時間はSPIDAR-Iの方が SPIDAR-Gより約2秒遅かった.ただし、SPIDAR-Iに熟練している2名がSPIDAR-Iでのタスク完了 時間が短く、逆にSPIDAR-Gに熟練している3名が SPIDAR-Gでのタスク完了時間が短くなっているこ とから、平均2秒の差は重要でないと考えられる.

アンケート結果では, 位置・姿勢・力覚提示の評価で



国 13 徒示刀 Fig. 13 Display Force in X-axis



図 14 総合評価, ブロックを箱に収納するタスク Fig. 14 Total Evaluation, Task that Put Blocks in Box



は殆ど同様の結果が得られていることからハプティッ クインタフェースとしての基本的な性能は有している と考えられる.デバイスの大きさ,糸の絡みにくさ, 発振時の安定性では SPIDAR-I の方が高い評価を得 ている.

# 5. おわりに

位置・姿勢計算に関する最適化問題を解くことにより SPIDAR の最適構造を求めた.その結果,フレーム



図 16 アンケート結果 Fig.16 Questionnaire Results

とグリップの大小関係が逆転することが明らかになっ た.それに伴いグリップ形状を球形からリング状の円 筒形に変更することにより、新しい形のハプティックデ バイスを開発することができた.ストリングをグリッ プの内側に取り付けることにより、省スペースになり、 糸のからみ等の問題も大きく改善された.さらに、十 分な位置・姿勢精度、力覚精度、操作可能領域がある ことを実験的に示し、デスクトップ上のハプティック デバイスとしての可能性が大きいことを確認した.

# 参考文献

- 1) ForceDimension: "The Delta Haptic Device". http://www.forcedimension.com/.
- H.Iwata: Artificial reality with forcefeedback: development of desktop virtual space with compact master manipulator, *SIGGRAPH Comput.Graph.*, Vol.24, pp.165–170 (1990).
- 3) T.H.Massie: The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects, *Proc.* ASME Dynamic Systems and Control Division, Vol.55, pp.295–301 (1994).
- 赤羽克仁,小池康晴,佐藤 誠:安定性と忠実性 を両立させる高解像度力覚レンダリングの開発, 情処論, Vol.48, No.3, pp.1316–1325 (2007).
- 5) 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, pp.403-412 (2002).
- 6) 佐藤 誠,平田幸広,河原田弘:空間インタフエ-ス 装置 SPIDAR の提案,信学論 D-2, Vol.74, No.7, pp.887–894 (1991).