S153014

ストリング内蔵型ハプティックインタフェース SPIDAR-I の提案

小山 達也^{*1}, 五十嵐 達郎^{*1}, 赤羽 克仁^{*1}, 佐藤 誠^{*1}

Proposal of Inner Strings Haptic Interface SPIDAR-I

Tatsuya KOYAMA^{*1}, Tatsuro IGARASHI^{*1}, Katsuhito AKAHANE^{*2}, Makoto SATO^{*2}^{*1} Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology
R2-13 4529 Nagatsuta Midori Yokohama Kanagawa Japan

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

Key Words : SPIDAR, Haptic Device, User Interface

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可能になってきた。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。これらのデバイスは、手術や組み立てにおける訓練からエンターテインメントなど幅広い分野で使用されている。

1・2 研究目的

本研究では、ハプティックインタフェース SPIDAR⁽¹⁾を扱う。ハプティックインタフェースがよりリアルな感覚をユーザに与えるためには、位置・姿勢・力覚計算の精度を高くする必要がある。

ストリングを使用するという特性上、その配置・構造が忠実性に影響を与える。そこで、本研究では SPIDARの中で使われる機会の多い SPIDAR-G⁽²⁾をベースに、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 を提案する。

Fig 1 SPIDAR-G

^{*1} 東京工業大学 精密工学研究所 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-R2-13)
E-mail: {t_koyama@hi., t-igarashi@hi., kakahane@hi., msato@}pi.titech.ac.jp

2. SPIDAR システム

2・1 力覚提示装置 SPIDAR

SPIDAR は、アクチュエータとグリップをストリングでつないだ構造のデバイスである。そのシンプルな構造から、ストリングを張り替えるだけで力覚提示のスペースを任意に変化させることが可能である。しかし、ストリングの張力は一方向にしか発生させることが出来ないため n 自由度の力覚を提示する場合、 $(n+1)$ 本のストリングが必要である。

2・2 位置・姿勢計算方法

各ストリングの長さ l_i からエンドエフェクタの位置・姿勢を推定する計算を位置・姿勢計算という。以下に、位置・姿勢計算を示す。

m 個のセンサからの入力ベクトル $\boldsymbol{l}$ と力覚ポイントの位置・姿勢ベクトル $\boldsymbol{r}$ の関係は、一般に非線形の関係となる。

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

この複雑な非線形方程式を解く代わりに、式 (1) を時間微分して線形近似し、ヤコビアン行列（以下、ストリング行列 $\boldsymbol{M}$ と呼ぶ）を用いる。

$$\Delta \boldsymbol{l} = \boldsymbol{M} \Delta \boldsymbol{r} \quad (2)$$

式 (2) から計算される $\Delta \boldsymbol{r}$ を逐次足していくことによって力覚ポイントの位置・姿勢を求める。

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。各ストリングの張力ベクトル $\boldsymbol{\tau}$ と提示力 $\boldsymbol{F}$ （並進力、回転力）との間には次式が成り立つ。

$$\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{M}^T \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

3. SPIDAR-I の開発

3・1 SPIDAR-I の構造の導出

3・1・1 最適化の指標

位置・姿勢計算の式から最適な構造の指標を導く。位置・姿勢を求めるには式 (4) を解く必要がある。

$$\Delta \boldsymbol{l} = \boldsymbol{M} \Delta \boldsymbol{r} \quad (4)$$

しかし、式 (4) は通常、冗長な連立方程式であり、解は一意に定まらない。そこで、最小二乗法を用いると、

$$\boldsymbol{M}^T \Delta \boldsymbol{l} = \boldsymbol{M}^T \boldsymbol{M} \Delta \boldsymbol{r} \quad (5)$$

となり、冗長性は回避される。

Fig 2 Frame of SPIDAR-G

よって、解の計算の容易さは $M^T M$ (以下、対称化ストリング行列と呼ぶ) の性質に依存する。対称化ストリング行列の性質を知るために固有値に注目する。

固有値はそれぞれが各軸方向の並進・回転の忠実性の指標になることが分かっている。よって、今回は全ての固有値が偏りなく大きくなることを目指すので、評価関数を以下のようにする。

$$J = |M^T M|$$

$$= \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6 \quad (6)$$

3・1・2 パラメタの最適化

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が対称であることを考慮して、フレームの長さは図 2 のように X, Y 軸を $2D$, Z 軸を $2D_z$ に設定した。グリップの半径は R とする。以上、3 つのパラメタ D , D_z , R , をパラメタとする。

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ときがほとんどであるため、今回はグリップがホームポジションにあるときの評価関数を算出し最適化を行う。

これらのパラメタから、評価関数は以下ようになった。

$$J = \frac{(DD_z R)^3}{\{(D-R)^2 + D^2 + D_z^2\}^3} \quad (7)$$

この評価関数を最大化するとき、 R と D および R と D_z との関係は次のようになる。

$$\begin{cases} D = \frac{1}{2} R \\ D_z = \frac{\sqrt{2}}{2} R \end{cases} \quad (8)$$

3・2 SPIDAR-I の構成

設計された SPIDAR-I の全体図は図 3 のようになる。グリップは、可動領域を広くするためにリング状にした。外径はユーザが握りやすいとされる 70[mm] である。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。そのうち 2 ペアはフレームの上部と接続され、残りの 2 ペアはフレームの下部と接続される。フレームや土台の材質は軽くて加工がし易いジュラルミンを採用した。

3・3 SPIDAR-Iの特長

位置・姿勢計算の忠実性向上の他にも副次的なメリットが生じた。一つ目は省スペース化である。70[mm]のグリップに収まるよう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。二つ目はストリングの絡みにくさである。SPIDAR-Iは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、ユーザはストリングが手に触れることなく利用できる。

Fig 3 Overview SPIDAR-I

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・姿勢計算の忠実性向上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された位置・姿勢と、オプトトラックにより外部から測定された位置・姿勢を比較した。

X軸とY軸に関しては糸の配置が同じであるため等方向性が保たれる。よって、今回はX軸方向、Y軸方向について、ホームポジションから並進方向・回転方向に移動させた。

Fig 4 Coordinate system

4・1・2 結果・考察

並進方向X軸、回転方向X軸について測定した結果を図5、図6に示す。グラフは横軸はオプトトラックの計測値、縦軸はSPIDARの計算値である。

この結果から、SPIDAR-IはSPIDAR-Gと比べて遜色の無い忠実性があると言え、インタフェースとして十分使用可能であると思われる。

Fig 5 X axial translation

Fig 6 X axial rotation

5. おわりに

5・1 まとめ

本研究では、SPIDAR の位置・姿勢計算のアルゴリズムを元に、その精度を改善した新しい形のハプティックデバイスを開発した。十分な位置・姿勢精度、力覚精度により、ハプティックインタフェースとして利用できることを確認した。

5・2 今後の課題

ストリングの摩擦による力覚減衰が改善される配置を考える必要がある。また、今回はホームポジションでの最適化しか行っていないため、任意の位置・姿勢において忠実性が高くなるようなストリングの張り方を模索する必要がある。

文 献

- (1) 佐藤誠, 平田幸弘, 河原田弘, “空間インタフェース装置 SPIDAR の提案”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J74-D, No.7(1987), pp. 887-894.
- (2) 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)
- (3) 井上雅晴, 長谷川晶一, 金時学, 佐藤誠, “二次計画法を用いたワイヤ駆動型力覚ディスプレイのための張力計算アルゴリズム”, 日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文誌, pp.91-94, 2002.
- (4) F.P. Brooks, M. Ouh-Young J.J. Batter, P.J. Kilpatrick, “Project GROPE – Haptic Displays for Scientific Visualisation”, Proceedings of SIGGRAPH 90, 177-185.