

フレーム可動型両手多指力覚提示装置の フレーム制御に関する提案

丸山直紀¹⁾, 劉蘭海¹⁾, 田上想馬¹⁾, 赤羽克仁¹⁾, 佐藤誠¹⁾

本論文では技巧的操作が可能な両手多指ワイヤ駆動型力覚提示装置 SPIDAR-10 の回転式フレームを最適に制御する手法を提案する。SPIDAR-10 は両手 10 本の指を使って VR 世界にある仮想物体を操作することが出来る。左右の手に対して 1 つずつの円筒形フレームに片手の指 5 本分のワイヤ 20 本が張られる。そのため、両手を用いた複雑な操作を行う際にフレーム内のワイヤの干渉が問題となってしまう。干渉が起こると、操作者が違和感を覚えるだけでなく、指の位置姿勢推定の精度にも大きく影響するため、ワイヤの干渉低減が必須となる。

A Proposal for Controlling Frame of Two-handed Multi-finger Haptic Interface with Rotating Frame

Naoki MARUYAMA¹⁾, Lanhai LIU¹⁾, Soma TANOUE¹⁾, Katsuhito AKAHANE¹⁾ and
Makoto SATO¹⁾

We propose a method to optimally control a rotary frame of two-handed multi-finger wire driven haptic device SPIDAR-10 which makes technical operation possible. SPIDAR-10 enable users to manipulate virtual objects in a VR world with ten fingers of both hands. Twenty wires are tensioned for five fingers of one hand in each cylindrical frame of right and left hand. Therefore, the interference of the wires in the frame causes a problem when performing a complex operation by using both hands. If the interference occurs, the operator may feel not only uncomfortable but also affect a bad influence on the accuracy of the position and orientation estimation of fingers. So, it is necessary to reduce the interference of the wires.

1. はじめに

1.1 研究背景

計算機性能の向上により VR 空間のリアルタイムシミュレートが可能になってきた。それに伴い現実では失敗できない手術を仮想空間上で練習するための手術シミュレーション[1]や、複雑な機構や数多くの部品を持つ物体を効率的に組み立てるための組立トレーニング[2]など操作者の両手多指による複雑な動作を必要とする VR シミュレーションの需要も高まっている。この時、VR 空間において仮想物体に触れた際に現実空間で触れる時と同じ様に操作者の手に物体からの反力など力触覚が提示される事が重要となる。そこで、ユーザに反力を返すためのデバイスとして力覚提示装置が注目され研究が進められている。更に、VR 空間にて複雑な操作を実現するには複数の指を用いて操作を行う事から、多指型の力覚提示装置が必要とされる。

そのため、多指型力覚提示装置は広く研究が行われており、最近では“Multi-finger Haptic Interaction”[3]という多指型力覚提示装置を特集した学術書が発行される程である。しかし、多指による操作を実現するだけでは我々が現実世界で行うのと同じような操作を仮想物体に対して行うには不十分であると考えられる。例えば、キャップをはずす、ナットを回すなどの動作を行う際には指先の動きだけでなく手の捻り等、手の回転運動が必要とされる。そのため、手

の回転や捻りなどの手の動きに対応する事が必須である。

そのような背景から、本研究室では手の捻りや指先による細かい技巧的操作を可能とするフレーム可動型両手多指力覚提示装置 SPIDAR-10[4]が周東らによって開発された。

1.2 研究目的

SPIDAR-10 が目指す最終的な目的は、仮想空間において複雑な形状の仮想物体をまるで現実で操作しているかの様に精密に操作する事である。

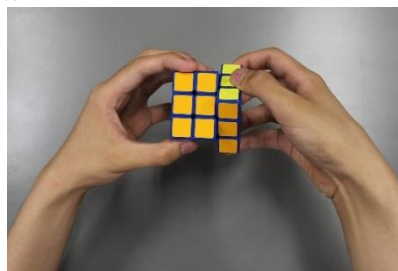


図 1. 片手での回転動作

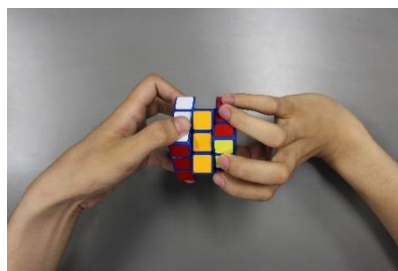


図 2. 両手での捻り動作

¹⁾ 東京工業大学 精密工学研究所
Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

しかし、図 1, 2 のような手の回転、捻り動作などを SPIDAR-10 を用いて実現するためには、手の周囲に張られるワイヤ同士の干渉を低減する必要がある。そこで、本論文ではワイヤ同士の干渉低減を実現する事でユーザが仮想物体を違和感無く操作するために、ユーザの手の動きに合わせてフレームを最適に制御する事を目指す。

1.3 関連研究

現在、様々な力覚提示装置が盛んに研究されているが、ここでは SPIDAR-10 が目指す技巧的操作を行うために必要となる多指型、そして SPIDAR-10 と同じように可動式フレームを持つ力覚提示装置に関して取り上げていく。対象となる力覚提示装置としては、Kawasaki らによって開発されている HIRO[5]、中河原らによって開発された遭遇型[6]、CyberGloveSystems 社によって開発された CyberForce[7]、Jorge Barrio らによって開発された MasterFinger[8][9][10]、そして本研究室で開発された SPIDAR-8[11]、SPIDAR-MF[12]がある。

HIRO は対向型のロボットハンドを用いた多指型力覚提示装置であり、ユーザはロボットハンドの各指の先端に自身の 5 本全ての指を装着して操作を行う。HIRO は提示できる力の大きさや方向が幅広く、力の応答性も低くない。しかし、対向型ロボットハンドの指先にユーザの指先を接続しているため、操作空間や操作時の手の姿勢がほぼ限定されてしまう。

遭遇型は外骨格機構を持つ多指型力覚提示装置である。デバイスの先端に取り付けられたプレートが、仮想空間中の物体に触れる位置に装置が先回りして配置させる事で触れた感覚を提示するものであり、他のデバイスと異なり指先への拘束感がないので接触感が良いが、接触しか提示できない。

CyberForce は各指先にワイヤを取り付けたグローブをロボットアームの先端に設置したデバイスである。操作空間が広く、手の姿勢の自由度も高い。しかし、装置自体が持つ慣性のために力の応答性にはやや遅延があり、またグローブを装着するため拘束感が強い。

MasterFinger は 2, 3 本の指を用いて仮想物体を操作するためのモジュラデバイスである。このデバイスは元々片手の指を用いて仮想物体を掴むなどの操作を行うためのものであるが、装置を 2 つ用意する事で両手に対応する事ができる。しかし、この装置はシリアル/パラレル機構を有するためユーザの手の姿勢を制限してしまう可能性がある。

そして、我々の研究室では”SPIDAR”と称される様々なタイプのワイヤ駆動型力覚提示装置が開発されてきた。最初の SPIDAR は単純に”SPIDAR”[13]と呼ばれ、1 本の指のみに力覚提示を行う事が可能であったが、長年の研究により多指型の SPIDAR が開発された。ここでは、代表的な多指型 SPIDAR に関して述べる事とする。

SPIDAR-8 は本研究室における最初の両手多指力覚提示装置である。SPIDAR-8 は、図 3 に示すようにユーザの両手の親指から薬指までの 8 本の指を用いて直接仮想物体を操作することができる。図 4 に示す様にモータに繋がれた糸の終端に指を装着するためのキャップがあり、ユーザは自身の 8 本の指をキャップに装着して操作を行う事となる。この SPIDAR-8 を用いる事で複数の指に対して正確な動きが要求されるタスクを行う事ができる。加えて、SPIDAR-8 は僅かな手の回転には対応する事ができるため、ルービックキューブを少しずつ回すような僅かな回転動作を仮想物体に対して行う事ができる。更に、SPIDAR-8 は力の応答性に優れ、操作空間も狭くない。しかし、提示できる力の方向が限定されており、また糸が絡まってしまうため手の大きな姿勢変化には弱い。

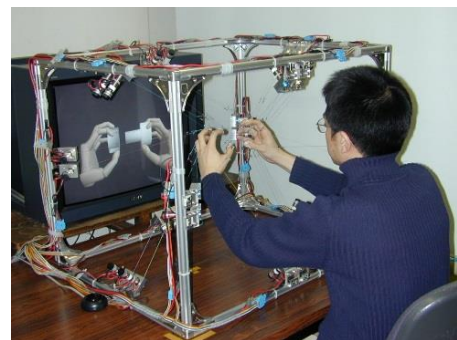


図 3. SPIDAR-8

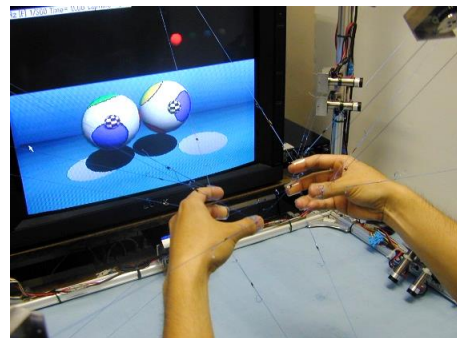


図 4. 8 個の指接続用キャップ

SPIDAR-MF は、回転可能なフレームを有する片手多指型力覚提示装置である。図 5 に示すフレームが図 6 の様に回転するため、把持した物体の裏側を見るために手首を返す動作が可能である。加えて、片手のみであるが 5 本の指を用いて仮想物体を操作でき更に手首を返す動作も可能である事から、片手における操作性の面では SPIDAR-8 よりも優れていると考えられる。しかし、片手のみの構成となっており、このデバイスを 2 つ用意して両手操作を可能にしたとしてもフレームの回転方向の関係からデバイスの設置間隔が開いてしまい、ユーザの手の姿勢が制限されてしまう。

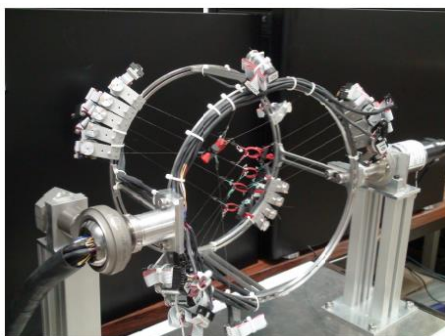


図 5. SPIDAR-MF

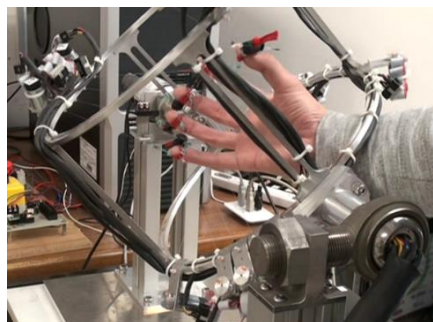


図 6. フレームが回転する様子

2. フレーム可動型力覚提示装置 SPIDAR-10

2.1 装置構成

2.1.1 デバイス概観

SPIDAR-10 は 2 つの円筒形の回転式フレームを有する構造となっている。それぞれのフレームは滑車によって固定フレームと接続されており、フレームに接続された DC モータを用いて 1 軸方向に回転させる事が出来る。それぞれのフレーム内にはモータが 20 個配置されており、4 本のワイヤに繋がった指を接続するためのキャップが 5 つあり、これで片手 5 本の指の位置推定及び力覚提示を行っている。

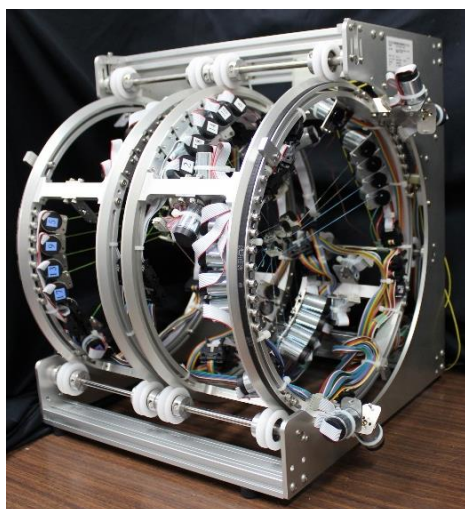


図 7. SPIDAR-10

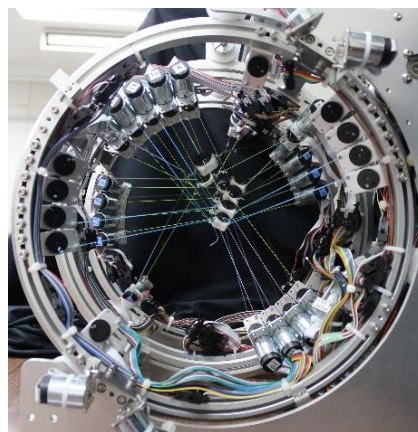


図 8. 5 個の指接続用キャップ

2.1.2 モータ配置

SPIDAR-10 は 1 つのフレームにつき 20 個のモータを搭載しておりモータは対称に配置されているため、ここでは右手用のフレームに関するモータ配置のみを取り上げる事とする。ただし、ここで取り上げているモータの配置は実際にはモータマウント上にあるワイヤ中継点の位置を測定したものであるが簡便のためにモータ配置と称している。

まず、モータ配置座標を表すために、回転式フレームにおける座標系をローカル座標系と称し、図 9 の様に設定した。この時、座標系原点は円筒形フレームの中心部に位置している。同時に、回転式フレームの回転角の原点と正の回転方向も図に示した。なお、時計回りの方向が正の回転方向となっている。

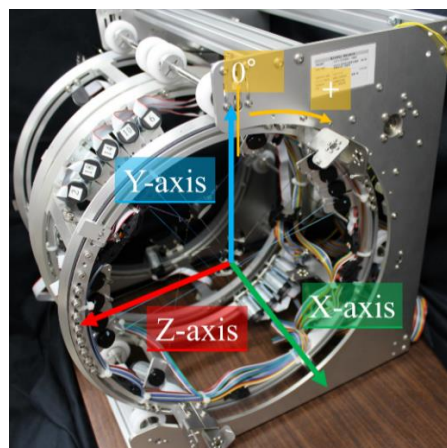


図 9. ローカル座標系軸とフレームの正の回転方向

次に、全ての指に対して力覚提示領域を最大化し、かつワイヤ同士の干渉を低減するようにモータ配置を行った、モータ配置結果を図 10 に示す。なお、SPIDAR-10 に関しては 1 つの指キャップに 4 個のモータと 4 本のワイヤが接続されたものが 1 セットとなっており、モータ 1 から 4 までは親指、モータ 5 から 8 までは人差し指、モータ 9 から 12 までは中指、モータ 13 から 16 までは薬指、モータ 17 から 20 までは小指に接続されている。



図 10. モータ配置とモータ番号

モータ配置後，フレーム回転用モータのエンコーダを用いてモータ配置角度を求めた．更に，その配置角度を用いてローカル座標系におけるモータの配置座標を求めた．表 1 にモータの配置角度を θ ，座標を X, Y, Z で示す．

この時，X, Y, Z 座標はローカル座標系原点からモータマウント上にあるワイヤ中継点までの距離を表しており，X 座標はそれぞれ ± 49 ミリメートル，Y, Z 座標はモータの配置角度と半径から算出することができる．その半径は円筒形フレームの中心からワイヤ中継点までの距離で 131 ミリメートルとなっており，ここでは r で表す事とする．以上より，ローカル座標系におけるモータの Y, Z 座標は以下のように表す事ができる．

$$MotorPosY = r \cos \theta \quad (1)$$

$$MotorPosZ = -r \sin \theta \quad (2)$$

表 1. X, Y, Z 及び θ で表したモータ配置座標

Motor No.	X	Y	Z	θ
1	49	127.33	-30.80	13.60
2	49	-102.21	81.94	218.72
3	-49	88.51	96.58	312.50
4	-49	95.33	-89.85	43.30
5	49	94.40	-90.83	43.90
6	49	40.72	124.51	288.11
7	-49	129.36	20.69	350.91
8	-49	-80.22	-103.56	127.76
9	49	77.74	-105.44	53.60
10	49	15.78	130.05	276.92
11	-49	123.76	42.94	340.87
12	-49	-95.64	-89.52	136.90
13	49	57.89	-117.52	63.78
14	49	-9.76	130.64	265.73
15	-49	115.57	61.68	331.91
16	-49	-108.71	-73.09	146.08
17	49	39.21	-125.00	72.58
18	49	-34.93	126.26	254.53
19	-49	104.04	79.61	322.58
20	-49	-118.32	-56.23	154.58

2.2 システム構成

SPIDAR-10 の制御システムはデバイス本体，SPIDAR システム制御用コントローラ，フレーム制御用コントローラ，物理シミュレーション・SPIDAR 及びフレーム制御計算用の PC から成る．まず，SPIDAR-10 本体に取り付けられた各種モータのエンコーダ信号が各種制御用コントローラにてカウントされ，カウントされた数値は USB を通して PC に送信される．この情報を基に，操作者の指先の位置とフレームの回転角度が計算される．次に，計算された指先位置を基に物理シミュレーションの世界とのバーチャルカップリングを行い，指先への提示力が計算される．その提示力に対して張力分配計算を行う事で，力覚提示に必要な各モータの張力を求める．更に，この時点でのフレームの回転角を用いてフレームを制御するための計算を行い，フレームの回転を行う．最後に，SPIDAR 制御用コントローラを通して各モータから張力を出力させる．

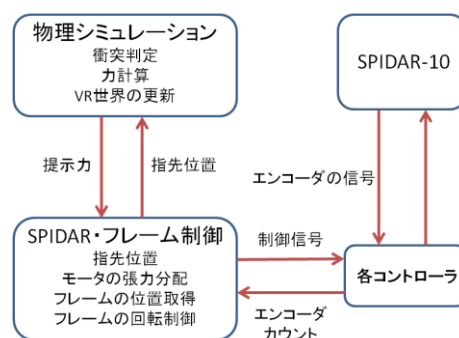


図 11. システム構成

3. フレーム制御

3.1 フレーム制御に関する提案

SPIDAR システムでは，張られているワイヤの長さが短い方が指先のポイントがホームポジションに近くなり，位置推定や力提示の精度が高くなり易い傾向にある．また，ワイヤの長さが短い分干渉も起こりづらいと考えられる．

図では，ある状態の時のフレーム（太線の円），指キャップ（黒丸），そして張られている 4 本のワイヤ（細線）を示している．なお，簡便のために指 1 本分の場合を示しているが，実際は全ての指に対して行う．この状態から，操作あるいはデバイスの力提示などにより，指キャップのみが移動したとする．このとき，図中に矢印で示したワイヤの張られている長さが伸び，4 本のワイヤの長さの総和も大きくなる．そこで，フレームを回転させることでモータの配置，つまりワイヤの中継点を移動させることで，張られているワイヤの長さの総和を小さくする．

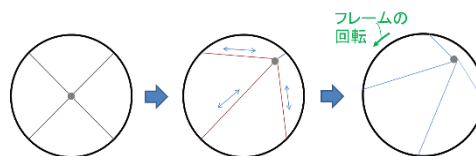


図 12. フレーム制御の流れ

このアルゴリズムに用いる座標系の説明を行う。フレームの回転の影響を受けないグローバル座標系を ΣG 、回転式フレームのローカル座標系を ΣL とする。

次に、アルゴリズムの計算に用いる変数の説明を行う。変数の左上つき添字はその変数が属する座標系を表すものとする。まず、指キャップの本数を C とし、一つのキャップに繋がったモータ数を M とする。次に、グローバル座標系に属している指先の位置は Gp_i ($1 \leq i \leq C$)、ローカル座標系に属しているモータのワイヤの出し口の位置は Lw_{ij} ($1 \leq i \leq C$)、($1 \leq j \leq M$)で表すことができる。

座標系に関して、今回はグローバル座標系原点 OG が回転式フレームの中心に位置し、ローカル座標系原点 OL も OG と同じ位置にあるとする。ただし、フレームの回転によりローカル座標系は X 軸方向に回転するためフレームの現在の回転角を θ として、ローカル座標系からグローバル座標系への座標変換のための回転行列を次の様に定義する。

$${}^G R_L(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

この回転行列とローカル座標系におけるワイヤ出し口位置を用いて、グローバル座標系におけるワイヤの出し口位置を次の様に定義する。

$${}^G w_{ij} = {}^G R_L(\theta) {}^L w_{ij} \quad (4)$$

次に、一つの指キャップに繋がったワイヤの長さの総和を求める。ワイヤの長さは、指先とワイヤの出し口の間の距離と等しい。そのため、指先の位置 Gp_i 、回転後のワイヤの出し口位置 Gw_{ij} を用いると一つの指キャップに繋がったワイヤの長さの総和を次の様に求める事が出来る。

$$Wirelen_i(\theta) = \sum_j^M \| {}^G p_i - {}^G w_{ij} \| \quad (5)$$

次に、全ての指キャップに対して総和をとる事で、ワイヤの長さの総和を求める事が出来る。

$$TotalWirelen(\theta) = \sum_i^C Wirelen_i(\theta) \quad (6)$$

最後に、微小回転角度を d とした時フレームの回転目標角度 ω として回転角度 θ 、 $\theta + d$ 、 $\theta - d$ のうち、上記関数を最小化するものが選ばれる。

$$\omega = \arg \min_{\theta' \in \{\theta, \theta+d, \theta-d\}} TotalWirelen(\theta') \quad (7)$$

このアルゴリズムが、それぞれ片手5本の指に対して実行され、これによりワイヤの長さの総和をより小さくするように、常にフレームが回転することとなる。

3.2 フレーム制御に用いるモータの性能測定

フレーム駆動用モータにはマクソン社製のDCモータRE-max29、その制御には同社製のコントローラEPOS2 24/2を用いている。最大連続トルク時の回転数が7680rpmであるRE-max29に、今回は減速比23:1のギアヘッドを取り付けており、またブリーとフレームの径の比が約1:12.5であるため、配線の引き回しやモータの重量、非対称なフレーム構造およびモータ配置による偏心荷重などを考慮に入れない場合、フレームを約26.7rpmで回転させることができると計算される。

まず、フレームの回転性能の評価を行った。初期位置から、それぞれ 10° 、 20° 、 30° 、そして 45° を目標値として駆動した際のフレームの角度推移を図13に示す。時間軸の0msの瞬間にそれぞれの目標角度が与えられ、その目標角度になるまで予め設定された最高速度、加速度、減速度に従ってモータを駆動している。なお、設定した最高速度は用いたモータの最大連続トルク時の回転数である7680rpmであり、加速度および減速度は7680rpm/sである。これらの際、立ち上がり時間はそれぞれ順に約0.20、0.29、0.35、0.44秒であり、いずれも1秒未満で目標角度にほぼ誤差なく到達している。

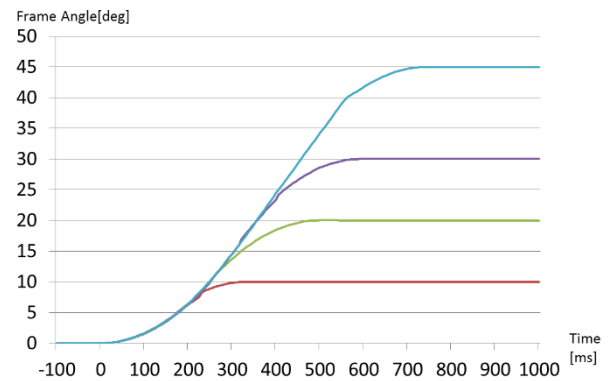


図13. 目標角到達までの推移

次に、目標角度を 90° とした時の、目標角度に達するまでのフレームの回転速度を計測した。その結果を図14に示す。

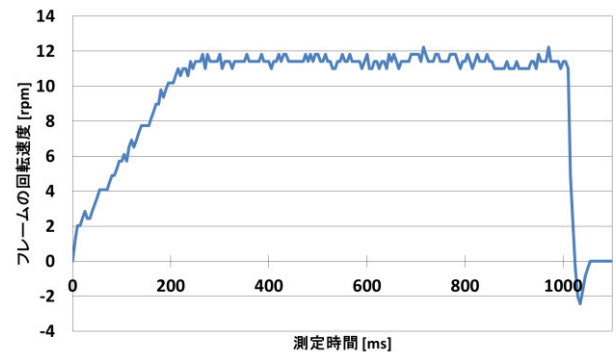


図14. 回転速度計測

目標の 90° に達するまで約 1 秒かかっており、最高速度は約 12rpm であった。その際のモータの回転速度は最大で約 3500rpm であり、実験環境において最高速度に設定した値であるデータシートに記載されている最大連続トルク時の回転数の 7680rpm の半分以下という結果となっている。この結果は、前述したモータ重量やフレーム構造及び偏心荷重によるものと考えられる。

4. 位置推定精度の評価

ここでは、SPIDAR-10 の位置推定精度の評価を行う。なお、今回は SPIDAR-10 のフレームを 0 度に固定した場合における位置推定精度を評価した。

4.1 実験方法

以下の様な測定装置を構成した。

測定装置は、EdmundOptics 社製 XYZ ステージをミスミ製金属部品に取り付けて測定を行った。なお、XYZ ステージの先端に 3D プリンタで作成したワイヤ接続点を設置し、ワイヤを一点に接続させている。

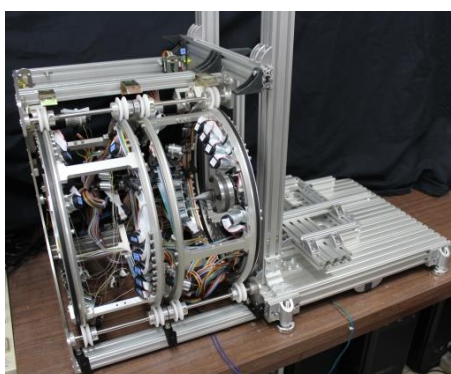


図 15. SPIDAR-10 及び測定装置

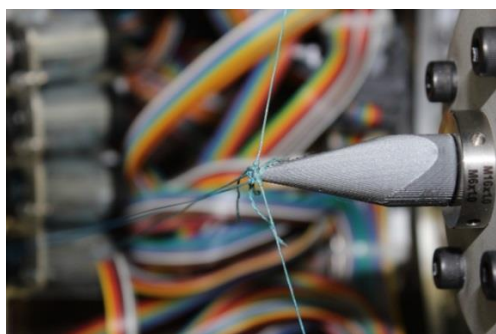


図 16. XYZ ステージ先端ワイヤ接続点

そして、XYZ ステージを SPIDAR-10 の座標系原点から各軸正負の方向に 20 ミリ動かし推定値との誤差を取得する。そして、この動作 5 回分の平均をとった。

4.2 結果・考察

表 2：フレーム静止時における位置推定誤差 [mm]

方向	親指	人差指	中指	薬指	小指	平均	平均
X+	1.00	1.41	1.20	1.29	1.10	1.20	1.04
X-	0.98	0.97	1.01	0.52	0.89	0.88	
Y+	1.66	0.41	1.01	0.64	0.53	0.85	0.71
Y-	1.12	0.57	0.32	0.41	0.48	0.58	
Z+	0.47	1.00	1.07	0.92	0.90	0.87	0.84
Z-	0.32	1.13	0.80	1.05	0.77	0.82	
平均	0.93	0.92	0.90	0.81	0.78	0.87	

表 2 より、全ての軸方向で 1 ミリ程度の位置推定誤差が生じ、Y 及び Z 軸方向に比べて X 軸方向の誤差が大きい結果となったことが分かる。この理由として、X 軸方向は Y,Z 軸方向に比べてモータ配置間隔が狭くなっている事が挙げられる。

SPIDAR の指先の位置計算は逐次近時を用いて計算をしており、ワイヤの長さの変化量から位置の微小な変化分を求め、その変化分を前回の位置に加えて現在位置を算出している。そのため、モータ間隔が狭い場合は移動時におけるワイヤ長の変化量が平均的に低くなるため位置精度も悪化する。

以上の理由により、軸方向は他の軸に比べて誤差が比較的大きいものとなった。

5. 提案手法の評価

5.1 実験方法

SPIDAR-10 に指を装着した状態で手を約 0° から約 30° まで回転させる動作を 10 回行い、フレームの回転制御を行った時と、行わなかった時におけるワイヤの総長の変化を測定し、平均値を求めた。

5.2 結果・考察

実験により、以下のような結果が得られた。横軸は測定時間、縦軸はワイヤの総長の変化を表しており、赤線はフレーム回転制御を行ったときの变化、青線は行わなかったときの变化を示している。なお、図中のエラーバーは標準偏差を示している。

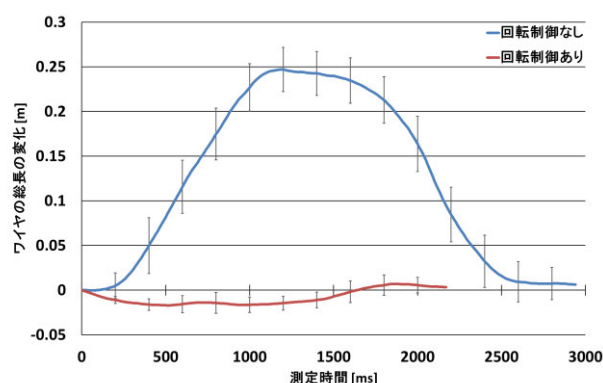


図 17. 提案手法の有無によるワイヤの総和の変化

図 17 の計測結果から、フレームの回転制御無しの場合にはワイヤの総長が大きく増え、ありの場合はほとんど変化していないことが分かる。

回転制御を行わなかった場合はワイヤの総長が最大約 0.25 メートル増加してしまい、更に手の回転によってワイヤ同士が絡んでしまった。しかし、回転制御を行った場合はワイヤの総長の変化が最大約 0.017 メートルに抑えられ、フレームが回転する事でワイヤ同士の干渉も抑えられていた。

図中の回転制御を行った場合のワイヤ総長は、手の回転が 30° に近づくにつれて減り、0° に戻るにつれて増えるような挙動を示している。これは、測定を行うときに手がデバイスの中心に完全には位置しておらず、手が回転する事で逆にデバイスの中心に近づいたためと考えられる。更に、フレームを回転させたときに最適角度よりも行き過ぎてしまった場合は、更にそこから最適角に向けて回転を行うため、図中の 400～1200 ミリ秒における測定結果のように多少の振動が起ることとなる。

今回の測定では手や指の位置の固定が完全には行われていなかったために測定回数を重ねるごとに微妙に位置が変化し、得られるデータにも影響が出ていると考えられる。そこで、取得した 10 回の実験データのばらつきを調べるために、各グラフの標準偏差の平均値と最大値を求めた。表 3 に結果を示す。

表 3. 各グラフの標準偏差の平均値と最大値

回転制御	平均値	最大値
なし	0.025	0.031
あり	0.008	0.012

表 3 より、得られた実験データの値のばらつきは、回転制御無しの場合は 0.03 程度、有りの場合は 0.01 程度と低い値に抑えられていることが分かる。これにより、得られた 10 回分の実験データのばらつきが少なく、実験データが信頼の置けるものであると言える。

以上より、提案手法を用いてフレームを回転制御する事でワイヤの総長を最小に近づけることが出来ており、またワイヤ同士の干渉の低減が実現されたと言える。

6. 今後の課題

ワイヤ同士の干渉低減が実現されてはいるが、フレームの回転制御によって起こる振動や微量のワイヤ干渉などの問題が残っている。そのため、今後もフレームの最適な回転制御に関する検討を行っていく。

参考文献

- 1) P.Wang, A. A. Becker et al: A virtual reality surgery simulation of cutting and retraction in neurosurgery with force-feedback; Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 84, Issue 1, pp11-18, October, 2006.
- 2) B. Chen and T. Yang: Researches on Immersive Virtual Maintenance Assembly and its Key Technologies; ISISE '08, pp254-257, December, 2008.
- 3) Ignacio Galiana, Manuel Ferre: Multi-finger Haptic Interaction; Springer-Verlag London, 2013.
- 4) 周東正高, 赤羽克仁, 脇田航, 田中弘美, 佐藤誠, “技巧的操作が可能なハプティックインタフェースの提案”, 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.143-146, 2012.
- 5) T. Endo, H. Kawasaki, T. Mouri, Y. Ishigure, H. Shimomura, M. Matsumura, K. Koketsu: Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III; Proc. of WorldHaptics 2009, pp.458-463, 2009.
- 6) Syuhei Nakagawara, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi and Ichiro Kawabuchi: An Encounter-Type Multi-Fingered Master Hand Using Circuitous Joints, ICRA2005.
- 7) CyberForce, CyberGlove-Systems, <http://www.cyberglovesystems.com/products/cyberforce/overview>
- 8) Jorge Barrio Gragera: Control Architecture for Multifinger Haptic Devices Applied to Advanced Manipulation, Technical University of Madrid, PhD Thesis, 2011.
- 9) Mary Monroy, Maria Oyarzabal, Manuel Ferre, Alexandre Campos and Jorge Barrio: MasterFinger: Multi-finger Haptic Interface for Collaborative Environments, Euro Haptics 2008, LNCS 5024, pp411-419.
- 10) Jose Brenosa, Pablo Cerrada, Manuel Ferre and Rafael Aracil: Design Of An Ergonomic Three-finger Haptic Device For Advanced Robotic Hands Control, Proc. Of WorldHaptics 2011, pp.257-262, 2011.
- 11) Somsak WALAIRACHT, Yasuharu KOIKE, Makoto SATO: A New Haptic Display for Both-Hands-Operation: SPIDAR-8, ISPADS'99.
- 12) 赤羽克仁, 高見豪, 佐藤誠: フレームの可動機構を持つワイヤ駆動多指型ハプティックインタフェースの開発; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 441-448, 2011.
- 13) Y. Hirata and M. Sato, “3-Dimensional Interface Device for Virtual Work Space”, Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on IROS, 2, pp. 889-896, 1992.