

両手協応操作型インタフェース ～指示棒操作に関する実験システムの開発～

多胡 尚[†] 上杉 繁^{††}

協応とは複数の運動が相互補完して運動課題を達成することであり、本研究では両手で協応操作するインタフェースのデザインについて検討することにした。そこで、協応動作として筋-骨格系の動作原理に着目し、指示棒の両側に取り付けた弾性ワイヤを両手で協応操作して、指示棒先端位置を自在に操作する実験的インタフェースシステムを開発した。本システムは、三軸可動ジョイントを有する指示棒、両手の三次元位置姿勢計測システム、ポインティングタスク用ディスプレイ、処理ソフトウェアから構成される。そしてポインティングタスクにおける両手協応操作の特徴を明らかにするため、両手で操作するワイヤと指示棒間の張力、およびその角度の変化について解析する方法について検討した。

Bimanual Coordinated Manipulation Interface — Development of an Experiment System for Manipulating a Pointing Stick —

Hisashi Tago[†] and Shigeru Wesugi^{††}

A “coordination” is defined as an achievement of a motor task by integrating multiple motions in a mutually complementary manner. In this study, authors focused attention on an operating principle of a muscular-skeletal system as a coordinated activity, and developed an experimental interface system that people manipulated a pointing stick with both hands by moving an elastic wire connected to each side of the stick. The interface system is composed of a stick with 3 DOF rotary joint, a 3D motion tracking system for both hands, a screen and software for displaying a pointer and targets in a pointing task. And authors studied an analysis method of calculating the tensional force and the angle between the pointing stick and the wire people pulling with each hand in order to reveal features of the bimanual coordinated manipulation.

[†] 早稲田大学大学院創造理工学研究科
Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University

^{††} 早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

1. はじめに

日常生活において我々は、両手を協調的に使用して道具や対象物を操作し、様々な作業を行っている。例えば、ハサミで紙を切る際には、左手には紙、右手にはハサミを持ち、紙は固定したままハサミの両刃を開閉させて切断する場合や、刃を開閉のみさせて紙の方を回転・移動させる場合、あるいは紙とハサミを同時に動かす場合など、両手の動きを巧みに一致させながら紙を切るという作業を行う。このような、複数の身体部位が一つの目的を果たすために相互補完的に動くことを協応と呼ぶ。さらに、両手が協応して作業している場面を検討する。上述した紙をハサミで切る場面では、ハサミの開閉、ハサミの移動、紙の移動という動作を、すべて同時に行う場合や、紙かハサミのいずれか一方のみを移動する場合などを自在に組み合わせながらも、左右の手は紙とハサミの接触という物理的な拘束状態によって関係が保たれている。両手の協応操作において、この物理的な拘束がより強くはたしている例としては、自動車のハンドル操作があげられるが、ハンドルという剛体を介して左右の手の動きが関係するため、片手だけでも動かすことは可能であるが、より安定した操作や、左右に大きく回す時には協応動作が現れる。

また、両手の協応作業に着目したインタフェースに関する研究として、例えば、佐藤らは、『SPIDAR-G』というフォースフィードバック型の装置を両手で操作して仮想空間内でポインティングタスクを行い、片手がマウスである場合やキーボードである場合との比較を行っている[1]。また、今宮らは片方の手でマウス、もう片方でスペースボールを操作して仮想空間内での両手協調作業の特徴を左右の手の役割という観点から分析をし[2]、井上らは、操作者に手袋型インタフェースを両手に装着させ、ヒューマノイドロボットの両手動作を行わせている[3]。これらの研究は、仮想空間内や遠隔のロボットにおいて、効率的な両手作業を支援するためのインタフェースを目指している。一方本研究では、上述した例のように、両手間における物理的な拘束条件に焦点をあて、この関係を変化させることによる両手協応操作型のインタフェースのデザインについて検討する。そこで、両手の協応操作によって指示棒を動かす実験的なインタフェースを開発し、その特徴をとらえるための解析方法について検討した。

2. 両手の協応操作モデル

2.1 Bernstein のレバー操作モデル

両手で協応操作するインタフェースを考案する上で、協応的に動作している事例として人間の関節に着目した。例えば人間の肘関節においては図1に示すように、上腕二頭筋と上腕三頭筋における収縮と伸長の組み合わせによって、前腕の伸展・屈曲運動を行い、手先の位置を調整する。さらに筋肉には弾性があるため、その制御は複雑である。そのような関節の組み合わせが冗長自由度を持った協応動作をすることで、

様々な環境に柔軟に対応して手や足などを自在に動かすことが実現できる。

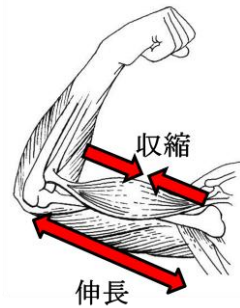


図 1 筋-骨格系の動作原理 (Wikipedia : <http://ja.wikipedia.org/wiki/>より引用)

本研究では、先の章で述べたように、左右の手が物理的な拘束関係を保ちながら対象を操作するという点で、伸縮する筋肉を左右の手の動き、前腕を指示棒と見立てた Bernstein のレバー操作モデルに着目した。Bernstein は、図 2 に示すモデルを使って、筋肉の協応運動の複雑さを説明している[4]。下記にその説明箇所を引用する。

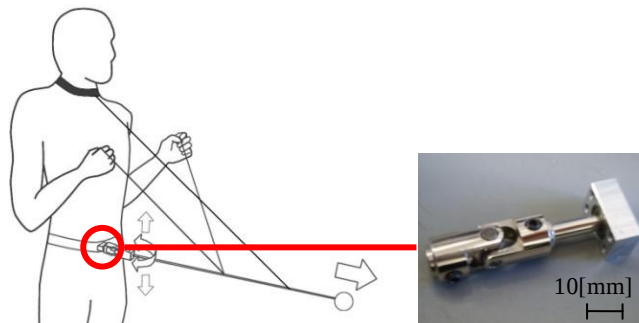


図 2 レバー操作モデル

『図のように、端におもりをつけたシャフトをベルトにとりつけよう。そのおもりに二本の長いゴムひもをつける。ゴムひもの片端を手にとり、おもりを正確に動かしてみよう。たとえば、空中に四角形を描いたり、自分のイニシャルを描いてみればいい。すぐにその課題がどんなに難しいか、おもりの動きがどれだけ不正確か、それがいかにでたらめな動きをするかが分かる。では次に、目を閉じておもりを見ずにどこまでうまく制御できるか他の人に見てもらおう。きっとあなたは惨憺たる結果にがっかりするだろう。』(「デクステリティ 巧みさとその発達」42 ページより引用)

2.2 レバー操作モデルの試作

本研究ではこのモデルの、『おもりの重さやゴムの弾力を変えることで、操作の難

易度が大きく変化する』という特徴、すなわち、錘やゴムを変更することによる慣性モーメントや弾性係数、可動範囲などの物理的な拘束条件を自在に調整可能であることに着目し、まずは Bernstein のレバー操作モデルを再現したモックアップを製作した。使用するシャフトはポインティングタスクを行うための指示棒とし、長さ 1000[mm] のアルミ棒の先端に錘を付け、逆端を操作者のベルトバックル部に取り付けた。その取り付け部は、指示棒の先端を自在に動かすために、図 2 に示すようにユニバーサルジョイントとベアリングブロックを組み合わせたことで、三自由度(Pitch, Roll, Yaw)で回転する。製作したモックアップを被験者が装着し、実験者に指示された箇所を指示棒の先端で指す、先端位置の移動軌跡で空中に字を描く等の操作を行ったところ、Bernstein が指摘したような操作の困難さを確認した。そこで、この困難さや、両手協応操作の特徴について調査するための実験システムを構築することにした。

そのためには、指示棒の両側に取り付けた弾性ワイヤを両手で協応して操作するという、このモデルの特徴を考慮した上で、指示棒の先端位置と操作する両手の挙動を時系列データとして記録する必要がある。また、指示棒は操作者の体に密着している必要があるが、操作によって根元のブレが起こることを防がなければならず、指示棒と操作者の位置関係を一定にしておく構造も必要であると考えられる。

以上をふまえ、両手協応操作型インタフェースにおける実験システムを開発した。

3. 両手協応操作型インタフェースの開発

3.1 システム開発

2 章で説明した機能を実現するために開発した実験システムは、三軸可動ジョイントを有する指示棒、両手の三次元位置姿勢計測システム、ポインティングタスク用ディスプレイ、処理ソフトウェアから構成される。

最初に、図 3 に示す三軸可動ジョイントを有する指示棒については、操作感覚に強く影響する慣性モーメントが調節できること、弾性ワイヤを任意の箇所に取り付け可能であること、指示棒先端が自在に可動できること、指示棒の移動量をリアルタイムで計測可能であることを考慮した。そのため、指示棒の先端には様々な質量の錘をはめることを可能とし、指示棒の任意の位置に弾性ワイヤ（ゴム紐など）の端を留めるフックを取り付けることができる。そして根元は三軸ジンバル機構に接続し、各回転軸上に小型のロータリエンコーダを組み込んだことで、表 1 に示すような可動領域において移動量を計測できる。このジョイント機構は、実験中に被験者が座る椅子の全面中央部のフレームに取り付けた。このフレームは、被験者の着席・離席の際には自由に取り外すことが可能である。三軸のロータリエンコーダは、エンコーダカウンタとしてのモータコントローラ (iXs 社製、iMCs01) を介して、記録・計算用の PC に送信される。

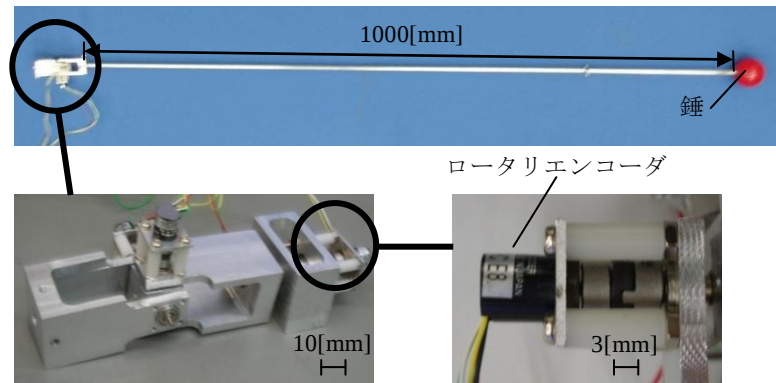


図 3 三軸可動ジョイントを有する指示棒

表 1 可動ジョイント仕様

可動域	ピッチ, ヨー 180[deg] ロール 360[deg]
質量	55[g]
計測精度	0.25[deg]
許容最高回転数	6000[rpm]
慣性モーメント	$I_y=21050[g \cdot mm^2]$ $I_z=19440[g \cdot mm^2]$

次に、両手の三次元位置姿勢計測については、市販の三次元位置センサシステム（Polhemus 社製、Fastrak）を使用し、左右の手が移動する範囲内で測定することができる。原点となるトランスミッターは木製のフレームに取り付け、操作者が座る椅子に固定した。手の三次元位置を検出するレシーバは左右の手で一つずつ把持する木製の柄に取り付けた。この柄の先端には、指示棒に取り付けた弾性ワイヤの端を取り付ける。また、実験を始めるときには、原点を一致させるためにこの柄に取り付けたボルトを、指示棒のジョイントが取り付けられたフレーム上に設けられた穴に差し込むようにした。

続いて、ポインティングタスク用ディスプレイ・処理ソフトウェアは、計測されたジョイントの回転位置（ θ_p , θ_y , θ_r ）と弾性ワイヤを操作する両手の三次元位置姿勢（ X_s , Y_s , Z_s , θ_{azi} , θ_{ele} , θ_{rol} ）の値をまとめてコンピュータ内に記録し、指示棒の先端の動きと一致して二次元平面上を動くポインタ（ X_d , Z_d ）をリアルタイムでディスプレイ内に表示する。このポインタは、被験者からは指示棒先端延長上に一致する

ように、事前に計測したディスプレイと着座位置の空間的な位置関係を考慮して計算している。そして、指示棒の動きに連動したこのポインタを動かすことで、被験者はディスプレイ上に現れるターゲットを指し示すなどの様々なタスクを行うことが可能である。また、別の小型ディスプレイには実験者が操作する実験操作 GUI を表示し、データの記録や閲覧、タスクの設定などを行う。ポインタの座標、両手の座標は時系列データ（サンプリングレート 0.02 秒）で記録した。実験システムの構成図を図 4 に示す。

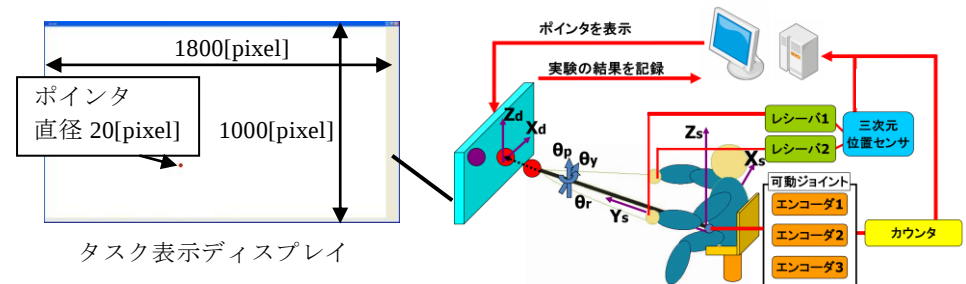


図 4 実験システム構成図

3.2 ポインティング実験

両手協応操作型インタフェースの特徴について調査するため、ディスプレイ上に表示されるターゲットに指示棒と連動して動くポインタを一致させるポインティングタスク実験を行った（被験者は 20 代の男性 8 名、いずれも初めての使用）。実験の様子（ディスプレイ内はイメージ）を図 5 に示す。

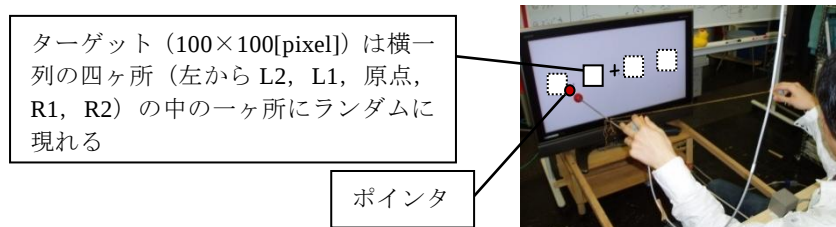


図 5 ポインティング実験イメージ

ターゲットはディスプレイの中央を横切る線上の四ヶ所中のいずれかに提示される。ポインタがディスプレイ中央の原点ターゲット内に安定した状態で実験は始まり、提示されたターゲットにポインタを移動して合わせ、2 秒間そのターゲット上で静止すると、原点にターゲットが提示される。そして、2 秒間原点にポインタを静止できた後に、次のターゲットが提示される。1 回のタスクにつきこれらの試行を 20 回繰り返す。なお、実験を行う前に操作の練習として同様の試行を 5 回行っている。

今回の実験では、荷重-伸びの関係が異なる2種類の弾性ワイヤとして、長く操作が不安定なワイヤ（ゴム紐 A：長さ 72[cm]）と短く比較的操作性しやすいワイヤ（ゴム紐 B：長さ 53[cm]）を用意し、各ワイヤを使用して上述のタスクを3試行ずつ行った。

3.3 解析方法

本実験システムでは、指示棒の3軸の回転角度と両手の三次元位置姿勢の時間変化を記録しているが、そのデータをそのままグラフ表現した場合には、2種類のワイヤの条件による違いや、1-3回の試行数に伴う変化に関する特徴について見出すことが困難であった。そこで、あらためてこのインタフェースの操作特性に着目したデータの解析方法について検討した。

図6に示すように、指示棒は両手で操作する弾性ワイヤの張力の差、すなわち各手と指示棒の間の張力 (T_R , T_L) および弾性ワイヤと指示棒が立体的になす角度 (θ_R , θ_L) によって移動量と移動方向が定められる。そこでこれらの張力と角度を、直接計測している指示棒のジョイントの回転角度と両手の三次元位置姿勢データ、さらには可動ジョイントの回転中心からワイヤの固定点までの距離から算出した。張力は事前に計測した弾性ワイヤの荷重と長さの関係式を利用した。

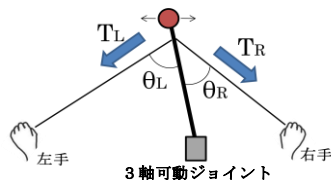
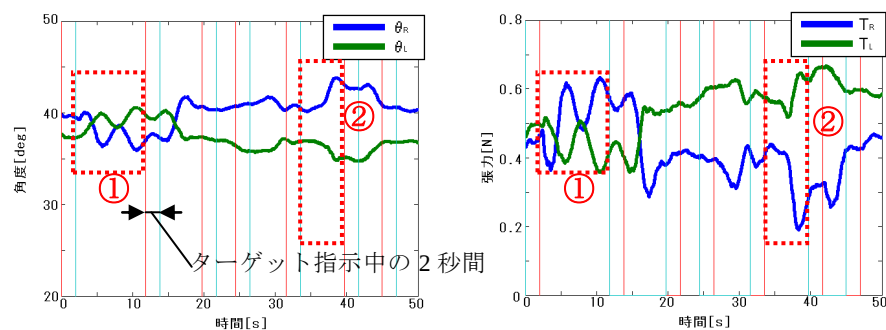


図6 レバー操作モデル



(a) 左右のワイヤと指示棒がなす角度の時間変化 (b) 左右の張力の時間変化

図7 ゴム紐 A を使用した条件での実験データの一例

図7に、長く操作が不安定なゴム紐を使用した条件でのポインティングタスクのデータ例を示す。例えば、原点から L2 のターゲットに移動させている①の領域では、角度、張力ともに前後の状態と比較して頻繁に変動しているが、原点から R2 のターゲットに移動させている②の領域では、①と比較すると角度変化に対して、張力変化の方が比較的大きく変動しているように見える。このことは、①の領域では、角度と張力を同時に変化させるように両手を動かしている操作方法であり、②の領域では、角度はほぼ変えずに張力の大きさを変化させるように両手を動かしている操作方法であることが推察される。その他にも、張力はほぼ一定にしたまま角度を変化させる操作方法も見られ、こうした両手協応操作の特徴が分かりやすい解析方法であることが示された。

以上を踏まえ、上記に示した操作方法の出現度合いや、左右の特徴、さらにはそれらの被験者間比較などについてさらに調査するとともに、それらの特徴が実験試行数の増加にともなってどのように変化するのかについてもあわせて検討していきたい。

4. おわりに

本研究では、ハサミで紙を切るときや自動車のハンドル操作のような両手の協応操作において、両手間における物理的な拘束条件を変化させることに着目した両手協応操作型インタフェースについて検討することにした。そこで、筋-骨格系の動作原理に着目した Bernstein のレバー操作モデルを参考に、指示棒の両端に取り付けた弾性ワイヤを両手で協応操作するインタフェースを考案し、ポインティングタスク時の両手の三次元位置姿勢と指示棒移動角度を計測する実験システムを構築した。そして両手協応操作の特徴を明らかにするために、両手と指示棒の間に働く張力と角度の変化に着目した解析方法について検討した。今後は、被験者内におけるタスク内容に応じた左右の操作方法の特徴や、被験者間比較を行うことで、両手協応操作の特性を調査するとともに、それを活用したインタフェースとしての可能性を探っていきたい。

参考文献

- 1) 駱 岩林, 村山 淳, 赤羽 克仁, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: 力学フィードバック機能をもつ両手6自由度操作環境の実現について, 信学技報, MVE2003-70, pp.29-32
- 2) 水野 貴弘, 小俣 昌樹, 今宮 淳美: 仮想空間上の作業タスクにおける両手入力操作分析, ヒューマンインタフェース, 84-14, pp.79-83 (1999)
- 3) 神崎 秀, 福本 康隆, 西脇 幸一, 稲邑 哲也, 稲葉 雅幸, 井上 博允: 音声指示可能な手袋型統合インタフェースによる全身動作の誘導, <http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/~kanzaki/pub/imitation2004.pdf>
- 4) Nicholas A. Bernstein 著, 工藤 和俊 訳, 佐々木 正人 監訳: デクステリティ 巧みさとその発達, 金子書房 (2003)