

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04388

研究課題名（和文）手先インピーダンス制御におけるアナトミートレインと骨格系との調和

研究課題名（英文）Cooperation between anatomy trains and the skeletal system in the impedance control

研究代表者

横川 隆一（Yokogawa, Ryuichi）

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：70220548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、人がどのように手先を動作させ器用に作業しているのかを調べることであった。そのために、手や腕の姿勢（3次元運動計測）とそれらを駆動する筋・腱・筋膜経路のはたらき（手先・指先の操作力計測）を調べた。その結果から、被験者は、手や腕の関節動作の連携だけでなく、目的動作に関係しない方向へ力を加えることで、環境を利用して、目的動作を効率的に達成していることがわかった。手や腕の関節がアナトミートレインによって連携していた。被験者は、インターフェース装置のような環境の物理的な特性を利用して、効果的に作業を行っていた。その成果は、新しい機械式のインターフェースの開発に活かせるものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的な問いは、人の手先での柔軟な動作が、上腕・前腕・手・指の各部位が連携するアナトミートレインの調和によって、どのようにして実現されているのかということである。手・指の筋腱による関節運動の連携によって指先の微小で繊細な動作を、さらに上腕・前腕・手首の関節運動の連携によって手先の運動の正確な位置合わせを、どのように行っているのかを計測・解析結果を基に考察した。その考察から得られた成果は、手先の器用さと柔らかさを持つ新しいソフトロボットおよび人の自然な運動を補助できるロボットの開発へつながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to investigate how people manipulate their hand and arms dexterously to perform the task. Thus, postures of the hand and arms and functions of the musculoskeletal systems that drive them was investigated. In conclusions, the subjects not only coordinated the movements of the arm joints, but also applied force to the environment in a direction unrelated to the desired movement, which achieved the desired movement efficiently. The joints of the hand and arms cooperated through anatomy trains. The subjects utilized the physical characteristics of the environment, for example the interface device, to perform the task efficiently. The results are likely to contribute in the development of new mechanical interfaces.

研究分野：ロボティクスおよび知能機械システム関連

キーワード：指腹つまみ ステアリングホイールの操作 3次元運動計測 インピーダンス制御

### 1. 研究開始当初の背景

筋骨格系の研究では、骨格系あるいは筋腱駆動系のいずれかのみ、あるいはそれらを一体として力学特性が評価されてきた。それぞれの力学特性の調和関係を十分に考察した研究は行われていなかった。一方、現実的な医療の現場では、人の体を構成している筋腱骨格系は複数の筋・腱のネットワークが連携して関節を制御しているという考え方が提案され活用されていた。この考え方をを用いて上肢運動における運動系のネットワークの調和およびその機構が柔らかな運動制御に対して、どのように働いているのかを調べるのが重要であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、動作に対して冗長な関節駆動機構をもつ上肢の運動に対して、アナトミートレインに基づく力と運動のネットワーク内の調和および柔らかな手指の運動制御が、どのように作用するのかを調べることであった。

### 3. 研究の方法

(1) **ダイヤル操作** (図1参照)の実験では、計測するつまみ回転操作の初期姿勢として、被験者は座席に着席し、アームレストに前腕を置いた状態で利き手の人差し指と親指で小型のダイヤルのつまみを把持し右回転の操作および同様に左回転の操作を行った。回転操作中に3次元運動計測器を用いて人差し指と親指の位置・姿勢(指先の位置と各関節の角度)、6軸力覚センサを用いて指先の力、そして表面筋電位計測によって筋活動を推定した。人差し指と親指の指先の柔らかさを推定するために、ダイヤルの回転をモータによるインピーダンス制御で実現した。得られた計測値には統計解析を施し、その解析結果と骨格の運動学モデルと筋腱のネットワークに基づいて考察を行った。

(2) **ハンドル操作** (図2参照)の実験では、コンピュータ画面上に移動速度が変化するターゲットと、自動車用ハンドルの回転に応じて画面上を動くポインタを映し出し、操作者は、両腕でハンドルを操作して、ポインタをターゲットに合わせた。ターゲットとポインタの誤差によってハンドル操作の正確性を評価した。ハンドルの回転操作をモータによるインピーダンス制御で実現した。3次元動作計測機器と6軸力覚センサを用いて、両腕の位置・姿勢(関節の角度)と手先力の同時計測を行った。得られた計測値には統計解析を施した。ターゲットの移動速度が切り替わった時のターゲットとポインタの誤差、両腕の関節角度、および手先力に着目した。ハンドルを正確に操作するために、被験者は、無意識の内に上肢をどのように動作させているのかを調べた。

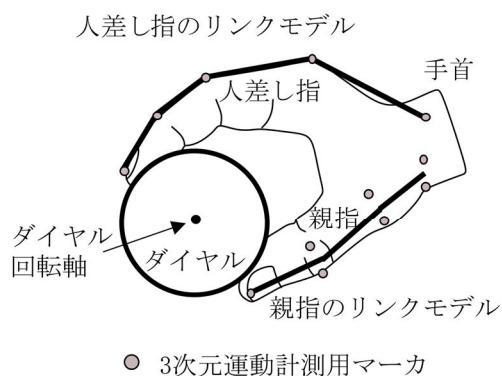


図1 ダイヤル操作

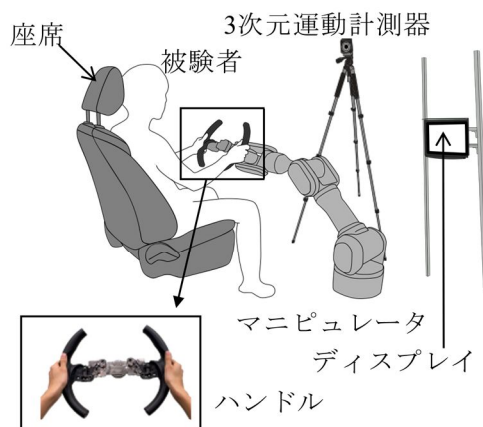


図2 ハンドル操作

### 4. 研究成果

#### (1) ダイヤル操作の実験

関節可動範囲の大きい順から、人差し指はPIP関節(指先に2番目に近い関節)、親指はIP関節(親指の指先に1番目に近い関節)がつまみ回転動作を主導し、MP関節(指の付け根の関節)とCMC関節(手の甲の中にある関節)はつまみ回転動作を補助していることがわかった。人差し指PIP関節は第2関節であるにもかかわらず主として働くことがわかった。

表面筋電位計測の結果から、人差し指のPIP関節よりもDIP関節を主として使用している被験者では、弱い筋力で指先を器用に制御している可能性が示された。被験者によって、筋腱ネットワークの制御戦略に違いがあることが示された。

人差し指MP、親指CMC関節は、指先から最も離れた位置に配置された関節であること、さらに高い関節自由度をもつことから、人差し指のDIP関節(指先に1番目に近い関節)および

PIP 関節と比べて、人差し指 MP と親指 CMC 関節による指先の細かな制御は難しいといえる。そのため、人差し指 MP と親指 CMC 関節は可動範囲を小さくし、ほかの関節と協調しながら、指先の位置の微調整を行っている可能性が高い。

人差し指の関節および親指の関節の可動範囲の比較から回転方向によって人差し指および親指の役割が変化することがわかった。ダイヤルの右回転方向では人差し指が主導的、親指が補助的な役割であるのに対して、ダイヤルの左回転方向では人差し指が補助的、親指が主導的な役割であると考えられる。これは、指の筋腱ネットワーク（アナトミートレイン）が人差し指と親指の屈曲と伸展とで異なることによる。特に人差し指の DIP 関節と PIP 関節は、腱と靭帯から構成される複雑な伸展機構によって連動している。手・指の外に位置する外在筋である指伸筋と手・指の中に位置する内在筋である虫様筋・骨間筋との連携がこれを実現している。

#### (2) ハンドル操作の実験

ハンドルの操作を目標通りに行うために、被験者は上肢（手・前腕・上腕・肩）の各関節を巧みに制御していた。

操作に対して、どの関節を主として動作させるかは無意識に対応しているが、特定の関節（肩関節と手首の屈曲・伸展、および前腕の回内・回外）を協調して動作させることでハンドル操作の精度を高めている可能性が高い。

環境（ハンドル）と接触し、環境（ハンドル）の動作を意識的に制御するときには、上肢の各部の動作の連携だけでなく、目的動作に関係しない方向への力を制御することによって、目的動作を効率的に達成していることが認められた。

上肢のアナトミートレインによる上肢各部の連携した運動だけでなく、環境との連携も含めた動作を人は無意識に学習し、生活していることが考えられる。環境からの応答を巧みに利用している可能性が高い。

(3) これらの成果は、新しい機械式のインターフェースの開発に活かせるだけでなく、手先の器用さと柔らかさを持つ新しいソフトロボットおよび人の自然な運動を補助できるロボットの開発へつながるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kengo Somei, Toru Tsumugiwa, Ryuich Yokogawa, Toshihiro Hara, Yusaku Takeda, Mitsuhiro Narusue, Hiroto Nishimura | 4. 巻<br>11                |
| 2. 論文標題<br>Effects of Display Response Latency on Brain Activity During Device Operation                                   | 5. 発行年<br>2023年           |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Access  | 6. 最初と最後の頁<br>34860-34869 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/ACCESS.2023.3262658   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-                 |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>岩谷 将吾、積際 徹、横川 隆一                   |
| 2. 発表標題<br>擬似逆行列を用いた運動学解析に基づく示指DIP-PIP関節の運動関係 |
| 3. 学会等名<br>第40回 日本ロボット学会 学術講演会                |
| 4. 発表年<br>2022年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>大岡 昂平、積際 徹、横川 隆一、成末 充宏、西村 啓人、武田 雄策、原 利宏          |
| 2. 発表標題<br>HMIコマンドつまみ回転操作時における示指・拇指のコンプライアンス解析に基づく指先の運動特性評価 |
| 3. 学会等名<br>第39回 日本ロボット学会 学術講演会                              |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>森岡 悠斗、積際 徹、横川 隆一、成末 充宏、武田 雄策、原 利宏    |
| 2. 発表標題<br>ステアリング操舵時における上肢姿勢が手先コンプライアンス特性に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>第39回 日本ロボット学会 学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2021年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>伊藤 亮平, 積際 徹, 横川 隆一, 成末 充宏, 武田 雄策, 原 利宏 |
| 2. 発表標題<br>つまみ回転操作時における示指・拇指のコンプライアンス特性に基づく指姿勢解析  |
| 3. 学会等名<br>第38回 日本ロボット学会 学術講演会                    |
| 4. 発表年<br>2020年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>林 真優, 積際 徹, 横川 隆一, 成末 充宏, 武田 雄策, 原 利宏             |
| 2. 発表標題<br>HMIコマンド回転操作における関節角度・表面筋電位計測に基づく示指・拇指のコンプライアンス特性解析 |
| 3. 学会等名<br>第38回 日本ロボット学会 学術講演会                               |
| 4. 発表年<br>2020年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|