人間-ロボット協調作業系における人間の運動特性と
運動野の賦活状態に関する解析積際 徹^{*1}, 生田 涼^{*2}, 横川 隆一^{*1}Analysis for motion characteristics of human operator and motor area of higher brain function
during human-robot cooperative workToru TSUMUGIWA^{*1}, Ryo IKUTA^{*2} and Ryuichi YOKOGAWA^{*1}^{*1,*2} Department of Biomedical Engineering, Doshisha University
1-3 Tatara-Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

Received 23 February 2015

Abstract

The aim of this research is to investigate the operator's motor skill obtained by the skill training during the human-robot cooperative task. There are many studies to investigate the perception of the motion of the robot and the electromyography (EMG) signal of the operator's muscles in the human-robot cooperative task. The time series data of the motion of the robot and the EMG signal of the muscles differ depending on the individual motor skill of the human operator. Therefore, it is necessary to investigate the variation of the operator's motor skill. In former studies, the operators were made to subject the skill training to become skilled in performing the indicated task, however the motor skill acquired by the skill training have not been investigated in the field of the human-robot cooperative task. In this research, operators classified into three groups were trained on the following either of three kind of method; (i) the positioning task between the two target points (PTP), (ii) the tracking task following the target point, and (iii) the compound operation of the positioning task and the tracking task. In the positioning tasks after particular skill training, the motions of the robot are measured to investigate the operator's motor skill. To investigate the motions of the robot and the activity of the motor area of the subjects, the experiments were conducted in every month over a period of five months. The experimental results showed that there were significant differences in the motor skill and the activity of the motor area among the three groups.

Key words : Human-robot cooperative task, Impedance control, Positioning task, Tracking task, Motor skill

1. 緒 言

人間とロボットが力学的に協調して作業を行う環境下におけるロボットの運動制御法として、インピーダンス制御が多く用いられている(Hogan, 1985, Kazerooni, 1990, Gomi and Kawato, 1997, 池浦, 2000, 池浦他, 2007, Tsumugiwa et al., 2007). その中でも、インピーダンス制御における人の制御特性を調べる研究(辻他, 2000), インピーダンスパラメータを変更させて、操作者のインピーダンスに対する知覚能力を解析する研究(辻他, 2002)があり、またインピーダンス制御を用いた追従制御中に筋電位を用いて操作性を評価する研究(小林他, 1998), アンケートを用いてインピーダンス制御における力接触インターフェースの操作感を評価する研究(金森他, 2002)などが行われている. 加えて、ばねの押し込みによる弾性の知覚を評価する研究(Hong et al., 1995, 大西他, 2008)では、試行に要する時間が知覚に依存していること(大西他, 2008), 移動する距離をランダムにすると弁別精度が低下すること(Hong et al., 1995)を指摘している. 以上の研究から、試行内容が同一であるものの、試行毎に操作者が加える力およびその力に対するロボットの運動が異なると、操作者の筋電位やロボットの運動に対する知覚が異なる場合があり、知覚能力および筋電位を適当に評価できない可能性があると考えられる. よって操

作者の生体情報を適切に評価するためには、試行毎の操作者がロボットに加える力のばらつきを抑え、操作者の動きの再現性を高くする必要があり、そのためには操作者が作業に対して同一の運動スキルを獲得するための短期的または長期的な反復トレーニングが必要となる。上記で述べた研究では運動スキルを獲得するために様々な習熟方法を用いているが(辻他, 2002, 大西他, 2008), 習熟方法により得られる人間の動きの再現性を含む運動スキルについては評価されていない。

他方で運動スキルに関する研究が行われている。その中でも、再現性を高くすることを目的に表面筋電位を用いて習熟度の関係について評価する研究(高橋他, 2011), ロボットを用いた協調作業における目標軌道と手先位置の差を用いて運動スキルを評価する研究(Shadmehr and Brashers-Krug, 1997), NIRS を用いて人間が指運動をすることにより、人間と脳機能の関係性を評価する研究(牧他, 1996)がある。しかし、位置決め運動に操作者の繊細な力の調節を要するロボットとの協調作業とは異なり、人のみが動作している状態における運動スキルを評価するにとどまっていること、操作者および操作者間の再現性について言及されていないこと、そして人間とロボットの協調作業時における人間の脳機能については明らかにされていないという課題がある。

人間とロボットの協調作業において、運動スキルの獲得による再現性についての評価が可能になれば、操作者が有する制御特性の再現性などに関わる基本資料を得ることができ、確度の高い操作者群を作成することが可能となる。従って、人間とロボットの協調作業における操作性の向上を目的とした研究(小林他, 1998, 辻他, 2000, 辻他, 2002, 金森他, 2002)や今後人間と協調して動くロボットの活躍が期待されている医療や福祉の分野において、より操作性の高い制御方法を確立することに貢献できると考えられる。

そこで本研究では、人間とロボットの協調作業において習熟により得られる操作者の運動スキルの評価を行うことを目的とする。特に習熟運動の差異により得られる運動スキルの違いについて焦点を当て、人間の運動の収斂度合や再現性ならびに運動野の賦活状態からの評価を実施する。簡単化のため、対象とする協調作業を1自由度の並進運動としたうえで、運動スキルを獲得するための習熟作業を行った後に、2点間の位置決め作業を行ってもらう。そして、習熟作業後の位置決め作業を対象にして運動スキルの評価を行う。習熟作業では複数人数の操作者を3グループに分け、それぞれのグループに対して異なる習熟方法を提示し、いずれの習熟方法が確度の高い操作者群を作成するために効果的かの検討を行う。本研究では、(i) 2点間の位置決め作業、(ii) 目標手先位置を追う追従作業、(iii) 位置決め作業と追従作業、および2つの複合作業を習熟方法として設定し、短期的に習熟作業を複数回実施する。(i) 2点間の位置決め作業は習熟作業後の位置決め作業と同様の試行内容であり、(ii) 目標手先位置を追従する作業は操作者が運動を学習し、確度の高い操作者を作成することを目的とする。(iii) 位置決め作業と追従作業、および2つの複合作業については操作者に目標となる運動を提示し、操作者が運動に慣れた上で、段階的に追従作業から位置決め作業に移行する習熟作業を行ってもらうことにより、習熟作業後の位置決め作業において目標手先位置と同様の運動をすることを目的としている。以上に記した(i)~(iii)の習熟作業より得られた運動スキルの解析を行い、各習熟作業との相関性について評価することで、確度の高い操作者群を作成するために必要となる習熟方法の確立およびそれによって得られる運動スキルについて考察する。

また、運動スキルの向上を図るためには短期的な反復トレーニングだけではなく、トレーニング後の休憩期間を含めた長期的な反復トレーニングが必要である。本研究ではこの休憩期間を約30日と設定した。この実験を複数回に渡り同じ操作者で同じ習熟内容を行うことにより、繰り返しの習熟作業による操作者の習熟度の評価を行う。操作者の習熟度の評価方法として、人間の動きの再現性を算出するとともにNIRS計測装置(日立メディコ製、型番: ETG-7100)を用いて近赤外光の吸収による酸素化ヘモグロビンの濃度変化を計測し、操作者の運動野の賦活状態を調べる(灰田, 2002)。これにより、運動スキルの向上に含まれる、意識せずに運動を行うという慣れと運動野の賦活状態との関係を明らかにし、短期的および長期的な反復トレーニングによる人間の動きの再現性について評価する。

2. 実験方法

実験概要ならびに実験手順の概要を図1に示す。本研究で使用するアーム型ロボット PA10 (三菱重工業社製、型番: PA-10A-ARM, 以下、ロボットとする)と、モニタと操作者の位置関係の詳細を2・1節で述べる。本研究で使用するロボットの手先に力覚センサ(ニッタ社製、型番: IFS-67M25A50-I40)を取り付け、その上にハンド

ルが取り付けられている。ロボットの運動制御は2・2節で述べる。試行内容として、操作者にはハンドルを握った状態でロボットの手先を初期位置から目標位置まで動かしてもらふ。また、ロボットの動作方向は操作者に対して右から左への並進運動(x 軸方向)とした。

図1(d)に実験の流れを示した概要図を示す。まず、操作者を複数のグループに分け、操作者はグループごとに設定された異なる習熟方法を用いた習熟作業を行う(作業内容はグループごとに変更してモニタ上に提示される)。習熟作業における習熟方法の詳細については2・3節で述べる。また、習熟作業で使用するモニタの表示内容を2・4節に述べる。習熟作業後には協調位置決め作業により運動スキルの評価を実施し、最後にfNIRSによる運動野の賦活状態の計測を行った。各実施内容の詳細については次節以降に示す。運動スキルの評価方法については2・5節で述べ、習熟作業後の位置決め作業の詳細を2・6節で述べる。この実験を約30日ごとに実施し、これを表1に示すように5ヵ月に渡って、繰り返しの習熟作業による操作者の習熟度の評価を行う。実験手順や所要時間等の実験実施に関わる情報の操作者への提示については、練習前に紙ベースによって行った。

なお、本研究については、同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会による承認を得て実施している。

Fig. 1 The overview of the experiments and the flowchart of the experimental protocol. The operators controlled the motion of the robot by applying the force to the handle. The operators moved the tip position of the robot from the start point to the goal point following the trajectory on the display monitor. The outline of the experimental protocol is illustrated on the flowchart.

Table 1 Schedule of the experiments

	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Date	8-Aug-2013	10-Sep-2013	9-Oct-2013	8-Nov-2013	11-Dec-2013

2・1 ロボットとモニタと操作者の位置関係について

実験の概略図を図2に示す。力覚センサの上に取り付けられているハンドルの上に画面に伸びている丸棒（長さは200 mm、直径は5 mm）を取り付け、その先をロボットの手先位置とした。ハンドルの高さは120 mm、ハンドル中心部からロボットの手先位置までは167 mm、ロボットの手先位置から画面までの距離は4 mmとした。また、ロボットの手先位置およびモニタに描かれている初期位置と目標位置を直線で結んだ軌道は高さ685 mm、椅子の高さは450 mmとした。椅子の位置は操作者の腕の長さを考慮し、操作者が動かしやすい位置にy軸方向のみ移動してもらう。ただし、操作者の向きはモニタと垂直になるようにし、操作者の右肩を初期位置と目標位置の中心に合わせるようにした。

Fig. 2 The illustration of the experimental system. The indicator (length, 200 mm, diameter, 5 mm) that was attached to the handle (height, 120 mm) indicated the trajectory on the display monitor.

2・2 ロボットの運動制御則

ロボットの手先位置に取り付けた力覚センサによって検出された、操作者がハンドル部に加えた力 $F(t)$ [N] をインピーダンスモデルに入力し、ロボットの運動制御を行う。本研究の運動制御において使用するインピーダンスモデルを式 (1) に示す。

$$M \ddot{x}(t) + D \dot{x}(t) = F(t) \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$ はロボットの手先の初期位置からの距離[m]であり、 $\dot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}(t)$ はそれぞれロボットの手先の速度[m/s]、加速度[m/s²]を表す。 M は慣性係数[kg]、 D は粘性係数[Ns/m]を示し、本研究では慣性係数は3 kg、粘性係数は40 Ns/m とする。

ロボットの運動を規定するインピーダンス制御のパラメータについては実験的に決定し、安定条件下で操作可能なパラメータを選定した。また、実施可能な実験試行数の限界により、本研究では各パラメータを固定した状態で実験を行っている。

2・3 習熟方法

本実験では、操作者として実験に参加した年齢が、21~24 歳である成人男性 15 人を習熟方法が異なる 3 グループ、各 5 人に分けた。被験者群のグループ分けについては、15 人をランダムに選定し、各グループに分類した。なお、本実験で実施する試行に対する未習熟者を被験者として選定していることから、被験者には潜在的な差異

はないとする。操作者は全ての試行において利き手である右手で操作を行った。習熟方法として5種類 (Case 1 ~ Case 5) の操作者に提示する方法を用いる。

グループ1の操作者には習熟方法として、20回の位置決め作業を行ってもらう。位置決め作業では初期位置と目標位置のみが表示されるモニタ (Case 1) を使用し、初期位置から目標位置まで5秒でロボットの手先位置を動かしてもらうよう指示した。グループ2、グループ3の操作者には習熟方法として、初期位置と目標位置および手先目標位置が表示されるモニタ (Case 2) を使用して、初期位置から目標位置まで移動する手先目標位置に合わせてロボットの手先位置を動かす追従作業を行うよう指示し、十分に慣れたら追従作業を終了する。十分な慣れの判断基準を2・5節に示す。グループ2は追従作業のみを習熟作業とする。グループ3は追従作業終了後、習熟作業終了後に行う位置決め作業に慣れってもらうために追従作業中に目標手先位置を隠す範囲を段階的に増やす3種類の内容を表示させるモニタ (Case 3, Case 4, Case 5) を用いて、各モニタにつき習熟作業を5回ずつ行い、習熟作業を終了する。Case 3, Case 4, Case 5のモニタを用いた追従作業において目標手先位置の軌道が隠れている範囲では目標位置の動きを予測して動かしてもらうよう指示した。

グループ1が対象となる習熟方法は最も簡易に実施できる単純な習熟方法であり、従来研究においてもよく用いられている。グループ2の習熟方法は目標位置を追従する作業であり、操作者に運動を学習・習熟させることで、操作の確度を高めることを目的としている。グループ3の習熟方法は、位置決め作業と追従作業の複合作業であり、習熟作業の内容の差異によって操作者の習熟や運動スキルに与える影響を調べる。ロボットの手先位置を動かすタイミングや手先目標が動き始めるタイミング、および作業以外での指示内容の詳細は2・4節で述べる。

2・4 習熟の提示方法

モニタの表示内容の概略図を図3に示す。Start pointは初期位置、Goal pointは目標位置、Target pointは手先目標位置とする。また、Hidden area L_i は目標手先位置が隠れる範囲を示している。初期位置から目標位置までの距離 L は350 mmである。目標手先位置である青い点は初期位置から目標位置まで5秒で人間とロボットの協調作業において滑らかな軌道と言われている躍度最小軌道 (Flash and Hogan, 1985, Rahman et al., 2002) を描くように移動する。 L_i はそれぞれ Case 3: $L_i=L/8$, Case 4: $L_i=L/4$, Case 5: $L_i=3L/8$, Case 6: $L_i=L/2$ とする。目標手先位置の大きさは直径5 mmとした。

習熟作業で使用する Case 1 から Case 5 までのモニタの表示内容の概略図、および習熟作業後の位置決め作業で使用する Case 6 のモニタの表示内容の概略図を図4に示す。試行開始時はモニタの上部に“Wait”と表示させ、操作者を待機状態にさせる。“Wait”から“3”, “2”, “1”とカウントダウンが始まり、カウントダウン中に操作者にはハンドルを握ってもらう。カウントが0のタイミングに“Start”と表示され、グループ1は“Start”と同時に位置決め作業を始め、グループ2とグループ3は“Start”の表示と同時に動き出す手先目標位置に合わせて

Fig. 3 The overview of the display monitor during the task of the experiment. The operator performs the positioning task or the tracking task following the target point. The distance L from the start point to the goal point is 350 mm. The hidden area L_i on the trajectory shows the stepwise range concealing the target point. The operator performs the tracking task, predicting the movement of the target point in the hidden area.

Fig. 4 The detail illustration of the trajectory on the display monitor. There is the target point on the trajectory in the case 2 ~ case 5. The distance of the hidden area concealing the target point on the trajectory is $L/8$, $L/4$, $3L/8$ in the case 3 ~ case 5, respectively.

ロボットの手先位置を動かし始める。“Start”と表示されてから試行時間である5秒が経過すると“End”と表示され、2秒後にロボットの手先位置が初期位置に戻り、“Wait”の表示となる。1セット内では“End”と表示されてから10秒後に再びカウントダウンが始まる。

2・5 運動スキルの評価方法

試行毎の被験者の運動スキルの評価方法として複数回の作業中の各設定時刻に対する位置の標準偏差を使用する。試行回数5回を1セットとして、図5に示すように1セットにおける0.1秒毎の標準偏差の合計値を運動技能値として定義し、試行毎の運動を見る指標とする（2・6節参照）。従って、運動技能値が小さいほど、1セット分の試行のばらつきは小さく、同様の運動を行っている。また、運動技能値が大きいほど、1セット分の試行のばらつきは大きく、異なる運動を行っていることを示す。習熟作業における十分な慣れの判断基準は運動技能値が1セット前の運動技能値より大きい、もしくは0.01以下の減少のときとする。

2・6 習熟作業後の位置決め作業

習熟作業後の位置決め作業は習熟作業時と同様に初期位置から目標位置までの距離が350 mm、移動時間を5秒とし、操作者にはモニタ（Case 6）を用いて位置決め作業を5回行ってもらう。1回目の実験における、各グループの習熟作業後の位置決め作業時の各設定時刻に対する位置の平均と0.1秒毎の位置の標準偏差を図5に示す。青く塗られた部分は標準偏差の合計値の運動技能値を示している。習熟作業後の位置決め作業における試行回数5回の選択方法について図6に示す。図6において列は操作者を示し、行は試行回数を示す。列毎（青色で示す）で計算された運動技能値は各操作者の運動技能値を示し、各操作者の運動に関わるばらつき具合を示す指標となる。行毎（赤色で示す）で計算された運動技能値は操作者間の運動技能値を示し、操作者間の運動に関わるばらつき具合を示す指標となる。運動技能値測定後、NIRS計測装置を利用し、位置決め作業時の慣れにおける運動野の賦活を評価する。NIRS計測装置を用いた実験概要を図7に示す。NIRS計測装置を用いた実験方法はモニタ（Case1）を用いて、位置決め作業2回を20秒の試行時間中に行った後、20秒の休憩を行う。20秒の試行時間と20秒の休憩時間を合わせた試行を1試行とし、3試行を5回行う。休憩時間では操作者には脳を休ませる必要があるため、目を閉じて、瞑想するよう指示した。

Fig. 5 The trajectory and the standard deviation of the tip position at every 0.1 seconds. The motor skill is defined using the variation of the motion of the robot. The motor skill is calculated by the sum of the standard deviation at every 0.1 seconds.

Fig. 6 The illustration of the calculating method of the motor skill. The value of the motor skill calculated from the data of 5 trials of 1 operator shows the motor skill of the operator (blue area). The value of the motor skill calculated from the data of 1 trial of 5 operators shows the motor skill among the operator (red area).

Fig. 7 The overview of the experiments using fNIRS system. The operator performed the positioning task 15 times to identify the activation of the higher brain function during the task.

3. 実験結果・考察

操作者の習熟度合を評価するために (i) 各操作者の運動スキル, (ii) 操作者間の運動スキル, (iii) 操作者の運動野の賦活状態について考察する. (i) 各操作者の運動スキルでは各操作者が 1 日に行う 5 試行の運動技能値を算出し, 操作者が行う 5 試行の運動に関わるばらつき具合が同様かどうかを評価する (3・1 節). (ii) 操作者間の運動スキルでは各グループの 5 人の操作者の 1 試行毎の運動技能値を算出し, 5 人の操作者の運動に関わるばらつき具合が同様かどうかを評価する (3・2 節). (iii) 運動野の賦活状態からは操作者の試行内容に対する慣れについて評価する (3・3 節).

3・1 各操作者の運動スキル

各操作者の習熟作業終了後の 5 回の位置決め作業によって算出される実験日 5 日分の運動技能値の各グループ 5 人の平均および標準偏差を図 8 に示す. この値は各操作者の運動のばらつきを見る指標となる. 各操作者の運動技能値に関して, 帰無仮説を運動技能値に有意差が認められないと設定し, 統計的検定を実施した. 以降, 運動技能値に関する統計的検定については, 同様の帰無仮説を設定する.

有意水準 0.05 で Games-Howell 法を利用して約 30 日おきの 3 グループの運動技能値で検定を行った p 値の結果を表 2 に, グループごとの実験日 5 日分の運動技能値で検定を行った p 値の結果を表 3 に示す. p 値が 0.05 以下 (表 2, 表 3 において, 灰色で示す) であるとき有意差が認められる. 表 2 より 3 回目はグループ 2 とグループ 3,

Fig. 8 The results of the value of the motor skill of operators of each group. The value of the motor skill calculated from the data of 5 trials of 1 operator shows the motor skill of the operator. The bars show the average and the error bars show the standard deviation of the motor skill of the operators of each group.

Table 2 Results of statistical analysis of the value of the motor skill of operators in the groups (p-value)

		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Group A - Group B ("Group A - Group B" means the difference between Group A and Group B)	Group 1 - Group 2	0.981	0.968	0.153	0.964	0.968
	Group 1 - Group 3	0.474	0.055	0.418	0.601	0.029*
	Group 2 - Group 3	0.090	0.103	0.010*	0.219	0.021*

*Gray background and * mean that there is a significant difference in the Games-Howell test

Table 3 Results of statistical analysis of the value of the motor skill of operators in the days (p-value)

		Group 1	Group 2	Group 3
Day A - Day B ("Day A - Day B" means the difference between Day A and Day B)	Day 1 - Day 2	0.999	0.971	0.999
	Day 1 - Day 3	0.938	0.999	0.998
	Day 1 - Day 4	0.952	0.616	0.990
	Day 1 - Day 5	0.951	0.599	0.935
	Day 2 - Day 3	0.657	0.857	0.995
	Day 2 - Day 4	0.699	0.860	0.988
	Day 2 - Day 5	0.564	0.844	0.878
	Day 3 - Day 4	0.999	0.267	0.875
	Day 3 - Day 5	0.999	0.248	0.980
	Day 4 - Day 5	0.999	0.999	0.479

5 回目はグループ 1 とグループ 3 およびグループ 2 とグループ 3 に有意差が認められた。このようにグループ 3 については、他のグループと比較して実験日を迫うごとに運動のばらつき具合に有意差が認められる傾向が伺えるものの、有意差が認められない実験日（4 日目）も存在しており、ばらつき具合の収斂性については確定的とは言えない。また、表 3 より全グループについて、実験実施日間に関する有意差は認められない。よって、全操作者において以前の運動スキルとの比較に関して変化が認められないといえる。

各グループの運動技能値を図 9 に示す。全てのグループにおいて特定の操作者の運動技能値が低い、もしくは、高いという傾向があるわけではなく、操作者によって運動技能値の増減が異なる。また、表 3 より約 30 日おきの 3 グループの運動技能値には有意差が認められない。以上の結果から、各グループにおける全ての操作者および全ての実験日の運動技能値については、実験場所の気温など外的要因、被験者の体調などの内的要因から受けた影響は少ないと考えられ、各実験試行はほぼ同様の環境・状況下で実施されたと推測できる。各グループにおいて全ての操作者および全ての日にちの運動技能値の平均および標準偏差はグループ 1 : 0.537 ± 0.250 , グループ 2 : 0.597 ± 0.179 , グループ 3 : 0.342 ± 0.110 となった。これらのグループごとの運動技能値において、有意水準 0.05 で Games-Howell 法を利用して検定を行った p 値の結果はグループ 1 とグループ 2 では 5.94×10^{-1} , グループ 1 とグループ 3 では 3.16×10^{-3} , グループ 2 とグループ 3 では 1.11×10^{-6} となり、グループ 1 とグループ 3, グループ 2 とグループ 3 に有意差が認められた。よって、グループ 3 は他のグループより操作者の運動技能値が低いことが示唆され、運動のばらつき具合が小さいといえる。

Fig. 9 The transition of the value of the motor skill every month. The fluctuation of the motor skill differs depending on the operator.

3・2 操作者間の運動スキル

各試行回数の習熟作業終了後の操作者 5 人の位置決め作業によって算出される実験日 5 日分の運動技能値の各回数 5 回の平均および標準偏差を図 10 に示す. この値は操作者間の運動のばらつきを見る指標となる. 操作者間の運動技能値において有意水準 0.05 で Games-Howell 法を利用して実験日 1 日分ごとの 3 グループの運動技能値で検定を行った p 値の結果を表 4 に, グループごと実験日 5 日分の運動技能値で検定を行った p 値の結果を表 5 に示す. p 値の値が 0.05 以下 (表 4, 表 5 において, 灰色で示す) であるとき有意差が認められる. 表 4 と表 5 よりグループ 1 の 1 回目は同日の他のグループと有意差が認められ, グループ 1 の他の日も有意差が認められた.

Fig. 10 The results of the value of the motor skill among the operators of each group. The value of the motor skill calculated from the data of 1 trial of 5 operators shows the motor skill among the operator. The bars show the average and the standard deviation of the motor skill among the operators of each group.

Table 4 Results of statistical analysis of the value of the motor skill among operators in the groups (p-value)

		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Group A - Group B ("Group A - Group B" means the difference between Group A and Group B)	Group 1 - Group 2	0.001*	0.712	0.342	0.941	0.118
	Group 1 - Group 3	0.000*	0.093	0.028*	0.084	0.148
	Group 2 - Group 3	0.009*	0.187	0.484	0.014*	0.892

* Gray background and * mean that there is a significant difference in t-test

Table 5 Results of statistical analysis of the value of the motor skill among operators in the days (p-value)

		Group 1	Group 2	Group 3
Day A - Day B ("Day A - Day B" means the difference between Day A and Day B)	Day 1 - Day 2	0.001*	0.753	0.999
	Day 1 - Day 3	0.001*	0.972	0.962
	Day 1 - Day 4	0.000*	0.277	0.785
	Day 1 - Day 5	0.002*	0.059	0.608
	Day 2 - Day 3	0.843	0.686	0.993
	Day 2 - Day 4	0.943	0.998	0.904
	Day 2 - Day 5	0.958	0.763	0.488
	Day 3 - Day 4	0.999	0.497	0.992
	Day 3 - Day 5	0.506	0.261	0.308
	Day 4 - Day 5	0.66	0.605	0.122

* Gray background and * mean that there is a significant difference in t-test

全グループの操作者間の運動技能値の中で最も大きいグループ1のDay1と前回に比べ増加したグループ1のDay5およびグループ2のDay3における各操作者の軌道について以下に述べる. グループ1のDay1以外の軌道

は指定された時間で目標位置に到着しているのに対し、グループ 1 の Day 1 では指定された時間では目標位置に到達していない軌道（図 11）や、指定された時間より早めに目標位置に到達する軌道（図 12）があった。そのため、高い運動技能値となったと考えられる。図 11 はグループ 1 の操作者 B の Day 1 と Day 2 の軌道を、図 12 はグループ 1 の操作者 C の Day 1 と Day 2 の軌道を示す。グループ 1 の Day 5 とグループ 2 の Day 3 は各操作者に大きく外れる軌道は見られず、同試行時に速く手先位置を動かす操作者と遅く手先位置を動かす操作者がいたために運動技能値が前回より高くなったと考えられる。

各グループにおいて、Day 2 から Day 5 までに有意差が認められないことから、全ての試行回数および Day 2 から Day 5 までの実験は同様の条件下で行われ、運動技能値が算出されたとして考えられる。各グループにおいて、Day 2 から Day 5 までの全ての試行回数の運動技能値の平均および標準偏差はグループ 1 では 0.720 ± 0.216 、グループ 2 では 0.669 ± 0.190 、グループ 3 では 0.443 ± 0.119 となった。また、グループ 2 とグループ 3 において Day 1 の運動技能値と Day 2 から Day 5 に運動技能値における有意差が認められないことから、実験初日と以降の実験日との間には大きな変化がなかったといえる。これらのグループごとの運動技能値において有意水準 0.05 で Games-Howell 法を利用して検定を行った p 値の結果はグループ 1 とグループ 2 では 5.68×10^{-1} 、グループ 1 とグループ 3 では 7.37×10^{-5} 、グループ 2 とグループ 3 では 1.16×10^{-3} となり、グループ 1 とグループ 3、グループ 2 とグループ 3 に有意差が見られた。よって、グループ 3 は他のグループより操作者間の運動技能値が低いことが示唆され、運動のばらつき具合が小さいといえる。

Fig. 11 The experimental result of the trajectory that the operator finishes the task over the target time. The blue line shows the trajectory of the operator B in the group 1 of the day 1. The red line shows the trajectory of the operator B in the group 1 of the day 2.

Fig. 12 The result of the trajectory that the operator finishes the task under the target time. The blue line shows the trajectory of the operator C in the group 1 of the day 1. The red line shows the trajectory of the operator C in the group 1 of the day 2.

3・3 操作者の高次脳機能計測

NIRS 計測装置のデータの見方を図 13 に示し、NIRS 計測装置のデータ（全操作者の平均値）を図 14 に示す。NIRS 計測装置により Oxy-Hb 変化を測定し、ベースライン処理によって得られた計測データの時間平均値とベースラインの値で 1 標本の t 検定を行う(富岡他, 2002)。黒枠で囲まれた部分は人間の脳の運動野を示しており、図 13 において t 値はカラーバーの色調に対応しており、 t 値の 1.71 を超える赤い部分は平常時より統計的に有意に賦活していることを示している。

Fig. 13 The explanation of the topography image data obtained from the fNIRS system. Where the part of the topography images is red, the higher brain activity is activated. The black frame indicates the motor area of right side of the body of the operator.

Fig. 14 The topography image of the t -value in the experiments. The result shows the topography image of each day (from day 1 to day 5) of each group (from group 1 to group 5).

なお、fNIRS による計測では、毎回の実験日において多数の計測プローブの取付け位置を厳密に一致させることができないことに加えて、計測機器の空間分解能が 20mm から 30mm 程度であることから、計測領域にずれが生じてしまう限界が存在するため、以後は運動野とその近傍を含めた領域を運動野と表現する。

グループ 1 の実験結果では、運動野において脳機能の有意な賦活を示す濃い赤色の領域が実験日 5 日分に渡って検出されている。操作者の脳機能において操作者が運動に対して慣れていない場合、高次的な脳機能を働かせることでその運動に対応すると考えられ、運動計画を立てたうえで身体的な応答を生じさせると推測される。慣れていない運動に対する運動計画を立てる際には運動野近傍が賦活し、逆に運動に慣れた場合には運動計画を新たに立てないと推測できることから、賦活の程度が低下すると考えられる。定性的な評価となるが、本結果より運動野近傍を含めたいずれかの箇所において有意な賦活状態を示している領域が存在することから、以前までの実験で得られた習熟を活かすことができていないと推測できる。グループ 2 は 2 回目以降の運動野の賦活が低いことから 2 回目以降は意識せずに操作していることがわかる。グループ 3 は運動野の賦活が下がっていることから、徐々に意識せずに協調作業を行うことができていくことがわかる。またグループ 2 の操作者 1 人とグループ 3 の操作者 2 人の運動野を含む中心と左のプローブを図 15 に示す。図 15 は 1 回目と 2 回目および 5 回目の比較であり、赤い部分は 1 回目の方が賦活していることを示している。グループ 2 の操作者 F、グループ 3 の操作者 K、およびグループ 3 の操作者 L の 1 回目と 5 回目の比較では運動野の大半が 1 回目の方が賦活していることから、全体の結果と同様であることを示している。一方で、グループ 3 の操作者 L の 1 回目と 2 回目の比較のように賦活をしていないことを示す青い部分が半分程度ある結果もあることから、全体の結果と同様の傾向にならない試行があることが示された。

Fig. 15 The topography image of the t-value of each operator in the experiments. Where the part of the topography images is red, the higher brain activity in the day 1 is activated. The black frame indicates the motor area of right side of the body of the topography images.

3・4 運動の様子および脳機能による運動スキルの評価

各操作者の運動の再現性において位置決め作業のみの習熟作業を行ったグループ 1 と追従作業のみの習熟作業を行ったグループ 2 に有意差はなく、位置決め作業と追従作業の複合作業を行ったグループ 3 が最も再現性が高いことが示唆される。また、操作者間の運動の再現性において 1 回目ではグループ 3、グループ 2、グループ 1 の順番に再現性が高く、2 回目以降ではグループ 1 とグループ 2 に有意差はなく、グループ 3 は最も再現性が高いことが示唆される。これらにより、各操作者および操作者間の再現性を高めるためには目標となる運動を提示するだけでなく、運動を提示した上で習熟作業後の作業を行う必要があると考えられる。

グループ1は運動野が実験日5日分に渡り同様の賦活状態を示していることから、全ての実験日において運動野を賦活させながら作業を行っているとは推測できる。このことから、以前の実験において経験した運動に対する慣れや習熟が得られておらず、毎回、高次的な脳機能を働かせることで運動に対応している可能性が示唆される。グループ2は2回目以降の運動野の賦活が低下することから2回目以降は運動に慣れ、意識せずに操作していることがわかる。グループ3は運動野が徐々に賦活が下がっていることから、徐々に運動に慣れ、意識せずに協調作業を行うことができていることがわかる。

以上のことから、位置決め作業と追従作業の複合作業を習熟作業と設定した場合、短期的かつ長期的に運動に慣れた状態で、最も確度の高い操作者群の作成が可能であることを示した。

4. 結 言

操作者および操作者間で並進運動の収斂を評価する方法を示し、練習によって得られる慣れと運動野の関係について評価を行うために、力学的協調位置決め作業に関する実験を行った。

習熟作業後の作業と同様の位置決め作業を習熟した場合、操作者ごとでは同様の運動を行うことはできるが、操作者間で同様の運動を行ってもらう際は、2回以上の習熟作業が必要となる。また、習熟作業の回数を重ねても作業内容を常に意識し、以前の実験において経験した運動に対する慣れや習熟が得られておらず、高次的な脳機能を働かせることで運動に対応している可能性が示唆される。

習熟作業が追従作業である場合、位置決め作業の場合と各操作者に運動スキルに差は見られないが、追従作業により目標となる運動が指定されているため、1回目の習熟作業では位置決め作業の場合より、操作者間で同様の運動を行っている。また、2回目以降では意識せずに運動していると示唆される。

習熟作業が位置決め作業と追従作業の混合作業の場合、追従作業のみ、または位置決め作業のみの習熟作業よりも、各操作者において同様の運動をしており、1回目の習熟作業において操作者間で同様の運動を行っている。また、回数を重ねるごとに意識せずに運動していると示唆される。よって、習熟作業が位置決め作業と追従作業の混合作業の場合、最も確度の高い操作者群の作成が可能であることを示した。

本研究の成果は、ロボットとの協調作業における操作者の運動に関わる習熟ならびに運動スキルと運動野の働きの関連性に関わる知見の一端を明らかにしたことであり、今後、人間と力学的な相互作用を行うシステムが操作者に与える影響の評価・解析や、操作性・生体親和性の高い運動制御法の確立に関わる一助となることが期待される。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号: 24560312) の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- Flash, T. and Hogan, N., The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *Journal of Neuroscience*, Vol.5, No.7 (1985), pp.1688-1703.
- Gomi, H. and Kawato, M., Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement, *Biological Cybernetics*, Vol.76, No.3 (1997), pp.163-171.
- 灰田宗孝, 脳機能計測における光トポグラフィ信号の意味, *MEDIX*, No.36 (2002), pp.17-21.
- Hogan, N., Impedance control: an approach to manipulation, Part I-III, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, Vol. 107 (1985), pp.1-24.
- Hong, Z. T., Nathaniel, I. D., G. Lee, B. and Mandayam, A. S., Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: the roles of force and work cues, *Perception and Psychophysics*, Vol.57, No.4 (1995), pp.495-510.
- 池浦良淳, 人間とロボットによる協調作業, システム/制御/情報, Vol.44, No.12 (2000), pp.682-687.
- 池浦良淳, 森口智貴, 水谷一樹, 人間どうしの協調運動における腕の可変インピーダンス特性とロボット制御へ

の適用, 日本機械学会論文集C編, Vol.73, No.2 (2007), pp.251–257.

- 金森直希, 田中孝之, 田中一男, 力触覚インターフェースにおける操作感の主観評価, 日本機械学会論文集C編, Vol.68, No.669 (2002), pp.1467–1473.
- Kazerooni, H., Human-robot interaction via the transfer of power and information signals, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol.20, No.2 (1990), pp.450–463.
- 小林秀明, 池浦良淳, 猪岡光, 追従制御における操作性の筋電位を用いた評価, 人間工学, Vol.34, No.2 (1998), pp.89–95.
- 牧敦, 山下優一, 伊藤嘉敏, 渡邊英寿, 小泉英明, 無侵襲高次脳機能計測方法の開発, 電子情報通信学会, Vol.J79-A, No.2 (1996), pp.150–157.
- 大西仁, 林大作, 中村直人, 望月要, 弾性はいかに知覚されるか?, 電子情報通信学会, HIP2008-115 (2008), pp.147–152.
- Rahman, M. M., Ikeura, R. and Mizutani, K., Investigation of the impedance characteristic of human arm for development of robots to cooperate with human, JSME International journal Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.45, No.2 (2002), pp.510–518.
- Shadmehr, R. and Brashers-Krug, T., Functional stages in the formation of human long-term motor memory, The Journal of Neuroscience, Vol.17, No.1 (1997), pp.409–419.
- 高橋雄太, 戸田真志, 櫻沢繁, 秋田純一, 近藤一晃, 中村祐一, 表面筋電位を用いた拮抗筋のばらつきによるスキル評価方法, 電子情報通信学会, Vol.110, No.457 (2011), pp.183–187.
- 辻敏夫, 加藤荘志, 金子真, 人間-ロボット系の追従制御特性, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000), pp.285–291.
- 辻敏夫, 島崎知之, 金子真, ロボットインピーダンスに対する人間の知覚能力の解析, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.2 (2002), pp.180–186.
- Tsumugiwa, T., Yokogawa, R. and Yoshida, K., Stability analysis for impedance control of robot in human-robot cooperative task system, Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, Vol.1, No.1 (2007), pp.113–121.

References

- Flash, T. and Hogan, N., The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, Journal of Neuroscience, Vol.5, No.7 (1985), pp.1688–1703.
- Gomi, H. and Kawato, M., Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement, Biological Cybernetics, Vol.76, No.3 (1997), pp.163–171.
- Haida, M., Implication of a signal from brain optical topography, MEDIX, No.36 (2002), pp.17–21 (in Japanese).
- Hogan, N., Impedance control: an approach to manipulation, Part I-III, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol. 107 (1985), pp.1–24.
- Hong, Z. T., Nathaniel, I. D., G. Lee, B. and Mandayam, A. S., Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: the roles of force and work cues, Perception and Psychophysics, Vol.57, No.4 (1995), pp.495–510.
- Ikeura, R., Cooperative task by human and robot, The Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol.44, No.12 (2000), pp.682–687 (in Japanese).
- Ikeura, R., Moriguchi, T. and Mizutani, K., Variable impedance characteristics of human arms in cooperative motion by two humans and its application to the control of a robot, Transactions of the JSME Series C, Vol.73, No.2 (2007), pp.251–257 (in Japanese).
- Kanamori, N., Tanaka, T. and Tanaka, K., Subjective evaluation of operating feeling in a haptic interface, Transactions of the JSME Series C, Vol.68, No.669 (2002), pp.1467–1473 (in Japanese).
- Kazerooni, H., Human-robot interaction via the transfer of power and information signals, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol.20, No.2 (1990), pp.450–463.

- Kobayashi, H., Ikeura, R. and Inooka, H., Evaluation of maneuverability using electromyography in manual tracking control, Japan Ergonomics Society, Vol.34, No.2 (1998), pp.89–95 (in Japanese).
- Maki, A., Yamashita, Y., Ito, Y., Watanabe, E. and Koizumi, H., Development of noninvasive measurement modality for human brain, Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers, Vol.J79-A, No.2 (1996), pp.150–157 (in Japanese).
- Onishi, H., Hayashi, D., Nakamura, N. and Moshizuki K., Haptic perception of elastic stiffness, IEICE Technical Report, HIP2008-115 (2008), pp.147–152 (in Japanese).
- Rahman, M. M., Ikeura, R. and Mizutani, K., Investigation of the impedance characteristic of human arm for development of robots to cooperate with human, JSME International journal Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol.45, No.2 (2002), pp.510–518.
- Shadmehr, R. and Brashers-Krug, T., Functional stages in the formation of human long-term motor memory, The Journal of Neuroscience, Vol.17, No.1 (1997), pp.409–419.
- Takahashi, Y., Toda, M., Sakurazawa, S., Akita, J., Kondo, K. and Nakamura Y., Skill evaluation method based on variability of antagonism of EMG, Vol.110, No.457 (2011), pp.183–187 (in Japanese).
- Tsuji, T., Kato, T. and Kaneko, M., Tracking control properties of human-robot systems, Journal of RSJ, Vol.18, No.2 (2000), pp.285–291 (in Japanese).
- Tsuji, T., Shimazaki, T. and Kaneko, M., Analysis of human perception ability for robot impedance, Journal of RSJ, Vol.20, No.2 (2002), pp.180–186 (in Japanese).
- Tsumugiwa, T., Yokogawa, R. and Yoshida, K., Stability Analysis for impedance control of robot in human-robot cooperative task system, Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, Vol.1, No.1 (2007), pp.113–121.