【論文】

仮想環境を用いた筋電義手訓練システムにおけるタスク難易度調整の効果

Effect of Task Difficulty Adjustment in Operation Training of Myoelectric Prosthetic Hand using Virtual Environment

竹内豊計^{* **}(正会員), 和田隆広^{*}(正会員), 向原真斗^{*}(非会員), 土居俊一^{*}(非会員),
Toyokazu Takeuchi^{* **} Takahiro Wada^{*}, Masato Mukoubaru^{*}, and Shun'ichi Doi^{*}

Abstract

Myoelectric prosthetic hands improve ADL largely because the hand uses EMG signal induced by voluntary contraction of residual muscles of amputees for opening and closing the hand and the amputees can control its motion intuitively. On the other hand, it is difficult for the amputees to gain skills to use the prosthesis including precise EMG control ability required to control the prosthesis. In this paper, a new training system of Myoelectric prosthetic hand for upper limb amputees is developed using virtual reality technology in which amputee can train in the virtual environment. We hypothesize that efficacy of training depends on difficulty of given task. Thus, we propose a new training method that controls the success rate of given tasks by changing difficulty of the task in the virtual environment based on the trainee's skill level. The experimental results will show that the proposed method can control success rate of the given task by changing task difficulty according to the user's skill level. Further, it is shown that the success rate of the given task increases when the task difficulty is adjusted by the proposed training method.

Key Words

EMG Prosthetic Hand, Task Difficulty Adjustment, Virtual Environment, Training System

1. はじめに

筋電義手は、切断肢の残された筋肉を随意的に収縮させ筋電位を取り出し、モーターでハンドの開閉動作を行う義手である。他の能動義手より把持力は強力であり、ハンド開閉のためのハーネス等の必要もなくなる。そのため切断者の日常生活動作向上及び生活の質(QOL)の向上に有用である。[1]. その一方で、利用者が筋電義手をコントロールするため

には、実行するタスクに応じて筋電位を正確に出力するといった、筋電位制御能力の獲得訓練が必要である。また切断者は実際に筋電義手を製作し、訓練後でないと筋電義手の有用性を理解しにくいという問題もある。

現在、臨床現場においては、以下のような方法で筋電義手の処方と訓練が行われている[2]。まずオリエンテーションと断端等の評価を行った後に、実際に筋電義手のハンドの貸出を行い、仮筋電義手を製作する。施設内において義手操作訓練を行った後に自宅での使用を試みる。この方法は筋電義手に精通した医師、セラピスト、義肢装具士のチームアプローチによってなされている。また訓練結果の評価はセラピストの経験によるところが大きい。そのため、筋電義手の普及にはより簡便に、客観的に訓練、評価ができる手法が望まれている。

このような背景から、近年仮想環境を利用した筋電義手訓練が多く研究されている。仮想筋電義手訓練システムでは、実際の義手を用いることなくコンピュータ上で利用可能なこと

2010年5月6日受理

2011年6月16日最終原稿受理

* 香川大学工学部, 香川県高松市林町 2217-20

** 株式会社オルトリハ・システム, 香川県木田郡三木町池戸 1551-6

* Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu Kagawa JAPAN

** Orthoreha System Co., Ltd., 1551-6 Ikenobe Miki-cho Kita-gun Kagawa JAPAN

から簡便に訓練ができ、客観的かつ多様な評価ができると期待される。たとえば MyoBoy®は商品化された筋電義手訓練システムである[3]。筋電義手製作の際に筋電位の導出が可能か否かの判定に用いたり、その後の筋電義手操作訓練に使用でき、モニター上で小児の使用を考慮しゲームのような機能を持たせたり、ハンドを描写し開閉および回内外を視覚的に確認できるようになっている。ただし、Otto Bock 社製の筋電義手システムの訓練専用である。Lovely et al.[4]は、ビデオゲームの要素を取り入れてモチベーションを維持する訓練手法システムを同様に提案している。またこのような訓練システムにおいて、利用者の制御能力を指標化する研究も行われている。例えば Dupont et al.[5]は、コンピュータグラフィックスで描画された画面上の義手を用いて行う訓練システムを提案し、画面内の義手ハンドの開度の制御性能や時間応答などから制御能力の指標化に取り組んでいる。最近では大里[6]らは仮想環境を用いた訓練装置における視覚呈示の影響を詳細に調査すると共に、訓練効果の指標化を試みている。また、より複雑な筋電位制御能力の訓練を目的とし、辻ら[7]は多チャンネルの筋電位による筋電操作トレーニングシステムを提案している。なお多様な個人毎のスキルの差異をどのように訓練に反映するかを検討した研究は見当たらない。

本研究では、筋電位の導出訓練及び分離訓練を終了したものを対象とする。このような対象者においては個々人の能力に対応した難易度の訓練タスクを課すことにより、訓練効果が向上すると考える。そこで個々人の筋電位制御能力を把握し、タスク難易度を調整する訓練手法を提案する。タスクの難易度がスキル上昇に応じて変化するため、継続利用の効果も期待できる。本論文ではまず、基本的な筋電位出力の能力を有した切断者を対象とし、日常生活によく見られる物体のピックアンドプレースタスクを行う仮想筋電義手訓練システムを開発する。また、利用者の筋電位制御能力に応じて最大許容力を変化させることによってタスク難易度を調整する訓練手法を導入し、実験により訓練効果に及ぼす影響を調査する。

2. 仮想筋電義手システム

2.1. システム構成

本研究では Fig. 1, 2 に示すような仮想筋電義手システムを開発した。本システムは切断者の筋電位信号と上肢の姿勢を入力として仮想空間内の義手の開閉速度／把持力と上肢の姿勢を制御し、仮想空間内で把持動作訓練が可能なシステムである。

Fig.1. 仮想筋電義手訓練システム

Fig.2. システム構成図

表面筋電位信号は、生体アンプ (Otto Bock 社製 MYOBOCK®Electrode, linear 13E200=60) を用いて取得する。取得した筋電位 (EMG) を A/D 変換しサンプリング周波数 60Hz にて計算機に取り込む。上肢の姿勢はゴニオメータ (Penny&Giles 社製) で計測し、A/D 変換を行い計算機に取り込む。なおゴニオメータで計測した肘姿勢に比例して、仮想空間内のハンドが上下する。これらの入力信号に基づき、仮想空間内において義手で対象物を把持し、上下移動することが可能である。表面筋電位信号は前腕の背屈筋群と掌屈筋群の2箇所計測している。各々の筋電位にハンドの開、閉の動作が割り当てられている。

視覚ディスプレイ中には、机と正方形の対象物および、2本の指に簡略化されたバーチャルハンドが表示されている。筋電位入力により、バーチャルハンドが開閉される。また、適切な把持力の状態において、肘に取り付けられたゴニオメータが肘屈曲を検出すると対象物を把持した状態で持ち上げられる。なお対象物は、最大許容力を超えた握力が加わると赤色へ変わり、破壊されたことを示す。

本システムでは筋電位の大きさによって連続的に開閉速度や把持力を制御できるいわゆる比例制御式義手を想定する。ここでは簡便なモデルを利用することを考え、例として MYOBOCK ハンドの静特性を予備実験にて解析した。その結果に基づいて、筋電位入力に対するハンド開閉速度および把持力応答を以下のようにモデル化した。まず、筋電位入力に対するハンド開閉速度 $\dot{\theta}(t)$ ($\dot{\theta}(t) > 0$ は開方向) は式 (1) によってモデル化される。

$$\dot{\theta}(t) = \begin{cases} ax_1^2 & (x_1 - x_2 \leq \varepsilon) \\ -ax_2^2 & (x_1 - x_2 \geq \varepsilon) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (1)$$

ここに x_1, x_2 はそれぞれ、生体アンプから得られる平滑化された掌屈筋群、背屈筋群の表面筋電信号を表している。また a は正定数、 ε は不感帯を設けるための微小値である。

またハンドと物体が接触している場合における、ハンドの把持力 $F(t)$ は以下の式(2)によってモデル化する。なお本論文では、把持力を強める方向を主として扱うため把持力を弱めるといったハンドの動作はモデルに含まれない。

$$F(t) = \begin{cases} b(\max\{x_1(\tau)\})^2, & \tau \in [t_c, t] \quad (x_1(t) \geq x_2(t)) \\ 0 & (x_1(t) < x_2(t)) \end{cases} \quad (2)$$

ここに b は正定数、 t_c はハンドと対象物が触れ始めた時刻を表わしている。

Fig.3 は筋電位と算出された把持力の例である。対象物に触れているのは約2秒から筋肉2が収縮する12秒までの間である。式(2)の把持力の定義から、把持力は筋電位の最大値で保持される。

Fig.3. 筋電位と把持力の関係

Fig.4に本システムにおけるピックアンドプレースタスクのフローチャートを示す。なお把持力制御がタスクの成否を決定しているため、この図では把持力判定部に対して詳述している。訓練開始時、対象物は机面上に置かれている。また、ハンドは対象物と同じ高さであり、ハンドの間に配置された状態から訓練がスタートする。この状態において掌屈筋群のEMGが入力されることによって仮想環境内のハンドが閉じられ物体と接触する。その後、把持力の判定を行い、把持力が $F \in [F_{\min}, F_{\max}]$ の範囲に収まっている場合には持ち上げ可能状態となる。不等式 $F < F_{\min}$ が成立する場合にゴニオメータからの訓練者の持ち上げ意図を検出すると対象物はハンドから滑り落ちる。また $F > F_{\max}$ の場合には対象物は破壊され

る。この対象物の持ち上げ状態においても把持力判定を行い、物体の落下および破壊の可能性がある。再び訓練者の操作によって対象物が机面上に戻された後、背屈筋群のEMGが入力されるとハンドが対象物から離れる。

Fig.4 ピックアンドプレースタスクの手順

2.2.タスク難易度調整による訓練手法

仮想環境内の対象物として脆い物を想定する。訓練者は、ピックアンドプレースタスクにおいて、把持力をある特定の範囲内 $F \in [F_{\min}, F_{\max}]$ にコントロールする必要がある。そのため、筋電位をある範囲内にコントロールする必要がある。

ここで、筋電義手における筋電位制御能力向上について考える。義手には通常、握力や触覚のフィードバックは無いため、使用者は物体を落したり、壊したりといった失敗と、成功の結果を見て、はじめて筋電位出力指令が変更される。そのため、訓練においてもタスクの成功率が訓練効果に大きな影響を及ぼすと考えられる。

そこで本研究では、訓練者の筋電位制御能力を評価し、能力に応じたタスク難易度を設定する訓練手法を提案する。例えば、訓練者の握力を $F \in [F_{\min}, F_{\max}]$ の範囲で維持することが難しく、把持力が $F_{\max}$ より大きい場合、最大許容力を、式(3)のように仮想環境内でより高く設定することとする。

$$F_{\max}^{\text{ad}} = F_{\max} + \Delta \quad (3)$$

ここで $F_{\max}^{\text{ad}}$ は変更後の物体の最大許容力であり、 Δ は対象物の最大許容力の補正值の大きさを表す。つまり Δ が大きいとタスク難易度は下がる。 Δ は訓練者の現段階のスキルに基づいて決定され、 Δ を変化させることによって、訓練タスクの成功率を適切に変化させることができると期待される。

3. 訓練手法の検証実験

3.1. 実験タスク

実験参加者は立位において、仮想環境内にある机上の対象物を把持し、肘の屈曲の最大角度まで持ち上げ、約 3 秒間この姿勢を維持し机上に戻すタスクを課された。本実験では、対象物を落下させたり、破壊させると失敗とした。対象物に設定した最大許容力以上の把持力を出力すると対象物が赤色に変化し対象物が破壊されたことを視覚的に表示する。

3.2. 実験条件

Table.1 に示されるように、タスク難易度調節条件（以下、TDA 条件）とタスクの難易度を変更しない条件（以下、control 条件）の 2 つの実験条件を設定した。訓練は以下の I 期から III 期の 3 フェーズに分けて実施した。なおタスク難易度には $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ の両方が関連すると考えられるが、予備実験の結果 $F_{\max}$ を越えることによる失敗が多かったため、ここでは $F_{\max}$ のみを変更することとした。

Table.1. 訓練フェーズ

		Term I (Trial 1-7)	Term II (8-17)	Term III (18-27)
TDA condition	$F_{\max}^{\text{ad}}$ [kgf]	0.8	F_{med}	0.8
	$F_{\min}$ [kgf]	0.5		
Control condition	$F_{\max}$ [kgf]	0.8		
	$F_{\min}$ [kgf]	0.5		

I 期： 7 試行あり、被験者のスキルを調査する。個人スキルを表す指標として、ここでは各試行における最大把持力の、全試行における中央値 F_{med} を導入する。つまり、この F_{med} が小さいほど筋電位制御能力が高く微妙な操作ができると考えた。

II 期： TDA 条件では、I 期で調査した個人スキルに基づいてタスクの難易度を変化させる。I 期で求めた F_{med} を、把持する物体の最大許容力に設定し、訓練を行った。つまり、式 (4) の補正值 Δ を、以下のように決定した。

$$\Delta = F_{\text{med}} - F_{\max} \quad (4)$$

この条件で 10 試行の訓練を行う。なお、control 条件では II 期であっても $\Delta=0$ とした。

III 期： 10 試行あり、訓練の効果を検証する。

I 期、III 期では個人スキルを評価するために下限 $F_{\min}=0.5\text{kgf}$ 、上限 $F_{\max}=0.8\text{kgf}$ (control 条件と同条件) でタスクを実行した。

実験参加者は、本研究に関与しない大学生、大学院生から募った 20～23 歳の健康男性であり、TDA 条件 7 名 (被験者 A～G)、control 条件 3 名 (被験者 H～J) であった。なお被験者には実験内容を十分説明し、同意を得たうえで実施した。

3.3. 実験結果

実験においての傾向を以下に示す。TDA 条件では、第 I 期では筋電位の出しすぎによる対象物の破損の傾向が多く見られた。第 II 期では、対象物持ち上げ状態の間に対象物が落下するケースが散見された。第 III 期においては、対象物を把持できない状態で義手を挙上しようとする場面がみられた。一方 control 軍においては、全期において対象物の破損が多かった。

Fig.5 に TDA 条件の I 期と III 期における最大把持力の分布を示す。訓練前の I 期は広範囲に分布しているのに対して、訓練後の III 期では分布が比較的狭くなり、0.8kgf の周辺への分布が増加し、把持力が大きな領域における頻度が低くなった。これより、訓練の効果により、許容把持力周辺に把持力の分布が移行したことがうかがえる。

(a) Term I

(b) Term III

Fig.5 TDA 条件での最大把持力の分布

Fig.6 に、TDA 条件と control 条件の I 期から III 期までのタスク成功率を示す。被験者が I 期での成功率が低く、被験者に十分なスキルが無いことを示している。II 期では、control 条件の被験者に比べて、TDA 条件の被験者の成功率が高くなっており、仮想空間内の対象物の最大許容力が増加することによってタスク難易度が下がった効果である。ま

たⅢ期では TDA 条件での成功率が control 条件よりも高くなっている。なお実験参加者 A などⅠ期の成功率が低い参加者ではⅢ期での成功率も大きくならなかった。これは第Ⅰ期、Ⅲ期と、第Ⅱ期の難易度が大幅に異なるため、Ⅱ期での訓練効果が十分にⅢ期に現れない可能性を示唆するものである。この点はスキル調査手法などに関わる重要な問題であり、今後の課題である。なお control 群の実験参加者 H, I においてⅡ期の成功率が上昇したが、Ⅲ期に低下した。この明確な理由は特定できないが、高難易度タスク実行による疲労の影響も一因と推察される。つまり、タスク難易度設定を行わない条件で、難易度が非常に高い筋電位出力制御を継続的に実施し、参加者は負担を強いられしていると仮定する。これによりⅢ期では疲労によってタスク成功率が低下した可能性がある。ただし本論文ではタスク難易度と負担や疲労の関係については対象としないこととする。

Fig.6. 参加者毎の成功率の変化 (TDA vs Control)

Fig.7. Ⅱ期の成功率 (TDA vs Control)

Fig.7 にⅡ期の成功率の全実験参加者の平均値を示す。TDA 条件の成功率が control 条件よりも有意に高い (Mann-Whitney U 検定, $p<0.05$)。つまり、提案するタスク難易度調整手法により、訓練中のタスク成功率が有意に変化できることが示されている。なお、第3期と第1期の成功率の差が訓練による筋電位制御の能力の向上を表すと考える。そこで式(5)によって定義される成功率増加量を訓練条件毎に比較した結果を Fig8 に示す。

$$(\text{成功率増加量}) = (\text{Ⅲ期成功率}) - (\text{Ⅰ期成功率}) \quad (5)$$

TDA 条件で有意に成功率増加量が大きくなった (Mann-Whitney U 検定, $p<0.05$)。つまり提案するタスク難易度調整に基づく訓練手法により、筋電位制御能力の訓練効果が高まった。

Fig.8. 成功率増加量 (TDA vs Control)

4. タスク難易度の訓練効果への影響

4.1. 実験条件

実験条件は第3節と同様である。ただしタスク難易度が訓練効果に及ぼす影響を調査するため、Ⅱ期における補正值 Δ について、以下の4条件設けた。

- 1) base 条件: 補正值 Δ は第3節の実験の TDA 条件と同じであり、Ⅰ期の最大把持力の中央値で決定される(式(4))。
- 2) 1/2 条件: 補正值 Δ は base 条件の半分である。つまり、 $\Delta = (F_{\text{med}} - F_{\text{max}})/2$ である。
- 3) 2 倍条件: 補正值 Δ は base 条件の2倍である。つまり、 $\Delta = 2(F_{\text{med}} - F_{\text{max}})$ である。
- 4) control 条件: 補正值 $\Delta = 0$ である。

実験参加者は本研究に関与しない大学生、大学院生から募った 20~23 歳の健常男性であり、base 条件10人、1/2条件3人、2倍条件3人、control 条件3人であった。なお実験参加者には実験内容を十分説明し、同意を得たうえで実施した。

4.2. 実験結果

Fig.9 にⅡ期におけるタスク成功率を示す。Mann-Whitney の U 検定の結果、base 条件と2倍条件の成功率は1/2条件と control 条件の成功率よりも有意に高かった($p<0.05$)。これらの結果から、Ⅱ期の成功率はタスクの難易度、つまり、補正量を変化させることによってコントロールすることが可能であると考えられる。

Fig.10 にⅠ期に対するⅢ期の成功率の増加量を示す。成功率はbase条件で最も増加している。一方、1/2条件では成功率の増加は見られない。Mann-Whitney の U 検定の結果、base 条件が他の1/2条件、2倍条件、control 条件よりも有意に($p<0.05$)成功率が増加した。

Fig.9. タスク難易度毎のⅡ期の成功率

Fig.10. タスク難易度毎の成功率増加量

Fig.11. Ⅱ期の成功率と ΔF_{med} の減少量

Fig.11 はⅡ期の成功率と、Ⅰ期とⅢ期における F_{med} の差 ΔF_{med} 、つまりスキル上昇度合いの関係を示している。図より、特にⅡ期の成功率が 60～80%あたりで、 ΔF_{med} が増加している。またⅡ期の成功率が 80%を超えるとスキル上達度合いが減少している。これらから、Ⅱ期の成功率が 60～80%付近が最も訓練に効果的であると考えられる。

以上の結果から、補正量がトレーニング効果に大きな影響を及ぼし、base 条件が 3 条件の中で最も効果的であることが示された。つまり、訓練者に適した調節量は訓練効果を高めるために重要であると考えられ、最大把持力の中央値を利

用して難易度を設定した base 条件は個人のスキルを反映し、訓練に設定する難易度として適切であると示唆される。

5. 長期訓練実験による訓練効果の検証

5.1.実験方法

提案する手法に基づく訓練を 5 日間連続して行った際の訓練効果を調査した。実験条件は第4節と同様であり、毎日 Term I, II, III を繰り返して行った。実験参加者は本研究に関与しない 20 から 24 歳の健康男子大学生、院生であり、base 条件、1/2 条件、2 倍条件それぞれに対して 3 名ずつであった。なお参加者には実験内容を十分説明し、同意を得たうえで実施した。

5.2.実験結果

Fig.12 にⅡ期におけるタスク成功率を示す。Mann-Whitney の U 検定の結果、訓練条件間で有意な差が認められた。Base 条件は、2 倍条件および 1/2twice 条件と比較し、有意にⅡ期成功率が高かった ($p<0.05$, $p<0.001$)。また 2 倍条件における成功率は 1/2条件よりも高かった ($p<0.001$)。つまり、訓練中のタスク難易度は訓練条件を変化させることによって適切に変化できた。なお、Ⅱ期成功率は訓練日数による差が認められなかった。これは、毎日Ⅰ期にてスキルに応じたタスク難易度の設定しているためと考えられる。

Fig.12. 長期訓練におけるⅡ期成功率

Fig.13 に、式(6)で定義される成功率増加量を示す。これは初日訓練前の状態を基準とした、各日の訓練後の成功率増加量である。

(成功率増加量)

$$= (\text{各日のⅢ期成功率}) - (\text{初日のⅠ期成功率}) \quad (6)$$

訓練が進むにつれ、Ⅲ期の成功率が上昇していることが見て取れる。1日目のⅠ期を基準とした5日目Ⅲ期成功率は、初日Ⅲ期の成功率と比較して有意に増加した

Fig.13. 長期訓練における成功率増加量

(Mann-Whitney U 検定, $p < 0.01$). なお, 訓練条件間について統計的有意差は認められなかったが, 5日目においてⅢ期の成功率増加は, base 条件が最も高い傾向が見受けられた。

6. まとめ

筋電義手操作における筋電位制御能力の効果的な訓練を目的とし, 仮想環境を用いた訓練システムを開発した。

本論文では個人のスキルを調査するⅠ期, 訓練効果を検証するⅢ期において, F_{max} と F_{min} を一定とした。より幅広いスキルレベルのユーザを対象とするには, この数値の設定についても個人毎に変更するなどの, 検討が必要と考えられ, 今後の課題である。またタスク難易度設定はタスク実行中の筋疲労にも影響すると考えられるため, 疲労と訓練効果の関係性について調査することも今後の課題である。利用者の筋電位制御能力を把握し, 能力に応じてタスク難易度を調整する訓練手法を提案した。実験結果から, タスク難易度調整に基づく訓練手法により, 訓練タスクの成功率が適切に制御され, 被験者の筋電位制御能力が効果的に向上することが示された。なおタスク難易度は, Ⅰ期における把持力の中央値を用いるのが効果的であった。さらに提案手法の有効性は長期訓練においても認められた。

本システムでは, 感覚フィードバックが視覚に制限されるため, 画面上における物体の持ち上げ成功や, 物体破壊, 落下による失敗など, タスクの正否が, 筋電位制御能力訓練に利用できる情報となる。したがって, タスクの難易度が重要な役割を果たすという結果を得た。一方, 実際の筋電義手操作においては把持による義手の重さ変化などの力覚, 触覚情報も訓練に用いることができ, 視覚のみによる訓練とは異なる作業戦略を獲得する可能性があるものの, そのような状況においても視覚フィードバックは不可欠であることから, 本実験の結果は重要な知見であると考ええる。

今後の重要な課題として, 本手法で得られた訓練効果が, 筋電義手利用のスキル向上にどの程度寄与するかを調査する必要がある。また, 物体持ち上げによる重量変化などの力覚を加味したシステムを構築し, 訓練効果を検証することも

今後の課題である。さらに, 筋電位を分離して出力するといった, 義手を扱うための他の基本的なスキルに対する, 提案訓練手法の適用可能性を検証し, 提案システムの有用性拡大を図る。

参考文献

- [1] 大庭潤平, 陳隆明, 他, “片側前腕切断者における筋電義手と能動義手の作業能力の比較”, 総合リハ, Vol.34, No.7, pp.673-679, 2006
- [2] 陳隆明, “筋電義手訓練マニュアル”, 全日本病院出版会, 2006
- [3] Otto Bock web page, www.ottobockus.com/
- [4] Lovely, D.F., Stocker, D., Scott, R.N., “A Computer-aided Myoelectric Training System for Young Upper Limb Amputees”, Journal of Microcomputer Applications, Vol.13, pp.245-259, 1990
- [5] Dupont, A.C., Morin, E.L., A Myoelectric Control Evaluation and Trainer System, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol.2, No.2, pp.100-107, 1994
- [6] 大里 真一, 大西 謙吾, “筋電位制御式義手の訓練における視覚提示情報の効果”, 第 7 回生活支援工学系学会連合大会予稿集, 2009
- [7] 辻敏夫, 福田修, 大塚彰, 金子真, “義手制御を目的とした筋電操作トレーニングシステム”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D-II, No.10, pp.2030-2039, 2000