掌面の接触状態遷移を用いた物体操作の慣れと疲れの評価*

近 藤 誠 宏^{*1}, 上 田 淳^{*2}
松 本 吉 央^{*1}, 小 笠 原 司^{*2}Evaluation of Manipulative Familiarization and Fatigue Using
Contact State Transition on Palm SurfaceMasahiro KONDO, Jun UEDA,
Yoshio MATSUMOTO and Tsukasa OGASAWARA^{*3}^{*3} Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology,
8916-5 Takayama-cho, Ikoma-shi, Nara, 630-0192 Japan

In this research, we propose a method for generating a template used for the recognition of manipulation in consideration of the familiarization and the fatigue. We made a system that can evaluate a quantitative comparison of the similarity among manipulations performed by observing the contact state transition on the palm surface. This system can detect the contact state on the palm surface by attaching a tactile sensor sheet on the manipulated object. In the experiment, the familiarization and the fatigue are detected by measuring the variance of manipulation. The experimental result indicates that manipulation is able to be divided into three terms, which are the proficiency process, the familiarization and the fatigue. It is also indicated that the variation of the manipulation becomes small when the template is generated by the manipulation data in the familiarization term.

Key Words: Manipulation, Teaching, Fatigue, Familiarization, Tactile Sensor

1. は じ め に

多指多関節を持つロボットハンドは構造が複雑であるため、ティーチングプレイバックやタスクプログラミングに代表される従来の単純な教示法の適用は困難である。そこで人間の動作の観察から多指ハンドの教示入力を行う手法が提案されている⁽¹⁾。この直接教示入力は多関節の入力を直感的に、かつ一度で行えるため多指ハンドの入力手法として有効である。しかし、教示者の手と多指ハンドの間に構造上の差がある場合、単純な教示データの転送では作業を正確に遂行できない。そのため、操作認識により抽象的な操作の情報を取得し、そこから動作計画を立てる手法が求められる。操作認識は一般的に予め操作のテンプレートを用意し、操作者の入力と比較することで行なう。正確な認識のために、操作の詳細な特性を解析し、テンプレートを生成することは重要な課題である。人は物体操作に対し慣れや疲れが生じるため、操作の進行に従い操作方針やそのばらつき度合いが変化する。よって、慣れや疲れによる変化を考慮したテンプレートの生成が必要である。

人間の日常操作では、物体把握後に環境に接触させることなく指の動きや掌を利用して把握変更や物体姿勢位置の調節を行なっている。このような操作は“手内操作 (In-hand manipulation)”と呼称され、操作の形態として定義されている⁽¹¹⁾。例えば、片方に打撃面、片方に釘抜きを持つネールハンマーは手内操作によって持ち替えることで二つの機能を切替えている。携帯電話ではボタン操作と通話で把握位置が異なり、手内操作で持ち替える必要がある。上記の持ち替え作業はピックアッププレースの組み合わせでも実現可能である。しかし、人間は作業環境の制限や作業時間短縮のために手内操作を選択していると考えられる。

手指で行なう操作の慣れや疲れに関する研究はいくつか報告されている。Liu ら⁽³⁾は筋肉疲労と脳の活動の関係を調べ、疲労が増加すると作業を維持する意思がより強くなることを示した。Lin ら⁽⁴⁾はタイピング作業における腕の複数の筋肉疲労を計測し、指の屈曲よりも伸展の方が腕の疲労が大きいことを示した。また、田口ら⁽⁵⁾は円筒回転させる繰り返しタスクについて解析を行い、慣れによって運動制御がフィードバックからフィードフォワードへ移行するとの考察を得ている。これらの研究では、慣れや疲れ及びそれに伴う現象を確認しているに過ぎず、現れた特徴を考慮してテンプレートを生成し、認識等に生かす試みはなされ

* 原稿受付 2005 年 9 月 26 日。

^{*1} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (〒630-0192 生駒市高山町 8916-5)。^{*2} 正員。奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科。
E-mail: ogasawar@is.naist.jp

Fig. 1 Operation measurement system

ていない。

一方、従来の操作認識の研究では、VR 環境内で仮想の被把握物体を用いて作業を行う多指ハンドの教示システムが報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、多眼のカメラを用いて物体や手の位置姿勢を測定して操作を観察する研究も行われている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。これらの研究では一つの操作に対するテンプレートが固定であり、慣れや疲れによる操作の変化は一切考慮していない。また、これらはピックアンドブレスやペグインホール等の単純なタスクを対象としている。手内操作等の複雑な操作の認識にはより詳細な操作の解析からテンプレートを生成することが必要となる。

前報⁽²⁾では、掌面の接触状態遷移を観察することで操作の特徴を検出するシステムを構築した。また、連続 DP マッチングを用いることで、教示者が行った操作の接触状態遷移パターン間の類似性を定量的に評価する手法を提案した。本論文では、慣れや疲れを考慮した操作認識のテンプレートを生成することを提案する。まず、操作認識システムを用いて時間の経過に伴う操作の分散の変化を計測し、被験者の操作に対する慣れや疲れの検出を行う。そして、操作を習熟・慣れ・疲れの3つの時間帯に分割し、各時間帯毎に3つのテンプレートを生成することで入力操作との相関を計測し考察する。その結果、慣れの区間から生成されたテンプレートを用いるのが最も有効であることを示す。本論文の対象タスクは手内操作とする。ただし、1つの被操作物体を用いた片手での操作を対象とする。また、操作中に掌面の接触状態が変化し、かつ手の姿勢の変化が伴うことを前提としている。例えば、指の接触状態を変化させず、把持力だけを変化させる動作は対象としない。

2. 作業計測システム

掌面の接触状態遷移を観察する手法として、掌面全体に圧力分布センサを貼り付ける方法が考えられる。しかし、この手法では操作中の指の屈曲による圧力分布センサの誤反応が非常に多く発生する。そこで、図1のように被操作物体に圧力分布センサを取り付けるこ

Fig. 2 Simple division of the palm surface

とで掌面の接触状態を計測する作業計測システムを用いる。オペレータは関節角度センサ (CyberGlove) と6軸位置姿勢センサ (Polhemus) を手に装着する。また、被操作物体には圧力分布センサシート (NITTA BIG-MAT quarter) と Polhemus を取り付ける。なお、本稿では円柱物体の側面のみに圧力分布センサを装着するため、手が円柱の上面や底面との接触を伴うような把握及び操作は扱わない。

この作業計測システムを用いて掌面の接触状態を検出する。検出は圧力分布センサから得られる物体の接触点位置と、CyberGlove 及び Polhemus から得られるリンクの位置を比較することで行なわれる。

3. 接触状態遷移の類似性計測

本論文では、片手での手内操作を対象として認識を行うが、考えられる全ての物体形状と操作を扱うことは対象が広過ぎるため困難である。そこで、以下の制限をおいて物体形状と操作方向を限定することで接触状態の数を抑え、提案する認識手法の基礎的特性を確認する。

- (1) 操作物体は円柱とする
- (2) 手が円柱の側面のみに接触する
- (3) 操作中は図2のx軸と円柱軸が常に平行

(3)の制限は操作に伴う物体の運動がy,z軸方向の並進及びx軸周りの回転のみに限定すると言い換えることができる。上記の制限下では、示指～小指の四指の働きが同一となるため詳細に区別する必要性は低いと考える。そこで、四指の末節を一つの領域に統合し、同様に四指の中節と基節についてもそれぞれ統合する。さらに、同様の理由で掌部も上半掌と下半掌にそれぞれ統合する。また、四指のPIP及びDIP関節はほぼ同調して伸展屈曲すると認知されている。2つの関節で1自由度と考えると、中節・基節を区別しても状態遷移の特徴が現れることは少ないと判断し、四指中節・基節を統合する。これらの統合の結果、図2に示す単純な領域分割を用いる。図2の領域a～eはそれぞれ四指末節部、四指中基節部、上半掌部、拇指末節部、下半掌部を表しており、各領域の接触の有無から接触

Fig. 3 All contact states

状態を定義する。図3に本論文で扱う全ての接触状態を示す。図中の各状態番号の右横には掌面の各部位における接触の有無を論理記号で表している。例えば、 a は四指末節部が接触していることを表し、 $\bar{a}$ は接触していないことを表す。また、円柱を把握する手については接触を伴う領域が網掛けで表現されている。同じ接触状態であっても手形状が多少変化することがあるため、各接触状態の手形状は一意に決定しない。図中には手形状の一例が表現されていることに注意されたい。

3.1 連続 DP マッチング 物体操作は接触状態の遷移によって表現される。各タスクの標準的なパターンである認識のためのテンプレートは、始点終点を持つ有限な接触状態列で表される。それに対し、操作者による入力パターンは連続的な接触状態列で入力される。この2つのパターン間の類似度の計測は連続 DP マッチング⁽¹²⁾を用いる。

最新の入力を操作の終端と仮定した入力パターンと

標準パターンとの累積距離を $S(t_s, \tau)$ とし、以下の漸化式で更新する。

$t_s = 1, 2, \dots :$

$$S(t_s, \tau) = \min \begin{cases} S(t_s - 2, \tau - 1) + 2d(t_s - 1, \tau) + d(t_s, \tau) \\ S(t_s - 1, \tau - 1) + 3d(t_s, \tau) \\ S(t_s - 1, \tau - 2) + 3d(t_s, \tau - 1) + 3d(t_s, \tau) \end{cases} \quad (1)$$

ここで t_s, τ はそれぞれ入力、標準パターンのサンプリング時間である。また、 $d(t_s, \tau)$ は入力、標準パターン内の一つの接触状態間を比較した局所的な距離である。これは図3に示す各状態の論理記号を比較し、その差から計算される。上記の漸化式によりパターン間で部分的な伸縮を考慮した最も距離の小さい最適対応が計算される。連続 DP マッチングの出力 $A(t_s)$ は次式で示される。

$$A(t_s) = \frac{S(t_s, T)}{3T} \quad (2)$$

ここで T は標準パターンの状態列の長さである。 $A(t_s)$ は2つのパターン間の distance を表しており、これが小さいほど類似度が高いことを表している。

この手法の利点はパターン内の部分的な伸縮を考慮しながら相関をとることができる点にある。また、全ての標準パターンと入力パターンの間でパターンマッチングと始点位置検出を同時に行うスポッティング認識が可能であるため、本手法の操作認識に適している。

4. 慣れと疲れの検出と解析実験

4.1 実験内容 最初の実験では時間の経過に伴う被験者の慣れや疲れの検出を試みる。被験者に慣れが生じると、操作中はより一定のパターンに近づき、その後に疲れが生じると、一定の操作を維持できなくなると予測できる。よって、検出は操作のばらつきの変化を計測することで行なう。二つ目の実験では慣れや疲れを考慮したテンプレートを生成するために、習熟期間・慣れ・疲れの3つの期間でそれぞれテンプレートを生成し、入力パターンとの比較を行なう。なお被験者は I~V の5人とし、3種類のタスクで行う。各タスクの試行回数は一回とする。また、疲労蓄積による影響を防止するため同一被験者による別タスクの試行は24時間以降に行なう。

連続 DP マッチングで用いるテンプレートは、事前に実験とは別に複数の被験者から操作データを多数取得し、接触状態パターンの平均を計算することで生成している。図4の例は、3つの接触状態パターンから平均を計算している。まず、連続 DP マッチングを用いてパターン間の最適対応を導き出し、結線する。各

Fig. 7 Sequential photographs of tasks

```
Task a :
31 31 31 31 31 31 29 29 29 13 13 13 13 13 15 15 9 9 9 9 9 9 9
Task b :
11 11 11 11 9 9 9 9 13 13 13 13 5 6 7 7 7 7 31 31 31 31 31
Task c :
13 15 13 13 13 15 15 3 11 11 11 11 11 11 9 9 9 9 11 15 15 13 13
```

Fig. 9 Matching error (Task b)

類似度の点について前後それぞれ 10 サンプルの分散を計算した結果を示している。ここで、グラフの y 軸は 2 つのパターンの距離を表しており、この distance が小さくなると類似度は高くなることに注意されたい。図 10(c) 及び図 11(b) はタスク *ab* 及びタスク *c* の長掌筋における筋電図スペクトルの中間周波数の変化を示している。なお、短母指外転筋及び総指伸筋については有意な傾向が見られなかった。

図 10(a) のタスク a の結果を例にとると、操作開始から 35 秒まで分散が大きいことがわかる。本実験のタスクは、日常的に見られる円柱の容易な操作である。円柱の特性、例えば大きさ、重さ、表面等に対して多少の習熟期間は必要だが、被験者は 35 秒程度の短時間で習熟することは可能である。また、この分散はタスクに適した操作戦略を試行錯誤する過程が起因する

Fig. 10 Variation and median frequency (Tasks a and b)

と考察し、被験者の操作は習熟期間にあると考える。

35 秒を経過すると分散は小さくなり、接触状態遷移パターンは一定に収束する。この小さい分散値は 85 秒まで継続され、被験者はこの収束状態を維持し続ける。この時、被験者は操作に対する習熟を終え、タスクに適した操作戦略が継続して実現されていると考察する。図 10(c) はタスク *ab* の筋疲労の推移を示す。操作開始から 50 秒経過すると徐々に中間周波数が低下し、筋疲労が徐々に生じる様子がわかる。筋疲労は増加しつつ、ばらつきの少ない操作戦略を実現していることから、この分散の収束は操作に対する慣れを表していると考察する。

図 10(a) に示す分散変化のグラフでは、時間が 85 秒を経過すると分散が再度大きくなる。この大きい分散

Fig. 11 Variation and median frequency (Task c)

は操作終了まで継続する。被操作物体は 295g の重さを持つため、ほとんどの被験者が少し重いとの感想を述べた。また、CyberGlove の表面は人の掌より滑りやすいため、被験者は多少の違和感を感じた。この二つの理由から、遅くとも 100 秒までには、被験者は疲れを訴えた。操作時間が十分経過すると、被験者は手の疲労によって適切な操作戦略が維持できなくなり、負荷は少ないがばらつきが大きい操作戦略へ移行すると考察する。よって、この分散の拡大が疲れを表しているといえる。

3つのタスクに共通してほぼ全ての実験結果が上記の分散の傾向を持っており、習熟・慣れ・疲れの3つの時間帯に分けることができる。図 10(a)(b)と図 11(a)には、分割された3つの時間帯が示されている。この分割は、最も顕著に分散が変化している区間を抜き出し、中央の時間を境界と判断した。

図 12 はタスク a を行った時の3つの遷移パターンを抜き出し、その詳細を示している。開始から (a)10.4-11.1[s], (b)72.3-72.9[s], (c)120.5-121.2[s] における遷移パターンを示す。図 12(a) に示すように操作直後は接触状態 31(abcde) が観察されたが、徐々に出現頻度は減少し、図 12(c) では全く出現しなくなった。この状態 31 と入れ替わりで、指中間部 (領域 b) が接触しない接触状態 29(ab̄cde) の出現が増えた。タスク b に関しても同様の現象が確認された。一方、タスク c の

Fig. 12 Changing pattern of the contact state transition

パターンは時間の経過に伴い、接触領域数の少ない接触状態の出現が増えた。時間が経つと、指を置き換える直前に指先で回転力を加えて、慣性を利用することで楽に操作を行う傾向が見られた。

4.4 慣れの時間帯の操作からテンプレート生成
被験者が無意識的に目標の操作戦略を持ち、それを目指して試行を繰り返すとすれば、分散が小さくなる慣れの時間帯の操作は、目標に対してばらつきの少ない操作の集合と言える。この慣れの時間帯のデータからテンプレートを生成することで、目標から大きく誤差を持つデータの混入を少なくすれば、より良い相関計測の結果が得られると期待する。そこで、事前に計測した接触状態遷移パターンの平均を習熟・慣れ・疲れの3つの時間帯に分けて計算することで各タスクに対しそれぞれ3つのテンプレートを生成し類似度を計測する実験を行なった。

図 13 は、タスク a において3つのテンプレートを用いた時の時間に伴う類似度とその移動平均を示している。このグラフは各類似度の点について前後それぞれ 10 サンプルの平均を計算した結果を示している。テンプレート間の移動平均を比較すると、ほぼ同様の変化を表している。3つの時間帯に分けたテンプレートの生成では単純に認識の類似度を向上させる結果は示さなかった。一方、Fig. 14 は、3つのタスクにおける時間に伴った類似度の分散の変化を示している。テ

(a) Template generated by the proficiency term

(b) Template generated by the familiarization term

(c) Template generated by the fatigue term

Fig. 13 Similarity of input sequence in comparison with the three template (Task a)

テンプレート間の分散の変化を比較すると、慣れのテンプレートにおける分散が終始低い値を示している。他の2つのタスクの結果にも同様の傾向が現れている。分散が小さい慣れの時間帯での操作データを用いてテンプレートを生成することで、ばらつきを抑えた操作認識が可能と言える。全ての被験者において、操作認識のばらつきは平均42%抑えられた。

4.5 考察 図10(c)はタスクabの筋疲労の推移を示している。操作開始から45秒経過すると徐々に中間周波数が低下し、筋疲労が生じている様子がわかる。85秒経過すると、中間周波数は大きな振幅を伴う振動が始まる。この結果はタスクabにおける分散の

(a) Task a

(b) Task b

(c) Task c

Fig. 14 Variance with three model sequences

変化から分割した3つの時間帯とほぼ一致している。後半以降に生じる中間周波数の振動は、タスクabにおいて5人中3人の被験者で観察された。しかし、タスクcではこの現象は見られず、中間周波数の低下する状態がそのまま続いた。

この中間周波数の振動は、疲労によって誘発された生理的振戦である。振戦とは疲労によって手が震える現象である。等尺性収縮でEMGを観測すると、集中的な筋放電と相対的に放電が小さい時間が、10Hzで周期的に繰り返されることが知られている⁽¹⁵⁾。この2種類の放電時間では筋電図スペクトル分布が異なるため、かつ周波数解析のための切り出し方による影響で中間周波数に振動が発生する。よって、振動の有無

に関わらず、分散変化のグラフから得られた疲労の時間帯においては、筋電データは大きい筋疲労を示している。

5. お わ り に

本稿では、慣れや疲れを考慮した操作認識のためのテンプレート生成について調べた。まず、接触状態遷移の変化を用いて操作を認識する手法を紹介した。この手法を用いて、円柱物体を用いた複数の操作について計測実験を行い、時間の経過に伴う操作のばらつきの変化を計測し、被験者の操作に対する慣れや疲れの検出を行った。また、操作を習熟・慣れ・疲れの3つの時間帯に分割し、各時間帯毎に3つのテンプレートを生成することで入力操作との相関を計測した。その結果、類似度の分散が習熟・慣れ・疲れにより変化し、慣れの区間で分散が小さくなることを確認した。また、慣れの区間から生成されたテンプレートが、ばらつきを平均42%抑えた操作認識を可能にすることを示した。

今後の課題としては、慣れの時間帯の自動抽出が挙げられる。最終的には、分散から慣れの抽出を行い、標準パターンを自動で生成させることが望ましい。そのためには、3つの時間帯の境界線を発見する必要があるため、さらに多くの操作データを取得し解析を行う予定である。

文 献

- (1) S.B.Kang, K.Ikeuchi: "Toward Automatic Robot Instruction from Perception-Temporal Segmentation of Tasks from Human Hand Motion", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 5, pp. 670-681, 1995.
- (2) M.Kondo, J.Ueda, Y.Matsumoto, T.Ogasawara: "Perception of Human Manipulation Based on Contact State Transition", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.100-105, 2004.
- (3) Jing Z.Liu, Te H.Dai, Vinod Sahgal, Robert W.Brown, Guang H.Yue: "Nonlinear Cortical Modulation of Muscle Fatigue: a Functional MRI Study", *Brain Research*, Vol.973, No.2, pp.320-329, 2002.
- (4) Ming-I Lin, Huey-Wen Liang, Kwan-Hwa Lin, Yaw-Huei Hwang: "Electromyographical Assessment on Muscular Fatigue - an Elaboration upon Repetitive Typing Activity", *J. of Electromyogr. and Kinesiol.*, Vol.14, No.6, pp.661-669, 2004.
- (5) H.Taguchi, K.Hase, T.Maeno: "Analysis of the Motion Pattern and the Learning Mechanism for Manipulating Objects by Human Fingers", *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.68, No.670, pp.1647-1654, 2002.
- (6) H.Kawasaki, K.Nakayama, G.Parker: "Teaching for Multi-Fingered Robots Based on Intention of Motion In Virtual Reality", *Proc. of the Int. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.427-433, 2000.
- (7) H.Ogata, T.Takahashi: "Robotic Assembly Operation Teaching in a Virtual Environment", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 3, pp. 391-399, 1994.
- (8) J.Aleotti, S.Caselli, M.Reggiani: "Toward Programming of Assembly Tasks by Demonstration in Virtual Environment", *IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2003.
- (9) K.Ogawara, J.Takamatsu, H.Kimura, K.Ikeuchi: "Generation of a task model by integrating multiple observations of human demonstrations", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1545-1550, May, 2002.
- (10) Y.Kuniyoshi, Masayuki Inaba, Hirochika Inoue: "Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.10, No.6, pp.799-822, 1994.
- (11) J.Case-Smith, C.Pehoski: "Development of Hand Skills in the Child", *American Occupational Therapy Association*, 1992.
- (12) T.Nishimura, H.Yabe, R.Oka: "A Method of Model Improvement for Spotting Recognition of Gestures Using an Image Sequence", *New Generation Computing*, Vol.18, No.2, pp89-101, 2000.
- (13) M.R.Cutkosky, R.D.How: "Human Grasp Choice and Robotic Grasp Analysis", *Dextrous Robot Hand*, Springer-Verlag, pp. 5-31, 1990.
- (14) K.Ju, C.Lee, H.Minamitani, S.Onishi, H.Yamazaki: "Analysis of Muscle Fatigue during Repeated Dynamic Movement - Characteristics of Median Frequency of EMG and Blood Lactate Concentration -", *Trans. of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, D-2*, Vol. J74, D-II, No.8, pp.1098-1107, 1991.
- (15) K.Sakamoto, T.Yamaji, H.Makabe, M.Takanokura, H.Shimada, K.Mito: "Study of Evaluation of Function of Joint with Use of Physiological Tremor - Evaluation Concerning to Joints of Shoulder and Knee -", *Proceedings of Meeting of Japan Ergonomics Research Society*, pp.418-419, 2004.