

モデルヒューマンプロセッサに基づくロータリスイッチの回転操作の分析*

大森信行**, 北島宗雄***

1. はじめに

ロータリスイッチは、スイッチの中でも歴史が古い。その最も大きな特徴は、回転により操作された操作部(ダイヤル・つまみ)がどの位置にあるのかが一目でわかるという点である。また、全周をフルに使用することができるので、多くの接点を一つのスイッチ内へ収納できる¹⁾。ロータリスイッチには、連続的に回転する無段階式、設定されたステップ毎に停止する多段階等の種類があり、つまみの回転に応じて電子機器に接続された複数の回路を開閉したり、抵抗や静電容量の値を変更する働きを持つ。また、近年はノッチ、ストップ、回転範囲等の機能を利用者が自由に設定できるプログラマブルなものも市販されている(例えば、日本バイナリー(株) プログラマブル触覚ロータリモジュールTouchSense PR-1000等)。

このように、ロータリスイッチは機能面で非常に優れているために、現在でも音響機器、計測機器など各種の製品において設定・調整操作のために、様々な物理特性(つまみ形状、大きさ、回転角度、回転抵抗、回転段数、等)をもったものが利用されている。ロータリスイッチの操作は、つまみ部分を指先で回転させながら、つまみが指示する目盛と設定すべき目標値を一致させるといった動作である。Cardらによるモデルヒューマンプロセッサ²⁾によれば、本動作においては、知覚(つまみが指示する目盛の読み取り)、認知(目盛と設定すべき目標値が一致しているかどうかの判定)、運動(スイッチを回す)というプロセスが並列的に繰り返し実行されていると考えられる。

* 受付：2009年11月2日 受理：2010年6月15日

** 長野県工業技術総合センター

Nagano Prefecture General Industrial Technology Center

*** 独立行政法人 産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

ロータリスイッチの操作性については、これまでも研究が行われている^{3,4)}。Murataらは操作時間と最適な直径や回転抵抗等の物理的な条件との関係について研究を行っている⁴⁾。一方、ある操作において操作者の知覚・認知・運動の動作時間が少ないスイッチは、その操作時間も短縮できることが予想されるので、ユーザビリティ指標のひとつである操作時間を最小にするようなロータリスイッチを設計するためには、ロータリスイッチの物理特性が操作者の知覚・認知・運動の動作に与える影響についての知識が必須である。しかし、ロータリスイッチの操作者において知覚・認知・運動の動作がどのようになされているかの研究は行われていない。

そこで、本研究では次節に示す物理特性を持つロータリスイッチの操作時間の測定結果から要素的な動作と要する動作時間を導出するとともに、モデルヒューマンプロセッサにおける操作者の知覚・認知・運動の各プロセスの動作時間に基づいて、タスクの種類により動作時間が異なる理由について分析を行った。

2. 操作時間の測定対象

測定を行った製品は図1に示す加速度センサアンプ(EMIC(株)型番509-CAP 製造番号88113 1988年製)であ

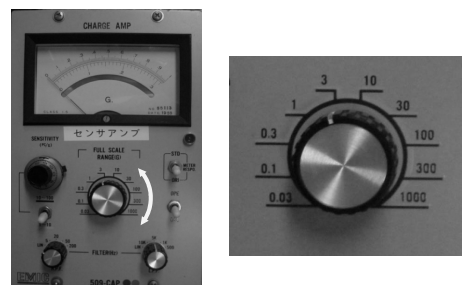


図1 測定対象製品

Fig. 1 The appearance of a rotary switch used for this study.

り、設定用に複数のスイッチを備えている。本稿ではこのうちレンジ設定用ロータリスイッチの操作を対象とする。

本製品の測定レンジ設定用のロータリスイッチは各測定レンジ（測定する振動加速度の大きさ）に応じた10段の多段式であり、各段の回転には最大で0.2 Nm程度のトルクが必要である。各段階の途中では停止しない。つまみ部分は直径22 mm、高さ14 mmの円柱形状である。また、ストップ機構¹⁾を持ち、測定レンジの設定されている角度範囲のみ回転する構造となっている。

3. ロータリスイッチにおける操作時間計測

ロータリスイッチの回転操作における要素的な動作を導出するために操作時間の測定を行った。タスクを図2に示す。

タスク1では位置1から右に3段階回すが途中の位置2, 3では停止させることなく連続で位置4まで回す。位置4に到達後は左に3段階回すが、途中の位置3, 2では一時停止してから次の位置に回し位置1に到達する。タスク2では位置4から左に3段階回すが途中の位置3', 2'では停止させることなく連続で位置1'まで回す。位置1'に到達後は右に3段階回すが、途中の位置2', 3'では一時停止してから次の位置に回し位置4'に到達する。両タスクとも以上の操作をできるだけ早く繰り返す。

タスクの実行過程はビデオカメラにより撮影した。撮影映像は、映像解析支援ツール⁵⁾を利用して低速度で再生し、ロータリスイッチが回転して所定の位置に到達した時刻を記録し、各位置間の移動時間を算出した。一時停止回転において1段を1/30秒（ビデオのフレームレート）より短時間で回転している場合には、当該位置での一時停止が行われていないと判断し、当該位置からその移動から1往復分の回転について測定対象から除外した。Cardら²⁾によれば、人間の動作の最小単位の時間は、モデルヒューマンプロセッサにおける運動プロセッサの固有時間から70 msとなり、これが必要とされる時間精度

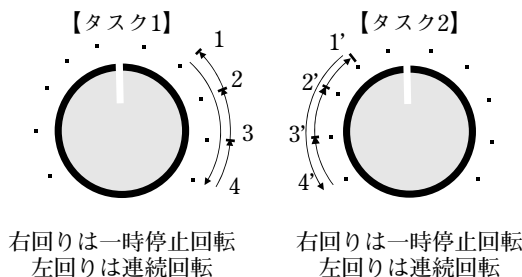


図2 操作時間を測定したタスク

Fig. 2 The rotation tasks.

となる。操作を撮影したデジタルビデオのフレームレートは1/30秒であることから、本計測に必要な時間精度は確保されている。タスク1, 2ともに1往復の回転を1試行として17試行を実施し測定した。被験者は1名である。つまみの握り方、ロータリスイッチとの相対的な位置・姿勢は、実験前に被験者自身が操作しやすいようにあらかじめ設定した。実験中はロータリスイッチを利き手により操作し、操作に必要な手指・前腕部を除いて変化させず同一の状態を維持するよう教示した。

4. 測定結果

4-1. タスク1, 2における回転時間

タスク1およびタスク2の測定結果から、1試行を回転の方向毎に連続回転時、一時停止回転時に分割し、連続回転時は位置1→4および4'→1'の間の移動を、一時停止回転時は位置4→1および1'→4'の間の移動を回転時間の測定対象とした。各位置について、回転開始位置から当該位置に回転するまでに経過した時間を、回転の方向および方法毎に図3に示す。図2におけるタスク2では、位置は1'から4'であるが、図3においては1から4と表記した。回転開始位置は回転の方向によって異なり、タスク1では1または4となり、タスク2では1'または4'となる。位置1→4および1'→4'の回転（右回転）は右上がり、位置4→1および4'→1'の回転（左回転）は左上がりのグラフとなる。例として、タスク1の連続回転において位置1から3までの回転に要する時間は、右上がりの破線グラフの3の位置に示される値となる。

図3より、連続回転時および一時停止回転時ともに、2段目以降の回転よりも1段目の方が時間がかかる傾向があ

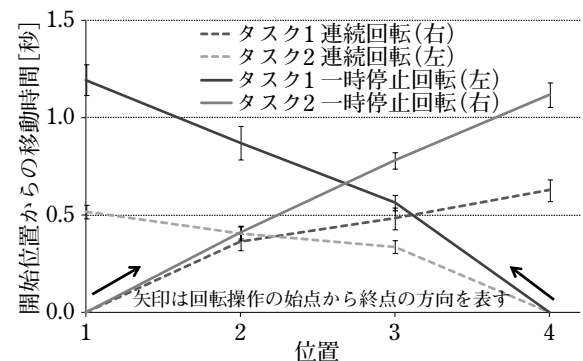


図3 回転位置と回転開始からの経過時間（平均値と95%信頼区間）

Fig. 3 The mean rotation times plotted as the function of the positions of the rotary switch along with 95% confidence intervals.

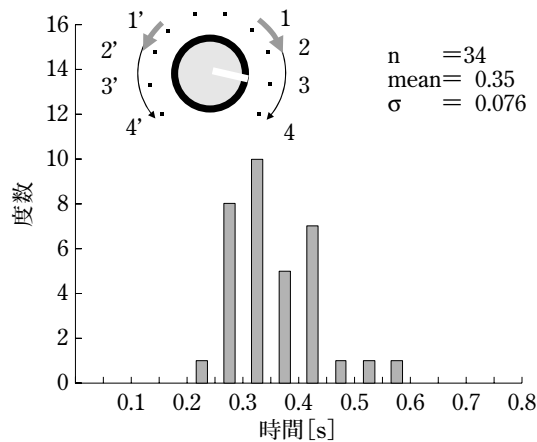


図4 回転時間分布（連続回転1段目）

Fig. 4 Distribution of the times needed for the single step rotation from the first position to the second position in the continuous rotation condition.

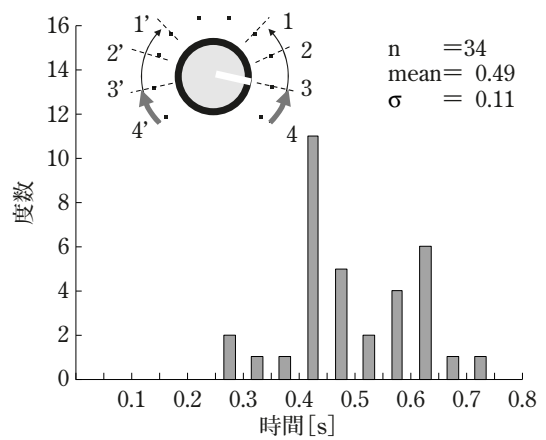


図6 回転時間分布（一時停止回転1段目）

Fig. 6 Distribution of the times needed for the single step rotation from the fourth position to the third position in the step-by-step rotation condition.

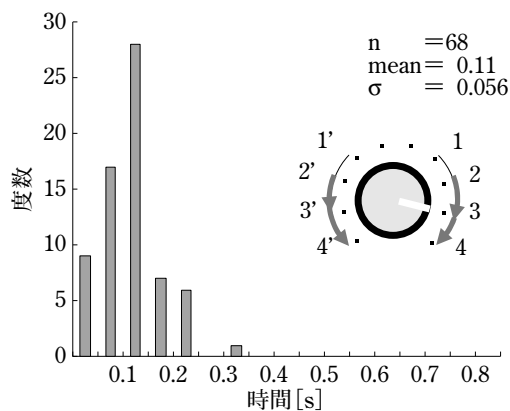


図5 回転時間分布（連続回転2, 3段目）

Fig. 5 Distribution of the times needed for the single step rotation from the second position to the fourth position in the continuous rotation condition.

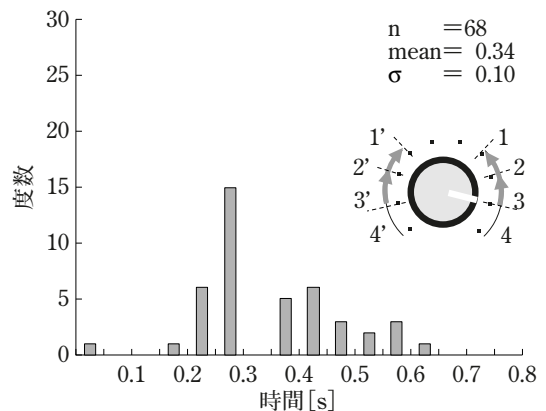


図7 回転時間分布（一時停止回転2, 3段目）

Fig. 7 Distribution of the times needed for the single step rotation from the third position to the first position in the step-by-step rotation condition.

ることがわかる。また、一時停止回転時よりも連続回転の方が大きな速度で移動していることがわかる。これは、途中の位置（位置2, 3および2', 3'）で回転を停止する必要がなく、ロータリスイッチの機構上、端の位置（位置4, 4'）を超えて回転しないことから、一時停止回転時よりも大きな速度で回転しているためと考えられる。

4-2. 回転時間の違い

次に、連続回転時と一時停止毎回転時での回転時間の違いについて考察する。図4, 5は、両タスクについて、一時停止回転時の1段の移動時間の分布である。図4は1段目の回転（位置1→2, 1'→2'）の移動時間であり、各タスクで試行数が17であるので、両タスクでの測定対象は34試行となる。図5は、2段目以降の回転（位置2→3, 3→4, 2'→3', 3'→4'）における1段の移動時間である。1試行で2回（2段）測定するので測定対象は68試行となる。

図6, 7は、両タスクについて連続回転時の1段の移動時間の分布である。図4, 5の場合と同様に、図6は1段目の回転における1段の移動時間、図7は2段目以降の回転における1段の移動時間である。各グラフにおいてロータリスイッチの図の外周の弧の太線部分が測定の対象位置を示し、各図には測定サンプル数n、1段の移動時間の平均mean、標準偏差σを記載した。以上の図から回り始めの1段の移動時間（図4, 図6）と2段目以降の移動時間（図5, 図7）のそれぞれの1段毎の値を比較すると、回転方法に関わらず回り始めの1段よりも2段目以降は移動時間が短いことがわかる。この傾向は連続回転時において大きく現れており、1段目と比べ2段目以降の移動時間は平均値で1/3以下となっている。

両タスクにおいて測定した各段階の移動時間について、二要因混合分散分析を行った。回転位置（1段目, 2段目, 3段目）について対応ありの要因、回転方法（一時停止回

転, 連続回転) について対応なしの要因とした. 両タスクにおいて, それぞれ17試行を行っているので, 合計34試行が対象となる. 分散分析の結果, 一段の移動時間は回転位置により有意な差があり ($F(2,132) = 109.6$, $p < .01$), 回転方法により有意な差がある ($F(1,66) = 317.6$, $p < .01$) ことがわかった. 交互作用が有意 ($F(2,132) = 6.47$, $p < .01$) であるので単純主効果について検定したところ, 一時停止回転時 ($F(2,132) = 33.2$, $p < .01$), 連続回転時 ($F(2,132) = 82.8$, $p < .01$) とともに位置によって移動時間に有意な差があった. 位置毎にLSD法により多重比較を行った結果, 一時停止回転時, 連続回転時ともに, 2段目および3段目は1段目と比べるとより短時間で移動しており, 2段目と3段目の移動時間に有意な差はなかった. 以上より, ロータリスイッチの操作においては, 回転方法によらず1段目の移動とそれ以降の移動において必要な時間が異なることから, 要素的な動作として一時停止回転時, 連続回転時それぞれについて, 1段目の移動, 2段目および3段目の移動の4種類の操作が考えられる.

5. 回転速度の差の原因

モデルヒューマンプロセッサは人間を情報処理システムとしてとらえ, 人間を「見て, 考えて, 行動する」ものであり, それぞれを行う知覚, 認知, 運動の三つのプロセッサが固有のサイクル時間ごとに処理を行うと考える²⁾. 以上の考え方にに基づき, ロータリスイッチの移動時間やばらつきが回転方法や位置により異なる原因について考察する.

ロータリスイッチ操作にモデルヒューマンプロセッサを適用すると, 知覚システムはダイヤルの位置や回転時の抵抗の大きさ等を受け取り, 認知システムはダイヤルの位置に応じて次にダイヤルに加えるトルクの向きや大きさを決定し, 運動システムは認知システムの決定に従って手指を動かしてダイヤル回転の操作を実行すると考えられる. これはダイヤルの位置や回転抵抗を認知判断した結果に基づいて次の動作を決定する場合の一連の単位動作 (トライ) である. ダイヤルを一段移動する操作において, 移動完了までにこのようなトライを複数回行うと考える. すなわち, トルクが回転に必要な閾値を越えるまでは, 単位動作を繰り返す (リトライ) ごとに徐々にトルクを増加していく.

Cardらによると各プロセッサの固有のサイクル時間は, 知覚時間 $\tau_p = 100$ ms, 認知時間 $\tau_c = 70$ ms, 運動時間 $\tau_m = 70$ ms である²⁾. そこで, 知覚・認知・運動を含む1回の

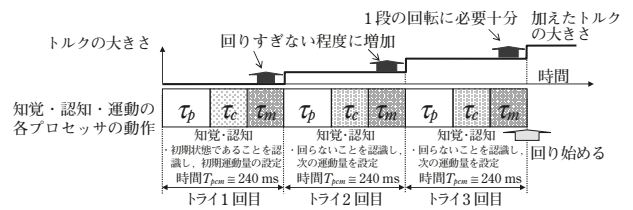


図8 ロータリスイッチ1段の回転における単位動作 (トライ) の繰り返し

Fig. 8 Repeated initiations of the unit task for performing the initial rotation from the first position to the second position.

トライには $T_{pcm} = \tau_p + \tau_c + \tau_m = 240$ ms かかる. 知覚・認知が不要の場合は $T_m = \tau_m = 70$ ms となる.

図8は, 一時停止回転の操作を開始してから知覚・認知・運動を含むトライを3回繰り返した時点でダイヤルが回転し始める場合について, 1段のみの回転に必要な値となるまでトルクを増加させるトライの繰り返しの過程を示したモデルである. 一時停止回転は, ダイヤルの1段の移動を知覚・認知後に次の段への移動を行う回転動作であるので, 知覚・認知・運動の各プロセッサの動作により構成されるトライを繰り返す. トライ1回目の知覚・認知は, 1段の移動を開始する状態すなわち初期状態であることを認識し, 初期の回転操作の運動量を計算する. トライ2回目以降の知覚・認知は, ダイヤルが回らないことを認識し, 次の運動量を計算する. 1回のトライの動作時間は $T_{pcm} = \tau_p + \tau_c + \tau_m = 240$ ms となる. 図8上部のグラフは, ダイヤルに加えたトルクがトライの繰り返しによりどのように増加するかを表したものである. 一時停止回転の操作であるので, 加えたトルクが過大となりダイヤルが2段以上回転することのないよう, 1回のトライ毎に少量ずつトルクを増加させ, 3回目のトライにおいて1段のみの回転に必要な十分な値となっている.

以上の仮定によりダイヤル操作の回転時間分布を分析する. 一時停止回転の1段目 (図6) では, 1段の移動時間は0.3~0.7 s程度である. ダイヤルが回転方向を変える位置に到達したことを知覚・認知した後の動作であるのでトライ時間は T_{pcm} となる. ここでは, ダイヤルが2段以上回転せず1段のみの回転に必要な十分な値になるまでトライ時間ごとにトルクが増加される. このため, 操作時間の下限は初回のトライで1段回転した場合となる. 図6において1段の移動時間の下限は1回のトライ時間 T_{pcm} にほぼ一致することから, 初回のトライで回転している場合があることが推測される. また移動時間が0.7 s程度までに分布していることから, 1段の回転に2~3回のトライが必要とされる場合があると考えられる.

一時停止回転の2段目以降（図7）では1段の移動時間は0.2～0.5 s程度である。ダイヤルが1段移動したことを知覚・認知した後の回転の動作であるのでトライ時間は T_{pcm} となる。図7において移動時間の下限が0.2 s程度とトライ時間 T_{pcm} にほぼ一致するので、図6の場合と同様に初回のトライで回転している場合があることが推測される。1段の回転に必要なトライ数は、1～2回程度と考えられる。1段目の場合（図6）よりも移動時間が小さいのは、1段目に回転に必要な十分なトルクを覚えているためにトライでのトルクの増分が大きく初回のトライで閾値付近の値のトルクを加えていることで、必要なトライ数が少ないためと考えられる。

連続回転の1段目（図4）では、ダイヤルが回転方向を変える位置に到達したことを知覚・認知した後の動作であるのでトライ時間は T_{pcm} となる。移動時間の下限が0.2 s程度とトライ時間 T_{pcm} にほぼ一致するので、図6の場合と同様に初回のトライで回転している場合があることが推測される。一時停止回転の1段目（図6）よりも移動時間が小さいのは、1段の回転後に一時停止する必要がないことから1回のトライでのトルク増分が大きく、少ないトライ数でトルク閾値を超えるためと考えられる。

連続回転する場合の2段目以降（図5）については、1段の移動時間は0.05～0.2 s程度であった。1段毎にダイヤルを停止せず連続して回転させるためダイヤルの位置についての知覚・認知は不要であり、トルク閾値を十分に超えたトルクを加える動作の繰り返しである。これは運動システムのみ動作の繰り返しであるためトライ時間は T_m となる。図5では、1～3回のトライに相当する時間で1段の移動が行われている。また、1回のトライ時間が連続回転の1段目よりも小さいため、ばらつきも小さいと考えられる。

なお、最終段の回転では、ロータリスイッチが機構的に最終段（3段目）を超えて回転することがないため、次の段への回転に必要なトルクが極めて大きい状態、すなわち停止抵抗が極めて大きな状態となる。従って、3段目の移動（位置3から位置4、または位置2から位置1への移動）は他の段の移動と比べて大きなトルクを加え、より短時間で回転できることが予想される。しかし、計測結果からは3段目の移動時間は1段目よりは短い、2段目とは有意な差が認められないことから、今回の実験では停止抵抗の大きさが回転時間に与える影響は確認できなかった。

前節の操作時間は、被験者1名について計測した結果であるために、ロータリスイッチの利用者一般に適用できるとは言えない。しかしながら、「1段目の移動には、そ

れより後の1段の移動よりも大きな時間がかかる」ことと、「回転方法により移動時間が異なる」ことから導かれる「ロータリスイッチの一連の回転操作には、回転方法および位置により4種類の異なるオペレータが存在する」という結果は、前節において実測で確認されているとともに、本節で述べたモデルヒューマンプロセッサにおける知覚、認知、運動の各プロセッサの固有のサイクル時間に基づく分析からも検証できることから、この結果が一般に適用できる可能性は十分に高いと考えられる。

6. まとめ

ロータリスイッチの回転操作時間を計測したところ、回転方法と位置により操作に必要な時間が異なることがわかり、それぞれに対応した操作を要素的な動作として動作時間とともに導出した。また、これらの要素的な動作毎に必要な時間が異なる理由について、モデルヒューマンプロセッサの考えに基づいて分析を行った。今後の課題としては、被験者を増やした実験を行い一般に適用可能な要素的な動作の操作時間を算出するとともに、操作時間の短縮および操作の確実性のためにスイッチの形状や回転抵抗等の物理特性を最適化することが考えられる。

謝 辞

研修の一環として研究の機会を与えてくださった（独）産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 赤松幹之 研究部門長、関芳明 副研究部門長に感謝いたします。分散分析についてご助言をくださった信州大学 島田英昭 准教授に感謝いたします。また、有益なご意見をくださいました査読者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 特許庁：標準技術集 小型スイッチ. http://www.jpo.go.jp/shiryou/s_sonota/hyoujun_gijutsu/small_switch/b-4-2.htm, 2004.
- 2) S. K. Card, T. P. Moran, and A. Newell: The Psychology of Human-Computer Interaction, 24-44, Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- 3) 森若誠, 村田厚生: ディスプレイとコントロールの設置位置を考慮したステアリング・スイッチの有効性検証, 人間工学, 40 (1), 2004.
- 4) 森若誠, 村田厚生, 王曙光: 親指操作型ダイヤル式統合スイッチの開発とその有効性評価, 人間工学, 46 (1), 2010.
- 5) 熊谷徹, 山下樹里, 片桐孝昌, 森川治, 横山和則, 北島宗雄: After Events Annotator ビデオ画像イベント抽出支援ソフトウェア, インタラクション2006, ポスターセッションD-424, 2006.