

センサネットワークを用いた 人間の作業効率の評価手法の考察

笹間 亮平[†] 服部 正嗣^{††} 柳沢 豊^{††} 岡留 剛^{††}

[†] 京都大学大学院 情報学研究科

^{††} 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

E-mail: †sasama@sys.i.kyoto-u.ac.jp, ††{takashi_hattori, yutaka}@cslab.kecl.ntt.co.jp,
houmi@idea.brl.ntt.co.jp

あらまし 筆者らは、センサを用いて自動的に人間のさまざまな作業の効率を測るために、「作用素」と呼ぶ新しい語彙セットを提案している。本報では、作用素を用いて組立作業を分析する実験を行った結果を対象として、作業効率を評価して実際に効率を測る試みを行った結果について報告する。この実験では、作業効率を比較するために「同じ作業者が、同じタスクを繰り返し行ったケースの1回目と2回目」「違う作業者が、同じタスクを行ったケース」を対象とした。そして、これらの作業の効率を、観測された作用素の数・出現割合・平均時間の観点から評価した。その結果、作用素の数・出現割合・平均時間を用いることで組立作業の効率を測ることができた。

キーワード コンテキストウェア、センシング、アノテーション、作業分析

The Consideration of an Analysis Technique of Work Process Using Sensor Network

Ryohei SASAMA[†], Takashi HATTORI^{††}, Yutaka YANAGISAWA^{††}, and

Takeshi OKADOME^{††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University

^{††} NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

E-mail: †sasama@sys.i.kyoto-u.ac.jp, ††{takashi_hattori, yutaka}@cslab.kecl.ntt.co.jp,
houmi@idea.brl.ntt.co.jp

Abstract We have proposed new word set called ‘ elemental physical effects ’ (EPE) for analysis of work process using sensor. In this paper, we describe the results that we tried to evaluate work process and to measure working efficiency. In this experiment, we evaluated assembling process as first and second tries that same worker repeated same task and the try that different worker took same task. And we evaluated these work process based on the number, appearance ratio, and average time of obserbed EPE. The result of this evaluation, we could measure working efficiency using the number, appearance ratio, and average time of obserbed EPE.

Key words context-aware, sensing, annotation, work analysis

1. はじめに

製品の組み立てや整理といった作業において、生産性の向上という要求は古くからある。作業過程の冗長性を除去し生産性の向上を目指す研究に、Industry Engineering

(IE) [1] がある。この研究の特徴は、作業過程を基本動作の組み合わせで表現することである。代表的な IE の手法の一つに、Gilbreth により約 100 年前に提案された Therblig 分析法 [2] がある。この分析法では、作業者の動作を 17 の基本動作 (Therblig) へ分類して分析する。

Therblig には、有効な動作・可能ならば改善すべき動作・改善しなければならない動作の3つがあり、この分類を基に Therblig の列から作業の効率化を妨げている動作を発見して、これを除去する。この結果、作業効率を改善することができる。

従来、Therblig 分析法では作業過程の Therblig への分解（これをアノテーションと呼ぶ）は、分析者が手作業で行っていた。例えば分析者は、作業過程を撮影したビデオ映像等を見ながら、作業者の目（頭部）・右手・左手といった複数の体部位にそれぞれにアノテーションするため、大きな労力を要していた。これに対し、センサを用いてこの基本動作へのアノテーション作業を自動化すれば、この労力を削減できる。

これを実現するために、筆者らはセンサによる作業の自動的なアノテーションが可能な基本動作の語彙セットとして「作用素」を提案している [3]。そして、この作用素を用いることで組み立て作業などの工場内作業に対して、十分なアノテーションができることを実験を通して検証した。しかし、アノテーションの結果から作業効率を測る方法については確認していなかった。

そこで本報では、作用素を用いて作業にアノテーションする実験を通して、作業効率を評価した結果について報告する。本実験では、作業効率を比較するために「同じ作業者が、同じタスクを繰り返し行ったケースの1回目と2回目」「違う作業者が、同じタスクを行ったケース」を対象として、作業者と作業に関連する物に対してアノテーションした。そして、これらの作業の効率を、観測された作用素の数・出現割合・平均時間を用いて分析した。その結果、作用素の数・出現割合・平均時間を用いて組立作業の効率を測ることができた。

2. 作用素

前節で述べたように、作業過程をセンシングしたデータに対してアノテーションするためには専用の語彙セットが必要である。この語彙セットを得るために基本的な方針として、センシング可能でかつ作業を十分に記述できる語彙セットを用意する。人の動作を表現する Therblig と道具の機能を表現する Work Functions (WF) [4] を語彙セットの基とした。なぜなら Therblig と WF は長年使用されている単語セットであり、様々な作業を記述することができるためである。Therblig と WF を基とした語彙セットの選定については、すでに [3] で報告しているため割愛する。

図 1 に選定された作用素とその作用素の種類及び単語の説明を示す。選定過程の詳細については [3] を参照されたい。選定された作用素には、包括関係と種類がある。作用素は、状態を表すものと状態の変化を表すものの2種

- 状態:動き続けている 自身が位置を変化している
- 状態:停止し続けている 自身が位置を変化していない、何にも作用していない
- 状態:接触し続けている 対象に接している
 - 状態:押し続けている 対象に圧力を掛けている
 - 状態:支え続けている 対象を支えている
- 状態:移動させ続けている 対象の位置を変化させている
- 状態の変化:接触する 対象に接する
 - 状態の変化:圧する 対象に圧力を掛ける
- 状態の変化:離す 対象を離す
- 状態の変化:接触させる 複数の対象を接触させる
- 状態の変化:分離させる 対象を複数に分ける

図 1 選定した作用素

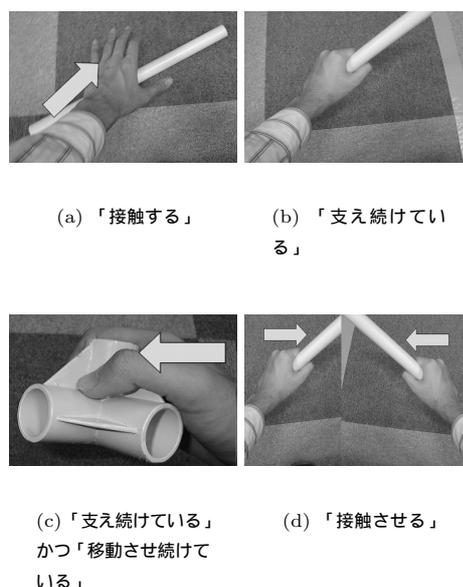


図 2 作用素の例

類に分類される。図 1 において、包含関係は、箇条書きの中の“ ”印の単語が“ ”印の単語に対して下位である。図 2 に選定された作用素のうちのいくつかの動作例を示す。図 2(a) は左手がパイプに「接触する」瞬間であり、図 2(b) は左手がパイプを「支え続けている」状態である。また、図 2(c) は右手がパイプを「支え続けている」と同時に「移動させ続けている」状態である。この例のように、作用素は同時に複数割り当てられることがある。図 2(d) は右手と左手がそれぞれパイプを「接触させ」ている瞬間である。

作用素の包括関係と種類については、作用素を割り当てる際の次の2つのルールを作ることで、一意の割り当てができるようにする。まず、包含関係についてのルールを述べる。作業者・作業に関する物の状態が包含関係を持つ作用素のいずれも割り当てても可能なときには、より下位の作用素を割り当てるようにした。例えば、作業者が「接触する」と「圧する」のどちらにも当ては

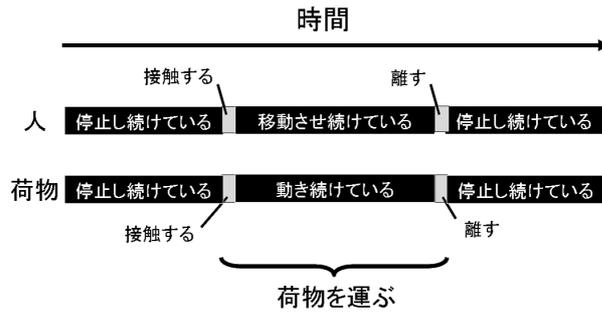


図3 「荷物を運ぶ」を作用素で表現した例

まる動作をしたときは、「接触する」の特殊な場合（対象に接触した状態で圧力を掛ける）である「压する」を割り当てる。次に種類についてのルールは、作業員・作業に関する物の状態の割り当てには、状態の作用素の前と後には状態の変化の作用素を割り当てることにした。ただし、「動いている」、「休んでいる」は、状態の作用素と状態の変化の作用素を交互に割り当てるルールの例外である。これらの作用素の種類は状態であるが、これらは連続で割り当てることを認める。これは、例えば「動いている」、「休んでいる」の間に割り当て得る状態の変化の基本要素が、作用素の中に存在しないためである。このようなルールを用いたとき、「荷物を運ぶ」という作業過程は図3のようになる。

3. 作業過程のアノテーション実験

本節では、提案した作用素を用いて作業の効率を評価することを目的として、作業に対して作用素でアノテーションした実験について述べる。本実験では、予備実験として分析者が作業を撮影した映像を見ながら、手作業で作業過程にアノテーションを行った。

アノテーションの対象とする作業は、家具を組み立てる作業である。この作業過程には、様々な種類の作業員・作業に関連する物の状態が存在するため、様々な作用素で作業過程はアノテーションされる。よって組み立てる作業は、作用素を用いてアノテーションした結果から作業効率を測るタスクとして適している。

作業過程は、パイプ・ジョイント・板の部品を組み合わせて椅子・机・棚・荷押し車を組み立てるという4種類を選んだ。これらの作業過程を撮影した動画像データに、作用素を用いてアノテーションを試みた。作業のアノテーションには、アノテーションツール Anvil [5] を用いた。アノテーションツール Anvil は、作業が撮影された映像を参照しながら、GUIを通してアノテーションを行うことができる。

3.1 作業過程（タスク）

本実験での家具を組み立てるタスクに使用する部品と

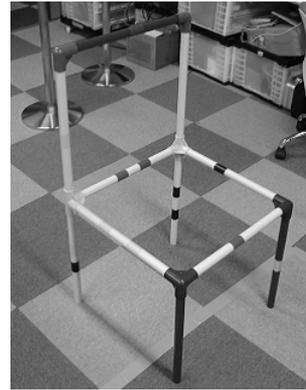


図4 組み立てられた椅子

しては、以下のプラスチック製のパイプ、ジョイント、板を用いた。

- パイプ：長さ 30cm のパイプ（短パイプ）4 本，長さ 45cm のパイプ（中パイプ）20 本，長さ 120cm のパイプ（長パイプ）4 本
- ジョイント：二足ジョイント 2 個，三足ジョイント 8 個，四足ジョイント 8 個，キャスター付きジョイント 4 個
- 縦 33cm 横 44cm 厚さ 1cm の板 3 枚

これらの部品を用いて組み立てられた椅子を図4に示す。また、図5に各タスクで組み立てられる家具の完成図を示す。各タスクで使用する部品の種類と数を以下に示す。

- タスク A：中パイプ 11 本，二足ジョイント 2 個，三足ジョイント 2 個，四足ジョイント 2 個，板 1 枚で椅子を組み立てる。
- タスク B：中パイプ 8 本，長パイプ 4 本，三足ジョイント 8 個，板 1 枚で机を組み立てる。
- タスク C：中パイプ 16 本，三足ジョイント 8 個，四足ジョイント 4 個，板 3 枚で棚を組み立てる。
- タスク D：短パイプ 2 本，中パイプ 10 本，二足ジョイント 2 個，三足ジョイント 2 個，四足ジョイント 4 個，キャスター付きジョイント 4 個，板 1 枚で荷押し車を組み立てる。

以上の部品を使用し、4種類の家具を組み立てる作業過程に対してアノテーションを行う。このアノテーションの結果を分析して作業効率を測る。作業員は各作業過程をそれぞれ2、3分程度で行う。本実験におけるアノテーションは、作業員（身体、右手、左手）に加え、作業に関する物（パイプ 28 本，ジョイント 22 個，板 3 枚）の計 56 に対して行う。

3.2 実験

アノテーションの際に、上述の作業に関する各部品を識別する必要がある。しかし部品の中でも特にパイプは、同形状のもの数多く映像の中で見分けることが困難である。そこでパイプの識別のため、白・緑・黒・青のパ

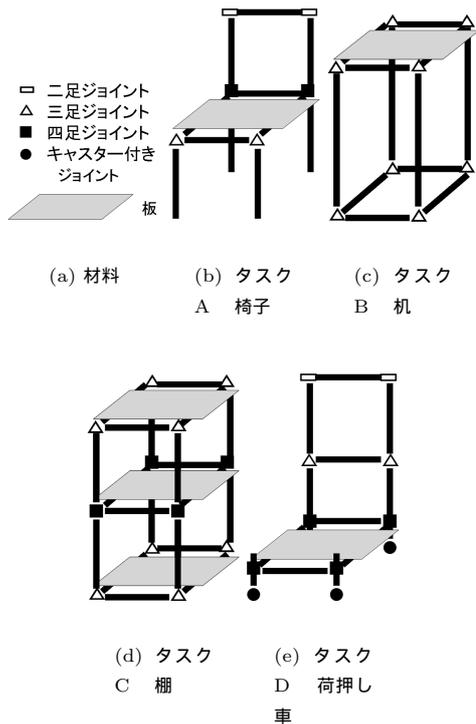


図 5 家具の完成図

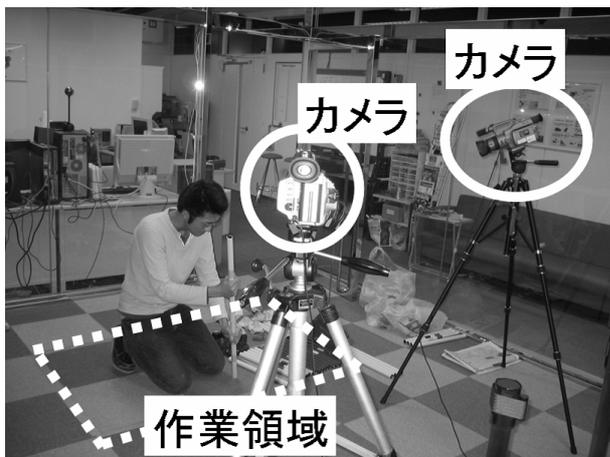


図 6 実験の様子

イブを用意し、黄・赤・黒・白のカラーテープを巻くことで 28 本（短いパイプ 4 本、普通のパイプ 20 本、長いパイプ 4 本）を区別した。

作業過程の記録については、図 6 のように 2 台のカメラを配置して撮影した。タスク開始時に、予め部品は作業領域内に置いておき、作業者は作業領域内で作業を行うようにすることで、作業者の手元が常に映るようした。なお、部品を探すという動作も作業に含めるために、組立に必要な部品だけがあらかじめ用意されているのではなく、タスク開始時には冗長な部品を置いておくようにした。

	00:07	00:08	00:09
自動詞	停止し続けている	動き続けている	停止し
他動詞 1			
他動詞 2			
サブリック			
自動詞			
他動詞 1	移動させ...	接触...	移動させ続け...
他動詞 2			
サブリック	つかむ		使う
自動詞	動き続けている		
他動詞 1	移動させ続...	移動させ続けてい...	支え続...
他動詞 2			
サブリック		つかむ	使う

図 7 アノテーションの結果

アノテーション実験の結果を図 7 に示す。図 7 は、作業者が椅子を組み立てている場面に対する作用素を用いたアノテーションの結果である。アノテーション実験は、12 人の作業者がそれぞれ 3 つのタスクを行う作業過程に対して、分析者がアノテーションを行った。

4. 作用素を用いた作業効率の分析

本節では、前節の実験で組立作業にアノテーションされた作用素を用いて、効率を調べた結果について述べる。本報では、作業効率を次のように定義する。同じタスクの作業効率については、そのタスクを完了するまでの作業時間が短いほど効率が良く、長いほど効率は悪いとする。

4.1 分析

この分析では、次の効率の異なる作業過程にアノテーションした結果を比較する。

- 同じ作業者が、同じタスクを繰り返し行った 1 回目と 2 回目の作業過程
- 違う作業者が、同じタスクを行ったそれぞれの作業過程

具体的には、2 人の作業者（作業者 A、作業者 B）が椅子を作るタスクを 2 回行った作業過程に対して、効率を調べた。作業者 A と作業者 B は同じ椅子の組立タスクを行ったが、組立スキルに個人差があるため作業の効率が異なると予想される。また、作業者 A、作業者 B は椅子を作る作業を繰り返し行ったため、1 回目と比べ 2 回目の方が椅子を作る手順を理解しており、さらに組立作業にも慣れるため、作業効率が上昇することが予想される。

椅子を作るタスクについて、作業者 A、作業者 B がそれぞれ 2 回実施した作業過程に対して、観測された作用素の数と、組立作業に要した時間長を表 1 に示す。表 1 より、作業者 B は 1 回目の作業に比べ 2 回目には作業時間が 53% 短縮していることがわかる。一方、作業者 A は

表 1 観測された作用素の数

	動き続けている	停止し続けている	移動させ続けている	接触させる	分離させる	11の作用素の合計	作業時間
作業者 A 1 回目	240	262	88	37	8	1374	2分 56秒
作業者 A 2 回目	191	210	68	41	6	1262	2分 41秒
作業者 B 1 回目	243	264	47	44	10	1375	2分 48秒
作業者 B 2 回目	106	125	40	33	0	812	1分 19秒

作業時間の短縮が9%であることがわかる。この組立作業の作業効率変化を、次の3つの観点から評価する。

(1) 観測された作用素の数

ここでまず、作業の効率を調べるために観測された作用素の数を数え上げた。これは、観測された作用素の数が大きいほど無駄な動作が多いことが予想されるためである。その結果を表1に示す。表1によると、観測された作用素の合計数は、タスクの1回目では作業者Aと作業者Bはほぼ同等である。作業者Aを見ると1回目の作業に比べ2回目には作業時間が8%減少し、作業者Bの方は41%減少している。ここで、観測された作用素の合計数の減少に特に大きく貢献した作用素は、「動き続けている」と「停止し続けている」であることがわかった。前者が減るといことは無駄な動きが無くなると解釈でき、後者の減少は何もしていない時間が少なくなることを意味する。一方、作用素「分離させる」は観測される数が少ないため、合計数の減少に大きな影響を与えないが、作業の効率には相関があった。これは、「分離させる」が観測されたということは、組立作業にミスがあり一度分解して作業をやり直したことを意味するからである。以上のことから、観測された作用素の数(特に「動き続けている」、「停止し続けている」、「分離させる」)を用いて作業の効率を測ることができると考えられる。

(2) 作用素の実施に要する時間の割合

次に、各作用素が作業中にどの程度の割合で実施されていたかを調べた。作用素の中には作業の進展に不可欠なものそうでないものがあるため、効率の良い作業では前者の割合が多くなり、効率の悪い作業では後者の割合が多くなると考えられる。図8に全ての状態継続の種類である作用素(「動き続けている」、「停止し続けている」、「接触し続けている」、「押し続けている」、「支え続けている」、「移動させ続けている」)の作用素の実施に要した合計時間に対する割合を示す。図8によると、「停止し続けている」が作業者Aは1回目に比べ2回目の方が5%減少しており、作業者Bは11%減少している。一方、「接触し続けている」、「移動させ続けている」については、作業者Aは1回目に比べ2回目の方がそれぞれ2%、17%増加しており、作業者Bは25%、132%増加している。作業全体の中での各動作の割合については、何もしていない「停止し続けている」の割合が少ない方が作業効率は良い。逆に、「動き続けている」や「移動させ続

けている」については全体の中で大きな割合を占めていた方が、タスクを進める動作をしていた時間が大きくなるため、作業効率は良くなる。この結果から、継続の種類的作用素(特に「動き続けている」、「停止し続けている」、「移動させ続けている」)の割合を用いて作業の効率を知ることができると考えられる。

(3) 作用素の実施に要する平均時間

さらに、観測された各作用素の平均時間と効率の関係についても調べた。作業者Aと作業者Bの椅子を作るタスクの1回目、2回目の組立作業において計測された状態継続の作用素の、実施に要する平均時間を図9に示す。図9では、「接触し続けている」、「支え続けている」が作業者Aは1回目に比べ2回目の方がそれぞれ14%、22%減少しており、作業者Bは29%、31%減少している。これらの作用素の平均時間の減少は、動作が速くなっていることを表すと考えられる。一方、「移動させ続けている」については、作業者Aは1回目に比べ2回目の方が29%増加しており、作業者Bは20%増加している。この作用素「移動させ続けている」が観測された数の継続時間の分布を図10に示す。図10より、作業者Aについて見ると、「移動させ続けている」が4秒未満継続しているケースは2回目より1回目の方が多いが、この作用素が4秒以上6秒未満継続しているケースは1回目より2回目の方が多。また、作業者Bについて見ると「移動させ続けている」が3秒未満継続しているケースは2回目より1回目の方が多いが、この作用素が3秒以上5秒未満継続しているケースは1回目より2回目の方が多。よって作業者A、B共に、組立作業において1回目では部品を短時間移動させていたのに対して、2回目では長時間移動させている。さらに表1より、作業者A、Bともに「移動させ続けている」の観測された作用素の数は1回目より2回目の方減少しているため、1回目の2つの短時間の移動を2回目では1つの移動で実現するといった効率化があったことわかる。以上より、継続の種類的作用素(特に「接触し続けている」、「支え続けている」、「移動させ続けている」)の平均時間を用いて作業の効率を知ることができると考えられる。

これらの実験結果により、作用素の観測される個数、継続の作用素の実施に要する時間の割合、継続の作用素の実施に要する平均時間を用いることで作業効率を測ることができるとわかった。また、作用素の中で特に

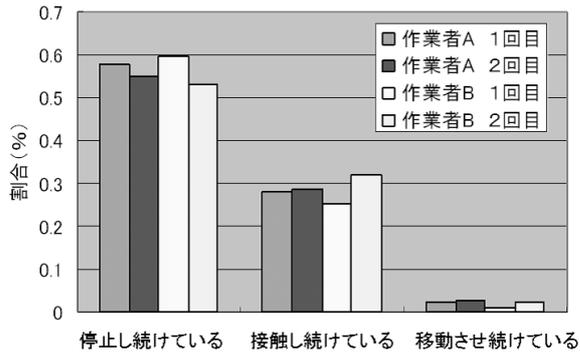


図 8 タスク中の作用素の実施に要する時間の割合

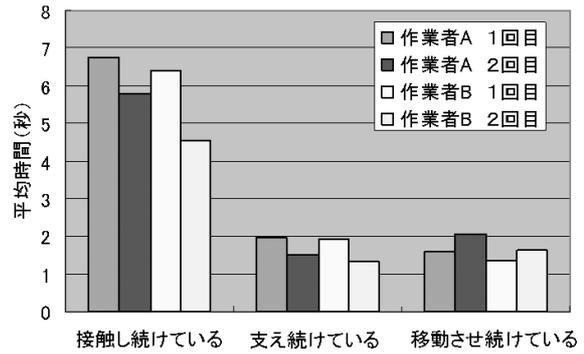


図 9 タスク中の作用素の平均時間

「動き続けている」、「停止し続けている」、「分離させる」、「移動させ続けている」、「接触し続けている」、「支え続けている」が、効率を測る指針となることがわかった。

4.2 考察

効率を測る指針として作用素を用いた場合には、以下のような点に注意する必要がある。

注意の対象 作用素の中には、作業員の注意の対象を表現する語彙がない。そのため、例えば作業員が設計図や部品を見た状態で停止している状態は、作用素「停止し続けている」が割り当てられる。4.1の作業効率の分析では、「停止し続けている」は無駄な動作としているが、上の例のように停止している状態は必ずしも不必要とはいえない。作業員が何に注意を向けているかを表す語彙を作用素の中に加えることで、より正確な作業効率の分析ができる可能性がある。注意の対象を知る方法の1例として、視線のセンシングが考えられる。

動きの高さ 組立作業において作業内容が改善され効率の上昇する要因には、動作が速くなることと無駄な動作がなくなることの2つが考えられる。作用素を用いた効率の評価では、どちらの要因によって作業効率が増えたかは明確ではない。これが明確であれば、例えば作業員が無駄な動作はないが、動作が遅いため作業効率が良いといったことも分析できるようになるため、効率を上げるためには作業員は動作を速くする訓練を行うことが適切であることがわかる。作用素「動き続けている」の動作時間に加えて加速度センサなどを用いて動いた距離を計測すれば、動作の速さの定量的な評価が可能となる。

5. おわりに

本報では、作用素を用いて組立作業を分析する実験を行った結果を対象として、作業効率を評価して実際に効率を測る試みを行った結果について報告した。作用素の選定では、作業員だけでなく作業に関する物の状態にも注目しているため、より多くの種類の作業過程をセンシングすることが可能になる。人手による作業に対するアノ

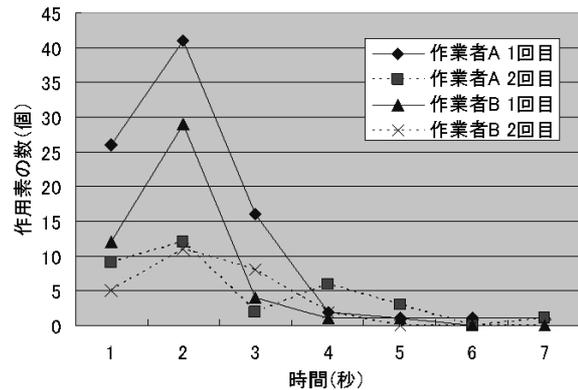


図 10 作用素「移動させ続けている」の継続時間の分布

テーション実験を通して、観測された作用素を用いることで作業効率を評価することが可能であることを示した。本実験の結果を利用すれば、作用素をセンシングすることで、自動的に効率を測ることや効率を悪化させる原因がわかると考えられる。今後の課題としては、センサの実装による自動的な作業過程のセンシングなどがある。

謝 辞

本報を作成するにあたりご指導いただきました片井修教授(京都大学大学院 情報学研究科)、下原勝憲教授(同志社大学大学院 工学研究科)、NTT コミュニケーション科学基礎研究所 協創情報研究部の皆様に感謝の意を表します。

文 献

- [1] 藤田彰久: IE の基礎, 健常社, 1978.
- [2] 日本モダブツ協会(編): モダブツ法実践マニュアル, 技報堂出版, 1995.
- [3] 笹間 亮平, 服部 正嗣, 柳沢 豊, 岡岡 剛: 作業過程をセンシングするための作用素に基づくアノテーション実験, 情報研報 Vol.2006, No.14, pp157-162, 2006.
- [4] Anil Kumar Mukhopadhyaya: value engineering Concepts, Techniques and Applications, A division of Sage Publications, 2003.
- [5] Michael Kipp: "Gesture Generation by Imitation - From Human Behavior to Computer Character Animation", Boca Raton, Florida: Dissertation.com, 2004.