

Original

Analysis of Work Operations for Multi-Step Assembly Tasks —2nd Report: Procedure to Determine Assembly Sequence Considering Work Difficulties —

Masahiro ARAKAWA,¹ Akinari TABUSHI² and Masahiko FUYUKI¹

Abstract

The operation time of multi-step assembly tasks is affected by work difficulties. When an assembly process includes difficult operations, a long processing time is required to complete all operations. Therefore, considering operation difficulties in the task is required to accurately predict the operation time of an assembly task. Our previous paper shows that the operation time in multi-step assembly tasks is affected by a combination of work difficulties such as worker's posture, worker's status of supports for a semi-final product, and the number of bolts required to affix the parts. In this paper, we review a problem for determining the operation sequence of an assembly task and propose a method to search for the optimal sequence by evaluating different types of work difficulties. The proposed method is based on a genetic algorithm and it includes a function to modify a standard operation time obtained using the MODAPTS method. A neural network is introduced to calculate the rating to modify the standard operation time. Evaluations of work difficulties are used as input data of the neural network to calculate the operation time of each operation separated in the sequence. To apply the proposed method, operations and worker motions appearing in an assembly process are categorized and related to each other. Then, the proposed method is applied to an actual assembly process to evaluate its performance. The results show that the best assembly sequences obtained by the proposed method give shorter operation times than the other sequences, and the operation times of the best sequences approximate to the measured operation times.

Key words: assembly, operation sequence, genetic algorithm, operation difficulty, neural network

¹ Kansai University

² Graduate School, Kansai University

Received: March 30, 2006

Accepted: January 12, 2007

多工程組み立て作業に対する作業分析の研究

—第2報：作業困難さを考慮する組み立て順序決定法—

荒川 雅裕¹, 田伏 顕也², 冬木 正彦¹

本研究では、作業者の手作業による部品組み立て作業に対して、作業困難さを考慮する部品組み立て順序の決定問題を取り扱う。既報の実験結果では、実際の作業時間はMODAPTS法によって算出される標準作業時間に比べて大きく、それらの時間差は部品組み立て作業における作業時間は作業者の作業姿勢、作業者の部品や中間構造物の支持方法によって影響することを示した。この結果を踏まえて、組み立て作業の過程における作業困難さを評価し、ニューラルネットワークによって標準作業時間の補正を組み込んだ、遺伝的アルゴリズムによる部品組み立て作業順序決定方法を提案する。本論文では、はじめに部品組み立て作業に対する一般的動作の特徴の分類、および動作と作業の構造化を議論する。その後、提案法の特徴を示し、具体的な構造物の組み立て作業に対する順序決定問題への適用例を示す。

キーワード： Assembly, Operation sequence, Genetic algorithm, Operation difficulty, Neural network

1. はじめに

近年、多くの工場では多品種少量生産に柔軟に対応するため、セル生産を導入している。セル生産は、主に作業者の手作業による部品組み立て作業工程に導入され、作業者の多工程持ちによって同一工程内における複数作業者による並列処理や連続工程間での生産の非同期化を進めることで生産性の向上を実現している[1]。しかしながら、一人の作業者が多工程の作業を担当するため、作業時間の変動や作業ミスが発生しやすくなる[2]。このような生産方式においては、同一作業であっても個人ごとに作業時間が異なり、作業時間に変動が含まれるため、計画と実績の乖離が生じるとともに計画立案は困難である。

本論文では、多工程組み立て作業に対して、作業時間の削減を目的とするとともに、作業を容易にするための工程作業順序の決定を目的として、作業困難さを考慮する組み立て作業順序の決定問題を取り扱う。この研究では、新製品に対する作業において、既存製品の情報から組み立て順序に関連して製造時間や作業困難さを事前評価することによって、短いリードタイムでの製造、作業ミスや品質劣化の抑制も期待できる。

これまでに、組み立て作業順序の決定問題については多数の研究が行われており、とくにロボットや自動機械による加工や組み立て作業の自動化を目的として問題が取り扱われている。従来研究では、実現可能

な組み立て順序に対してグラフや階層構造による図的表現方法[3] - [5]の提案や、実現可能性の判定やメイクスパンなどを目的関数とする、ヒューリスティックによる方法[6]や遺伝的アルゴリズム[7]などによる組み立て順序決定法が検討されている。作業困難さに関しては、ロボットによる挿入作業に関する器用さ[8]、組み立て方向の切り替え回数や中間製品の安定性[9]などが実行可能性の判断や目的関数に使われている。しかしながら、作業者による組み立て作業ではこれらの困難さが混在して作業時間に影響し、さらに、作業者間で影響の程度が異なることが考えられる。

既報[10]において、鉄製アングルによる構造物の組み立て作業について作業時間の実績収集機能を有するデジタルマニュアルを利用して、作業内容と作業時間の関係を調べた。実験結果は連続する各工程作業の作業時間が作業者の部品や中間製品の支持、作業姿勢などの影響を受けていた。さらに、実験結果は作業過程における部品や中間製品の支持、作業姿勢は作業困難さの要因となり、これらの指標値が困難とされる工程作業の作業時間はMODAPTS法による標準作業時間に比べて大きい値となっていた。実験結果から得られた特徴を利用し、作業時間の予測値を算出するために、ニューラルネットワークによる標準作業時間の補正方法を提案した。

MODAPTS法による動作分析を利用して標準作業時間を算出する場合、異なる作業順序を用いてもほぼ同一の作業時間が算出される。しかしながら、現実の作業では組み立て作業順序の変更によって、作業困難さが変化するため、作業順序は作業時間に影響することが予想される。また、作業困難さの程度は作業者に

¹ 関西大学工学部² 関西大学大学院

受付：2006年3月30日、再受付（1回）

受理：2007年1月12日

依存するため、個人ごとに作業順序が作業時間に及ぼす影響は異なることも予想される。

本論文では総作業時間最小化の目的に対して、製品の部品構成の情報から作業困難さを考慮する部品組み立て作業順序の決定方法を提案する。はじめに、一般の組み立て作業に対して、動作の分類と、動作と作業の関連付けを行う。つぎに、ニューラルネットワークによって作業困難さから標準作業時間を補正する機能を遺伝的アルゴリズムに組み込んだ作業順序決定法を提案する。最後に、提案法を具体的な構造物の組み立て作業に適用することで提案法の有効性を調べる。

2. 組み立て作業に生じる動作の分類

組み立て作業に生じる動作を分類し、各作業に発生する動作を関連付ける。作業者の手作業による部品組み立て作業を以下の動作に分類する〔11〕。

- ① 部品・工具移動 (部品・工具の取得と移動動作)
- ② 部品・工具設置 (部品・工具の位置決め動作)
- ③ 作業者の移動
- ④ 取り付け作業 (部品接続動作)

組み立て作業を構成する連続工程作業において、各工程作業を「前処理」、「主作業」、「後処理」の3種類に分解する。動作①、②を連続で行う動作を(①→②)と記述すれば、「前処理」は③と(①→②)の組み合わせ、「後処理」は(②→①)と③の組み合わせで構成される。「主作業」は(③→④)で表現される。各作業をこれらの動作の組み合わせによって表現し、作業順序に対して動作の当てはめや、前処理あるいは後処理の作業の追加や削減を行うことで標準作業時間の算出や作業困難さの評価を行う。表1は上記の動作の分類とMODAPTS法による動作表現を関連付けたものである〔12〕。各動作はMODAPTS法で表記された動作要素の組み合わせで構成され、標準作業時間の算出に利用する。

3. 部品組み立てに対する作業順序決定方法

3.1 部品接続の表現

組み立て作業順序は部品間の接続に着目し、部品番号列によって表現する。すなわち、部品番号列によって、複数の部品の組み合わせから構成される中間製品に一つの部品を取り付ける作業を表現する。さらに、この表現の繰り返しによって、部品の取り付け順序を図1に示す分枝構造で表現する。

分枝構造に利用する部品は中間製品を構成する部品とし、ボルトやネジなどの接続に利用する部品類は分枝構造の表現には含めない。部材間の接続に利用されるネジ、ボルト、ナットなどの部品は部材間の接続方

表1 組み立て工程作業に現れる動作とMODAPTS法の動作要素の関連

動作	MODAPTS法での動作要素	MODAPTS法での表記
① 部品・工具移動	移動動作 判断 つかむ動作 かがんで元に戻る 重量補正	M1,M2,M3,M4,M5 D3 G0,G1,G3 B17 L1
② 部品・工具設置	移動動作 置く動作 判断	M1,M2,M3,M4,M5 P0,P2 D3
③ 作業者の移送	歩行 重量補正	W5 L1
④ 取り付け作業	移動動作 つかむ動作 置く動作 クランク動作 つかみ直し 圧力を加える	M1,M2,M3,M4,M5 G0,G1,G3 P0,P2,P5 C4 R2 A4

法の情報に含め、接続対象の部品が選択された時点で中間製品と部材との接続関係を判断して必要な部品の品種や数量を決定する。部品間の接続方法は、部品番号を行と列とする2次元配列を導入し、配列要素に記述する。これらの表現を利用することで、部品の組み立て順序の決定を部品番号の組み合わせ問題として扱う。たとえば、図1の右図のトラス構造物に対して、左図に示す複数の部材の分枝構造によって部材の組み立て順序を表現する。表2の2次元配列によって図1の構造物における部品間の接続方法を表現する。

表の作業方法の番号は、行に示された部品を列に示された部品に接続する作業を指す。各作業方法を前節の作業要素の組み合わせで表現し、さらに各作業要素を動作要素の組み合わせで表現することによって、標準作業時間を算出する。

3.2 作業困難さに対する評価

本研究では、作業者の手作業による組み立て作業において、部品間の接続方法と接続位置を作業困難さの

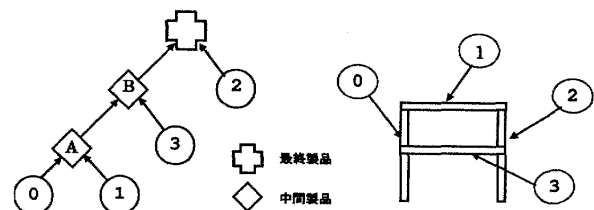


図1 組み立て作業順序に対する分枝構造の表記例 (作業順序 0,1,3,2 左:分枝構造表現例, 右:構造物例)

表2 部品間接続作業の表現例 (図1の構造物)

部品	0	1	2	3
0	0	1	0	1
1	2	0	2	0
2	0	1	0	1
3	0	2	2	0
作業方法	作業		接続利用部品	
0	未接続		なし	
1	垂直方向接続		ボルト, ナット	
2	水平方向接続		ボルト, ナット	

要因として取り上げる。これらの要因を完成製品や組み立ての過程で生じる中間製品の物理的構造から定量的に評価し、作業困難さの定量的な評価に利用する。本研究では文献〔9〕,〔11〕を参考に組み立て作業の困難さは次の4項目に起因すると仮定する。

(1) 位置決め精度

(部品取り付け, 挿入作業での動作を含む)

(2) 物体 (中間製品) の安定性

(3) 作業者の姿勢

(4) 物体 (部品) の接続方法

作業困難さを示す複数の評価値を作業時間に関連付けることで、作業時間のみを作業順序の評価対象とする。動作分析から得られる工程作業 i の標準作業時間を t_i 、工程作業 i の n 種類の作業困難さに関する評価値を $C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni}$ として、工程作業 i の作業時間 \tilde{t}_i を次式によって算出する。

$$\tilde{t}_i = f(C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni})t_i \quad (1)$$

ここで、 $f(C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni})$ は工程 i における標準作業時間と作業時間の比 (以下、作業時間比と略記) である。全工程の総作業時間 T を次式で定義する。

$$T = \sum_{i=1}^m \tilde{t}_i = \sum_{i=1}^m f(C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni})t_i \quad (2)$$

m は工程作業数であり、 t_i は MODAPTS 法の動作分析から算出する。工程作業 i での作業時間比 $f(C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni})$ が部品の組み立て順序によって変化するため、異なる作業順序によって総作業時間は変化する。(2) 式の計算によって、複数の作業困難さを同時に考慮する組み立て順序問題を総作業時間に関する一目的の最小化問題として取り扱う。

3.3 ニューラルネットワークによる作業時間の算出

複数の作業困難さに関する指標値から工程作業の作業時間の増加割合を計算するため、ニューラルネットワーク (以下、NN と略記) を利用する。図2にNNの概要図を示す。NNの入力ユニットに作業困難さに関する評価値 $C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni}$ を、出力ユニットに作業時間比 $f(C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni})$ を設定する。教師デー

タによる学習後、各工程作業に対して、作業困難さに関する評価値を入力し、作業時間比を算出する。一つの部品の取り付け作業が複数の作業工程から構成される場合には分解した工程作業ごとに計算を行う。そして、工程作業ごとに作業困難さと標準作業時間を求め、(1) 式を利用して作業時間を算出する。教師データには実際の作業から得られた工程作業ごとの作業時間の実測値を利用する。本研究では全ての工程作業について、MODAPTS 法によって算出した標準作業時間と実測値の比を出力に、作業困難さに関する評価値を入力に設定して NN の学習を行う。

3.4 遺伝的アルゴリズムによる作業順序決定法

作業順序の操作に遺伝的アルゴリズムを導入し、NNによる作業困難さによる時間補正を組み込んだ組み立て作業順序決定法を提案する。図3は図1での組み立て順序に対する染色体の表現例を示す。染色体には部品番号を列記し、部品の組み立て順序を表現する。図4は提案法の処理の流れを示しており、NNの学習後、以下の順序で最適作業順序を探索する。

部品取り付け順序決定法

(Step1) 遺伝的アルゴリズムの操作パラメータを設定する。

(Step2) 染色体の初期値および初期個体を設定する。

(Step3) 個体集合から、一つの染色体を取得する。

(Step4) 染色体内に表現された部品番号列について、以下の処理を繰り返す。

(Step4-1) 部品列内に最優先の部品を抽出する。

(Step4-2) 中間製品が存在しなければ (Step4-1) に戻る。存在すれば (Step4-3) に進む。

(Step4-3) 中間製品内に抽出した部品の接続対象の部品が存在するかを調べる。存在するならば、(Step4-4) へ進む。存在しなければ、総作業時間を無限大に設定して、(Step3) に戻る。

(Step4-4) 部品間の接続方法と接続位置から、作業内容を取得し、作業困難さの評価値を算出する。評価値は、当該部品の中間製品への位

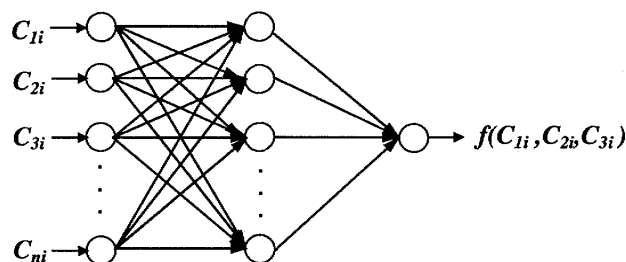


図2 ニューラルネットワークの概要図

置決め精度，中間製品の安定性，取り付け作業時の作業者の姿勢に関してそれぞれ数段階的に分類された程度から選択して決定する。
 (Step4-5) 染色体内に部品番号が存在すれば，(Step4-1)に戻る。存在しなければ(Step5)へ進む。

(Step5) 全部品の組み立て作業順序の決定後，各工程作業における作業内容から，標準作業時間を算出する。ここで，作業を構成する動作要素の標準作業時間はMODAPTS法によって予め算出されているとする。

(Step6) 各工程作業における作業困難さの評価値をNNに入力し，作業時間比を算出する。

(Step7) 作業時間比とMODAPTS法から算出した標準作業時間から総作業時間の予測値を算出する。

(Step8) 個体集合内の全染色体の評価が完了した場合は(Step9)へ行き，その他は(Step3)へ戻る。

(Step9) 世代数が最大世代数に達していれば終了し，その他は(Step10)へ進む。

(Step10) 淘汰，交叉，突然変異により，次世代の個体集合を作成し，(Step3)へ戻る。

4. 提案法の検証

4.1 構造物の特徴

提案法の検証のため，既報[10]で用いた鉄製アングル(以下，アングルと略記)による構造物の組み立て

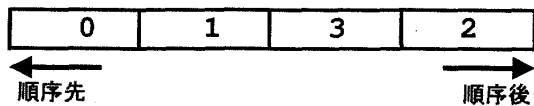


図3 染色体表現例(図1の分枝構造に対応)

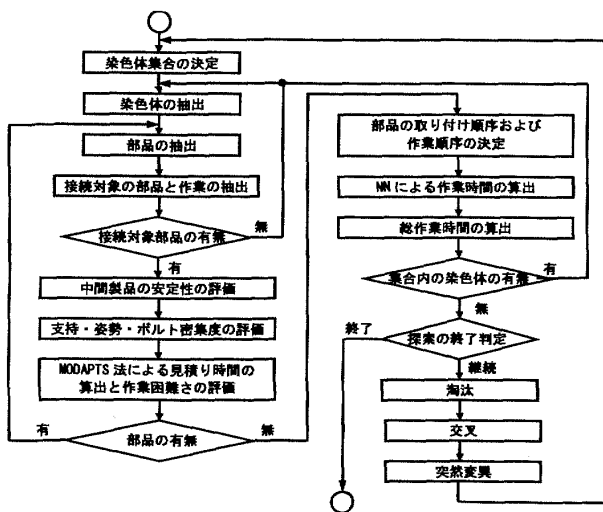


図4 提案法の処理の流れ

表3 ProductAの部品

部品	数量	部品	数量
アングル (1m)	7	ボルト (M12)	34
アングル (2m)	2	ナット	34
三角プレート	10	ワッシャー	34

表4 ProductAに関する部品間の接続と作業番号の対応

部品	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	2	0	2	0	0
1	0	0	0	0	2	2	0	0	0
2	0	0	0	0	0	3	0	3	6
3	0	0	0	0	0	0	3	3	6
4	1	1	0	0	0	5	5	0	0
5	0	1	1	0	5	0	0	5	0
6	1	0	0	1	5	0	0	5	0
7	0	0	1	1	0	5	5	0	0
8	0	0	4	4	0	0	0	0	0

作業順序の決定問題について提案法を適用する。図5は構造物の3次元構造図を示しており，この構造物をProductAと略記する。図中の番号は部品番号を示す。アングル間の結合はボルト，あるいはボルトと鉄製三角プレート(以下，三角プレートと略記)の組み合わせによって行う。表3,4,5はそれぞれ，ProductAの組み立てに必要な部品と数量，アングル間の接続に関する作業番号，および各作業番号における作業の特徴を示す。アングルの接続はボルト締めにより行い，締め付け作業にソケットレンチを利用する。

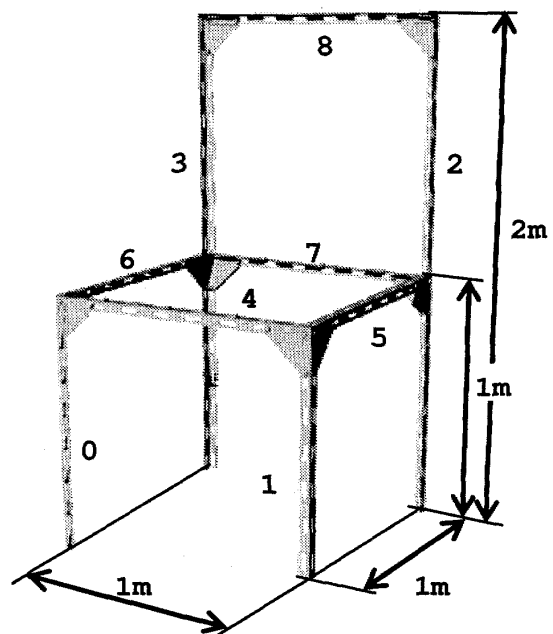


図5 ProductA概略図

表5 作業番号と作業の特徴 (ProductA)

作業番号	取り付け方向	アングル長 (m)	三角プレート	ボルト数量 (ボルト密集)
0	未接続			
1	水平	1	有	3 (1~3)
2	垂直	1	有	3 (1~3)
3	垂直	2	有	3 (1~3)
4	水平	1	有	1 (1)
5	水平	1	無	1 (1)
6	垂直	2	有	1 (1)

1 から 6 の作業は全て以下の順序で作業を行う。
部材の移動と位置合わせ (設置) → ボルト締め

4.2 作業動作の分類

表 6 は ProductA の組み立てに生じる工程作業を 2. に従って分類した作業の分析結果である。表中の作業番号は表 5 の作業番号を示す。表 6 の作業の記述は MODAPTS 法による動作表現を利用しており、MP と TS の記号は本研究で導入した。後作業は次工程の前作業に含める。表内で、“→”は動作順序、“×”は同一動作の繰り返し回数、“< >”は同一作業を繰り返し実行する場合に考慮されない動作を表す。三角プレートを利用した部材の接続作業は、①中間構造物内のアングルと三角プレートを 1 箇所ではボルト締め、②アングルと中間構造物を結合させ、三角プレートを含めて 2 箇所ではボルト締め、の順番で行う。

4.3 作業困難さの評価

作業困難さに関する、(1) 位置決め精度、(2) 中間製品の安定性、(3) 作業者の姿勢、(4) 物体 (部品) の接続あるいは接触方法、の具体的な評価指標として以下を利用する。

- (1') ボルト密集
- (2') 作業者の支持
- (3') 作業者の姿勢

(1'),(2'),(3') はそれぞれ (1),(2),(3) に対応する。全ての接続作業に同一のボルトとナットを用いており、同一の結合方法のため、接続方法に関する作業困難さは考慮しない。位置決め精度に関しては、ボルト締め付け作業におけるボルトのアングルの孔への挿入精度および、ボルトとレンチの位置決めを評価の対象とする。アングルの孔へのボルトの挿入動作は、M12 のボルトを 1.0mm 以上の余裕を有する孔への挿入動作であることから、挿入精度は全接続作業で同一として取り扱う。しかしながら、ボルトとレンチの位置決めでは近接するボルトとの干渉が生じることから、評価に“ボルト密集”を導入し、作業の影響範囲内に存在する作業対象のボルトを含めたボルト数を位置決め精度に関する困難さとして定義する。作業の影響範囲は

表6 ProductA の組み立て作業の動作の分類

作業番号	前作業	実作業
1	MP9 → <MP8> → MP2 → MP5	MP7 × 2
2	MP9 → <MP8> → MP2 → MP5	MP7 × 2
3	MP9 → <MP8> → MP4 → MP6	MP7 × 2
4	MP9 → <MP8> → MP2 → MP5	MP7 × 2
5	<MP8> → MP2 → MP5	MP7
6	MP9 → <MP8> → MP2 → MP5	MP7 × 2

動作	動作記号	作業内容
MP1	(M3 → G1 → M3) × 3	部品取得
MP2	W5 × 2	作業場内の移動, 1m アングルの移送
MP3	M3	手の移動
MP4	(W5L1) × 2	2m アングルの移送
MP5	M5 → G11 → G11 → M5 → D3 → M5 → P2 → B17	1m アングルの設置
MP6	M5 → G11 → G11 → M5L1 → D3 → M5L1 → P2 → B17	2m アングルの設置
MP7	TS1 → TS2 → TS3 → TS4 → TS5 → TS4 → TS6	ボルト締め
MP8	MP2 → MP1 → MP2 → MP3	部品準備
MP9	<MP8> → <MP5> → MP7	三角プレート取り付け (1本のボルト締め)

MP7 の構成要素

動作	動作記号	作業内容
TS1	M3 → G1 → M3	ボルト設置
TS2	P5 → M3 → G1 → M3 → P5	ワッシャー設置
TS3	M3 → G1 → M3 → P5	ナット設置
TS4	(C4 → R2) × 5	ボルト締め (レンチの利用)
TS5	M3 → G1 → M3 → R2	レンチ準備
TS6	M3 → A4	ボルト締め仕上げ

ボルトの取り付け位置から作業者の手の幅の内部と仮定し、本実験では取り付け位置から半径 50mm の範囲とする。これにより、評価値は 1, 2, 3 のいずれかの値をとる。中間製品の安定性に関しては、中間製品の状態によって生じる作業者の動作の変化に着目し、作業者による中間製品の支持状態を評価する。以下、この指標を“支持”と略記し、以下の 4 段階で評価する。

- 1: 支持なし
 - 2: 指で支持 (指の移動あるいは指によって物体を固定する。手の動作 (握る, 開く) は伴わない。)
 - 3: 手で支持 (手の移動あるいは手によって物体を固定する。手の動作 (握る, 開く) を伴い、腕の伸縮は伴わない。)
 - 4: 腕で支持 (腕の移動あるいは腕を伸ばして物体を固定する。腕の伸縮を必要とし、物体を固定する。)
- 支持はアングル接続時点での中間製品の安定性とアングル間の接続位置に関連付け、中間製品の不安定性

表7 支持の評価

アングル間の接続高	安定性	支持
$L < H$	$s_i \vee \bar{s}_i$	4
$L/2 < H < L$	s_i	3
	\bar{s}_i	4
$L/4 < H < L/2$	s_i	2
	\bar{s}_i	4
$H < L/4$	s_i	1
	\bar{s}_i	4

を以下の条件で評価する。

- ① ① 中間製品が地面との設置点によって構成する多角形の面積によって中間製品の設置状態の不安定性を評価し、この面積が基準値以下である場合に不安定とする。
- ② ② 接続済みの部材の中に片端が未接続の部材が存在する場合に不安定とする。(アングルあるいは構造物の一部が片持ち梁となる場合)

支持の評価に対して、表7に示す条件と評価値の対応表を導入する。表で s_i, \bar{s}_i はそれぞれ工程作業 i における中間製品の安定、不安定の状態を示す。中間製品の接地点が構成する多角形の面積の基準値を $100mm^2$ とする。表8は本研究で導入する“作業姿勢”に関する評価値と条件を示す。作業姿勢は当該作業で主要な動作中の姿勢を用いて、OWASによるAC値の1から4段階で評価する[13]。本実験では、部品の重さは10kg以下とし、上肢、下肢、背部の状態は部品間の接続高さと同中間製品の安定性、OWASの基準から表8の条件を設定した。

4.4 ニューラルネットワークの構造

作業時間を算出するためのNNの構造は入力ユニット数を3、出力ユニット数を1とする。NNの入力には前節で定義した3種類の作業困難さに関する評価値を適用する。中間層は1層とし、中間ユニット数は9とする。教師データには、ProductAの製造について既報[10]のOn-Jobデジタルマニュアル表示システムを利用して収集した作業時間の実測値を利用する。NNの学習は誤差逆伝播法によって行う。入力値に利用する作業困難さの評価値は、教師データ内の各評価指標値の最大値によって0から1の間に正規化した値を利用する。学習計算における誤差に関する収束条件を0.001、最大繰り返し計算回数を100,000回とする。

4.5 提案法の評価

遺伝的アルゴリズムの操作パラメータ値に関して、個体数を20、実行世代数を100とする。交叉には2点交叉を用い、交叉確率を0.8、突然変異確率を0.05とす

表8 作業姿勢の評価

アングル間の接続高	安定性	上肢	下肢	背部
$5L/4 < H$	s_i	A2	L2	B3
	\bar{s}_i	A2	L2	B4
$L < H < 5L/4$	s_i	A2	L1	B1
	\bar{s}_i	A2	L2	B3
$3L/4 < H < L$	s_i	A1	L1	B1
	\bar{s}_i	A1	L1	B3
$L/2 < H < 3L/4$	s_i	A1	L3	B1
	\bar{s}_i	A1	L3	B3
$H < L/2$	$s_i \vee \bar{s}_i$	A1	L4	B2
上肢	A1	両腕とも肩より下 両腕が肩の高さあるいはそれより上		
	A2			
下肢	L1	両脚をまっすぐにして立つ 重心をかけている片脚をまっすぐにして立つ 両膝を曲げて立つか中腰 片方または両方の膝を床につける		
	L2			
	L3			
	L4			
背部	B1	まっすぐ 前に曲げる ひねる ひねりかつ斜め前に曲げる		
	B2			
	B3			
	B4			

る。突然変異では、染色体の任意の2点を選択し、該当する点の情報を交換する操作を行う。目的関数は組み立ての総作業時間とし、式(2)で算出する。提案法の効果を調べるため、組み立て作業時間の測定実験を行い、提案法から得られる作業時間と比較する。実験は22~23歳の3名の被験者によって行う。教師データには表9の作業順序に従った実験結果を利用する。具体的には、3~5回の作業を繰り返し、作業時間が定常と見られる最新3回の測定値の平均値を教師データに採用する。提案法の評価では最良作業順序について3回の組み立て作業を行い、実測値の平均を利用する。実験では、On-Jobデジタルマニュアルを利用して、各部品の組み立てごとの作業時間を測定する。作業順序の分析ではデジタルマニュアルの画面の切り替えやマニュアルの認識動作は含めていない。これらの動作時間は部品のピックアップ時間に含まれるため無視した。

表10は提案法から得られた最良作業順序の工程作業の総作業時間について、提案法による計算値、実測値、MODAPTS法から得られる標準作業時間の比較を示す。被験者3名(以下、作業員A,B,Cと略記)とも、提案法によって、標準作業時間に比べて実測値に近い総作業時間が得られている。探索の過程で複数の最良作業順序が得られており、作業員によって順序は異なる。

本実験で得られた最良作業順序は、作業員Aに関しては{6→4→5→2→3→0→7→1→8}、作業員Bに関しては{6→4→5→3→2→1→7→0→

表9 教師データに利用した ProductA の製造に関する
工程作業と作業困難さの評価値

JS:1本のアングルの取り付け (()内はアングル長さ)

JT:三角プレートの取り付け

*1:作業姿勢 *2:支持 *3:ボルト密集

作業順序	部品番号	作業内容	*1	*2	*3
1	4,5	JS(1m)	1	1	1
2	7	JS(1m)	1	1	1
3	6	JS(1m)	1	1	1
4	6	JS(1m)	1	1	1
5	0	JT	1	2	1
6	0	JT	1	2	1
7	0	JS(1m)	2	3	3
8	1	JT	1	2	1
9	1	JT	1	2	1
10	1	JS(1m)	2	3	3
11	2	JT	1	2	1
12	2	JT	1	2	1
13	2	JS(2m)	2	4	3
14	3	JT	1	2	1
15	3	JT	1	2	1
16	3	JS(2m)	2	4	3
17	8	JS(1m), JT	4	4	1
18	8	JT	4	4	1

表10 異なる方法から得られた総作業時間の比較
(ProductA, 単位: min, ()内は標準偏差)

	作業員 A	作業員 B	作業員 C
提案法	25.70	23.02	20.38
MODAPTS	14.28	14.28	14.28
実測値	25.55 (0.24)	24.54(1.29)	35.25(8.10)

8}, 作業員 C に関しては {6 → 4 → 5 → 2 → 3 → 0 → 7 → 1 → 8} であり, これらの順序について実験を行った. なお, { } 内の数値は部品番号を示す. デジタルマニュアルの画面では作業困難さの値が異なる複数の作業が含まれる. 教師データは画面で最も作業時間の長い作業に関する作業困難さの指標値を採用しており, 標準作業時間では, 画面で最も作業時間の長い作業の作業時間は全体の 75~85% である. 実測値が標準作業時間の 2 倍程度の大きさであるならば, 教師データに含まれる誤差は最大で 13% 程度となる. 作業員 A, B に関しては, この最大誤差の値よりも小さい精度で近似値が算出されている.

4.6 類似構造物の組み立てに対する評価

提案法の利用目的は, 同一および類似する工程作業の組み合わせから製造される類似製品に対して, 作業時間の予測と最適な作業順序を決定することにある. 本節では前節での教師データを利用して, 類似構造物の組み立て作業順序問題に提案法を適用する. 提案法

の遺伝的アルゴリズムに関する計算条件は前節と同一とした. 図 6 は問題対象の構造物を示し, この構造物を ProductB とする. 表 11 は ProductB の構成部品を示す. 表 12 はアングル間の接続に関する作業番号を, 表 13 は作業番号に関する作業の特徴を示す. 表 14 は提案法から得られた最良作業順序の工程作業の総作業時間について, 提案法による計算値, 実測値, MODAPTS 法から得られる標準作業時間の比較を示す. 本計算においても複数の最良作業順序が得られており, 作業員 A に関しては { 8 → 9 → 10 → 11 → 0 → 3 → 2 → 7 → 6 → 1 → 4 → 5 }, 作業員 B に関しては { 11 → 10 → 8 → 9 → 3 → 0 → 1 → 6 → 7 → 4 → 5 → 2 }, 作業員 C に関しては { 10 → 9 → 8 → 3 → 0 → 1 → 2 → 6 → 5 → 4 → 7 → 11 } を最良作業順序として実験を行った. 全被験者とも, 提案法によって MODAPTS 法から得られる標準時間に比べて実測値に近い総作業時間が得られている. 作業員 A, B については実測値の 10% 以内の差で総作業時間を算出している. 図 7 は, 作業員 A について, 最良作業順序の部品取り付け順序と作業困難さの指標値を示す. 表 15 は, 図 7 に関連して工程作業番号, 取り付け対象の部品番号, 作業内容, そして作業順序の範囲を示す.

表 15 の工程作業順序に従って, デジタルマニュアルを作成し, 作業時間の測定実験を行った. 図 8 は作業員 A の最良作業順序に関する各工程作業の作業時間の分布を示す. 図 8 と表 15 との比較から, 作業困難さの指標値が大きい作業 (具体的には, 工程作業の番号 4~9, 14, 15) について, 提案法によって標準作業時間の補正が得られている. 遺伝的アルゴリズムの探索の過程で得られた最良作業順序と最悪作業順序を比較すると, 最良作業順序の総作業時間は他方に比べて 25.7% 改善していた. 最悪作業順序は { 1 → 5 → 2 → 6 → 9 → 4 → 0 → 8 → 3 → 7 → 10 → 11 } であり, 両順序の比較から最良作業順序では以下の特徴が見られた.

- (1) 作業場と部品置き場間の移動回数の削減
- (2) 作業困難さが低い作業数の増加

(1) に関しては, 最良作業順序では一つのアングルの取り付けにおいて, 三角プレートの取り付け回数を多くする順序が探索されており, 一回で多数の三角プレートを取得することで部品置場と作業場間の移動回数を削減している. (2) に関しては, 最良作業順序では中間構造物が不安定となる工程数が最悪作業順序に比べて少ない. 支持の評価値が 4 となる作業数は, 最良作業順序では全工程数の 14% であるが, 最悪作業順序では全工程数の 54% であった.

図 9 は ProductB の最良な組み立て順序について, 各作業員の作業工程における” (提案法による予測値 -

表 11 ProductB の部品

部品	数量	部品	数量
アングル (1m)	12	ボルト (M12)	56
アングル (2m)	0	ナット	56
三角プレート	16	ワッシャー	56

実測値)/標準作業時間” (以後、この値を”作業時間比の差”と呼ぶ) を示す。標準作業時間は MODAPTS 法によって見積もられる作業時間を指す。図 7 では作業 者 A に関する工程作業の困難さの値に大きな差が見られるが、図 9 では作業 者 A の作業時間比の差はほぼ全工程作業で± 0.4 以内である。例えば、図 7 から工程 作業 4~7 では作業の困難さの値が大きいが、図 9 から作業時間比の差が 0.4 程度に抑えられている。この 工程作業間での実測値と標準作業時間の作業時間比は 1.75 程度であり、予測値の誤差は実測値の 22

一方、作業 者 C の実測値はほぼ全工程作業で提案法 による予測値に比べて大きく、この差は NN の入力要 素の不足が予想される。提案法と予測値の差が 3 種類 とは異なる作業の困難さの不足に起因すると仮定した 場合、作業の困難さは個人差があってもあらゆる作業 者に影響することが考えられる。作業 者 A, B はほぼ 全ての工程作業で実測値に近似する予測値を得ており、 さらに作業 者 C のみに影響して標準作業時間程度の時 間差を引き起こしているため、異なる”作業の困難さ” が不足しているとは考えにくい。

図 9 から作業 者 C の実測値がほぼ全工程作業で予測 値に比べて大きい。この結果は実測値の作業時間比が 教師データに利用した作業時間比に比べて大きいこと を示唆する。このことから、作業 者 C の全工程を対象 に作業時間を大きく算出するための困難さとは異なる NN の入力要素が存在することが予想される。表 16 は

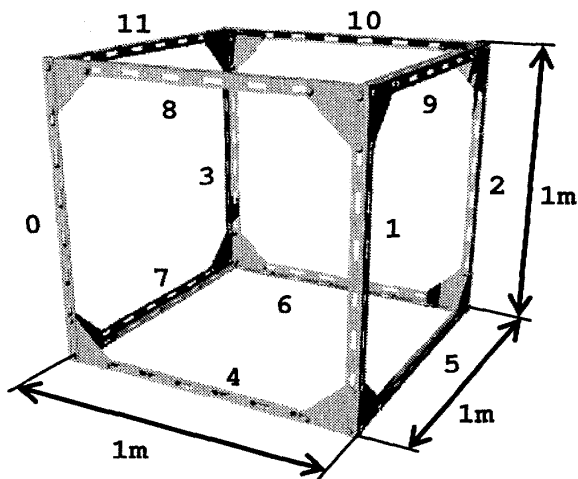


図 6 ProductB 概略図

表 12 ProductB に関するアングル間の接続作業

部品	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
4	2	2	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0
5	0	2	2	0	3	0	3	0	0	0	0	0
6	0	0	2	2	0	3	0	3	0	0	0	0
7	2	0	0	2	3	0	3	0	0	0	0	0
8	2	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
9	0	2	2	0	0	0	0	0	3	0	3	0
10	0	0	2	2	0	0	0	0	0	3	0	3
11	2	0	0	2	0	0	0	0	3	0	3	0

表 13 作業番号と作業の特徴 (ProductB)

作業 番号	取り付け方 向	アングル 長 (m)	三角プレー ト	ボルト数量 (ボルト密集)
0	未接続			
1	垂直	1	有	3 (1~3)
2	水平	1	有	3 (1~3)
3	水平	1	無	1

1 から 3 の作業は全て以下の順序で作業を行う。
部材の移動と位置合わせ (設置) → ボルト締め

表 14 異なる方法から得られた総作業時間の比較 (ProductB, 単位: min, () 内は標準偏差)

	作業 者 A	作業 者 B	作業 者 C
提案法	35.74	31.52	28.95
MODAPTS	22.04	22.04	22.24
実測値	36.54 (1.00)	29.39 (2.19)	42.64 (0.71)

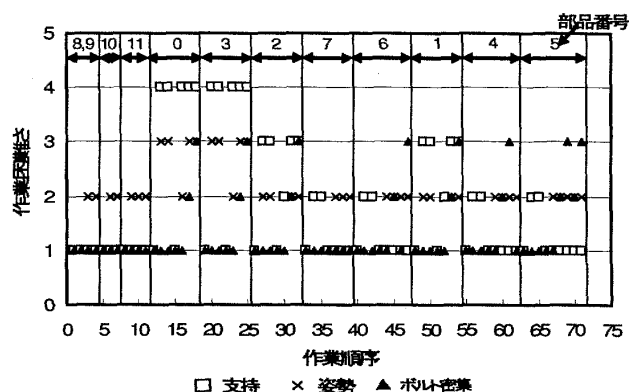


図 7 最良作業順序における部品の組み立て順序と作業困難さ (ProductB, 作業 者 A)

作業 者 C の ProductB の最適加工順序に関する、工 程作業内容、および該当する工程作業の中で主となる 作業の困難さの指標値を示す。図 9、表 16 から初期の 工程 (工程 作業 1~3) では異なる組み立て順序におい ても中間製品の構造は部品の単体に類似するため、実

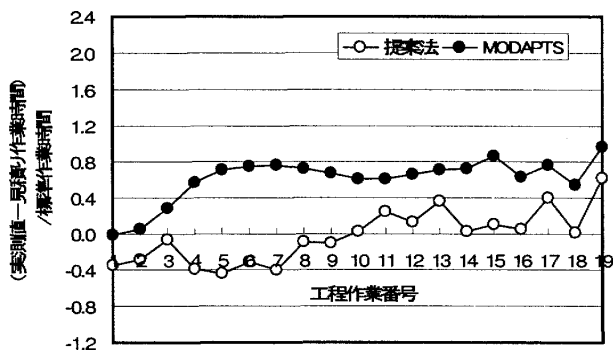


図8 各工程作業における提案法と MODAPTS 法から得られる作業時間の比較 (ProductB, 作業者 A)

表 15 最良作業順序に関する工程作業の特徴 (ProductB, 作業者 A)

JS:1 本のアングルの取り付け (() 内はアングル長さ)
JT:三角プレートの取り付け

工程作業	部品番号	作業内容と動作	作業順序
1	8,9	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7	1-4
2	10	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7	5-7
3	11	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 2	8-11
4	0	JT: MP9-MP7	12-14
5	0	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 4	15-18
6	3	JT: MP9-MP7	19-21
7	3	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 4	22-25
8	2	JT: MP9-MP7	26-28
9	2	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 4	29-32
10	7	JT: MP9-MP7	33-35
11	7	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 4	36-39
12	6	JT: MP9-MP7	40-42
13	6	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 5	43-47
14	1	JT: MP9-MP7	48-50
15	1	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 4	51-54
16	4	JT: MP9-MP7	55-57
17	4	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 5	58-62
18	5	JT: MP9-MP7	63-65
19	5	JS(1m): MP8-MP2-MP5-MP7 × 6	66-71

測値と予測値の差は小さいが、困難な作業が連続する工程作業 7~14 では予測値と実測値の差は大きい。提案法では、一連の組み立て作業を熟練すれば、構成する作業要素も熟練し、その熟練の程度を維持して類似する作業が行なえるものと仮定して、要素作業を分割、組み合わせて作業順序を評価している。作業者 C は、ProductB の組み立てを構成するほぼ全工程の作業時間の予測値が実測値に比べて小さいことから、組み立て方法が変化することで新しい経験が必要となり、同様の作業要素であっても習熟した程度が低くなり、作

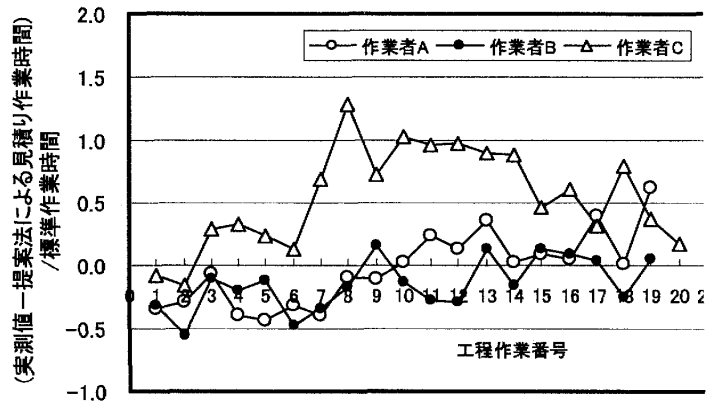


図9 ProductB の最良作業順序の工程作業における作業時間比の差

表 16 ProductB の製造に関する工程作業と作業困難さの評価値 (作業者 C)

JS:1 本のアングルの取り付け (() 内はアングル長さ)
JT:三角プレートの取り付け
*1: 作業姿勢 *2: 支持 *3: ボルト密集

作業順序	部品番号	作業内容	*1	*2	*3
1	10,9	JS(1m)	2	1	1
2	8	JS(1m)	2	1	1
3	3	JT	1	1	1
4	3	JS(1m)	3	4	1
5	0	JT	1	1	1
6	0	JS(1m)	3	4	1
7	1	JT	2	3	1
8	1	JS(1m)	2	3	3
9	2	JT	2	3	1
10	2	JS(1m)	2	3	3
11	6	JT	2	2	1
12	6	JS(1m)	2	1	1
13	5	JT	2	2	1
14	5	JS(1m)	2	1	3
15	4	JT	2	2	1
16	4	JS(1m)	2	1	3
17	7	JT	2	2	1
18	7	JS(1m)	2	1	3
19	11	JT	2	3	1
20	11	JS(1m)	2	3	3

業時間が長くなることが考えられる。これは、新しい組み立て方法を変更した回数などの時間的推移に関する情報を NN の入力として追加することで、作業者 C による予測時間の改善が期待できる。一方、作業者 A, B では新しい組み立て方法に対して、作業要素の熟練の程度が大きくは衰えていないものと考えられる。なお、連続する組み立て作業の過程での、組み立て方法の切り替えによる要素作業の学習効果の分析は今後の課題としたい。

5. ま と め

本研究では多工程連続作業から構成される部品組み立て作業に対して、作業困難さを考慮して作業順序を決定する方法を提案した。提案法は、複数の作業困難さを同時に考慮して、ニューラルネットワークによって標準作業時間の補正値を算出する機能を遺伝的アルゴリズムに組み込んだ方法である。

本論文では、はじめに組み立て作業を構成する動作を分類し、作業と動作の関連付けを行った。その後、具体的な構造物の組み立て問題に提案法を適用し、提案法から得られた作業順序を実際の組み立て作業の実験結果と比較した。実験結果から、提案法によって工程作業数の削減と作業困難さの評価値を小さくする作業順序が得られ、実測値に近似する総作業時間が算出されていた。

本研究では大型構造物の組み立て作業を取り扱っており、今後は、電気機器などを対象とする小型製品の組み立て作業に対する動作の分析と提案法の適用が課題である。

実験遂行にあたり、関西大学工学部システムマネジメント工学科松尾由宇君、渡邊潤一君、山根健一君にご協力頂いた。ここに皆様に深謝致します。本研究は(日本学術振興会)科学研究費補助(基盤研究B)「統合化製品ライフサイクルマネジメントによる事業創造プロセスのモデル化と管理方法(課題番号 17310100)」の一環としての研究活動である。

参 考 文 献

- [1] 日刊工業新聞社:「セル生産システム」,pp.1-50(2002)
- [2] 長尾陽一, 太田英明, 宮崎利彦, 松永好弘, 太田徹: “仕損じ防止機能を組み込んだ組み立て作業指示システムの開発”, 第49回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集,pp.49-50(2005)
- [3] L. Relange, J.M.Henrioud:“Systematic determination of Assembly state transition diagrams”, Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Fukuoka, Japan, pp.55-60,151-202,255-258(1997)
- [4] J.M.Henrioud, L. Relange, C.Perrand:“Assembly sequences, constraints, precedence graphs”, Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Besancon, France, pp.90-95(1997)
- [5] S. Caselli, F. Zanichelli:“On Assembly Sequence Planning using Petri Nets”, Proceedings of IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Pennsylvania, U.S.A, pp.239-244(1995)
- [6] S. Zorc, D. Noe and I. Kononenko:“Efficient Derivation Of The Optimal Assembly Sequence From Product Description”, Cybernetics and Systems, 29, pp.159-179(1998)
- [7] J. Bautista, A. Lusta, R. Suarez, M. Mateo, R. Pstor, A. Corominas: “Application of Genetic algorithms to assembly sequence planning with limited resources”, Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Porto, Portugal, pp.411-416(1999)
- [8] Raul Suarez, Sukhan Lee:“The Concept of Difficulty in Mating Operations”, Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Merina del Rey, CA, pp.176-181(1997)
- [9] A. Delchambre:“Computer-aided Assembly Planning”, Chapman&Hall, pp.203-237(1992)
- [10] 荒川雅裕, 田伏顕也, 冬木正彦:“多工程組み立て作業に対する作業分析 -第1報:実績収集のための On-Job デジタルマニュアル表示システム-”, 投稿中
- [11] M.Myrup Andereasen,S.Kahler,T.Lund,K.G.Swift: “Design for Assembly, Springer-Verlag”, pp.255-258(1988)
- [12] 日本モダプツ協会:「モダプツ法実践マニュアル」, 技報堂出版, pp.16-36(1995)
- [13] Karhu, O., Correcting working postures in industry: “A practical method or analysis”, Applied Ergonomics, 8, pp.199-201(1977)