

分解順序の記録と再生による簡易マーカを用いた部品の再組立支援手法

田中 隆太¹⁾(非会員) 游 夢博²⁾(正会員) 今野 晃市²⁾(正会員) 田中 隆充²⁾(正会員)

1) (株) アルファシステムズ 2) 岩手大学大学院総合科学研究科

A Study on Component Reassembly Assist Method Using Simple Marker by Recording and Replaying Disassembly Order

Ryuuta Tanaka¹⁾ Mengbo You²⁾ Kouichi Konno²⁾
Takamitsu Tanaka²⁾

1) Alpha Systems INC. 2) Design and Media Technology, Iwate University

概要

部品のメンテナンスや調査のために、すでに組み立てられている立体物を分解した後に再組立することがある。一般に、すでに組み立てられているものを再組立するときには、製品に付属している組立図を用いるが、組立図は二次元的な情報表現であるため、部品の細かい特徴を描写できず、表示手法に限界がある。また、組立図を紛失している場合や元々存在しない場合、組立手順を再現することが困難になる。そこで、本論文では、分解順序の記録と再生により部品の再組立を支援する手法を提案する。本手法は、ひとつの部品を分解するごとに、分解手順を記録し、再組立を行うときに適切な順序で再生することによって組立手順を再現し、ユーザに提示する手法である。

Abstract

For the maintenance and inspection of components, three-dimensional objects that have already been assembled often need to be disassembled and reassembled. When an assembled product has been disassembled and reassembled, the assembly drawing that generally accompanies the product is assisted to assemble. However, since assembly drawings are two-dimensional representations of information, they may not be able to depict all the detailed features of the components, and may have limitations in terms of what they can display. Furthermore, if the assembly drawing is lost or never existed in the first place, reproducing the assembly procedure can be difficult. Therefore, in this paper, we propose a method to assist the reassembly of components by recording and reproducing the order of disassembly. This method involves recording the disassembly procedure each time a component is disassembled, reproducing the assembly procedure by following the recorded order during reassembly, and presenting the procedure to the user.

1 本研究の背景と目的

部品のメンテナンスや調査のために、すでに組み立てられている立体物を分解した後に再組立することがある。自作 PC などの情報機器や機械類は、メンテナンスのために分解と再組立を行うことがある。机やベッドなどの大型の組立家具は、引越しや譲渡の際に、分解して運び、再組立することがある。一般に、すでに組み立てられているものを再組立するときには、製品に付属している組立図を用いるが、組立図は二次元的な情報表現であるため、部品の細かい特徴を描写できず、表示手法に限界がある。また、組立図を紛失している場合や元々存在しない場合、組立手順を再現することが困難になる。

立体物の再組立作業は一般に組立作業の反復であるが、組立を行う人間と再組立を行う人間が同一とは限らない。また、人間の記憶力は時間と共に低下するため、一度目の組立作業を完全に記憶したまま再組立を行うことは困難である。ヘルマン・エビングハウスは、3つのアルファベットから成り立つ無意味な音節系列を用いて、時間間隔と記憶の忘却量との関連性について検証した [1]。図 1 は文献 [1] を基に作成した時間経過と再学習効率について示している。横軸は音節系列を記憶してから経過した時間、縦軸は音節系列の再学習を行ったときの学習時間が一度目の学習時間の何パーセントに相当するのかわを示している。結果から、図 1 の横軸の 0 分から 1 時間の間のように、音節系列の記憶直後から 1 時間の間に急激な忘却が起きていることが示されている。

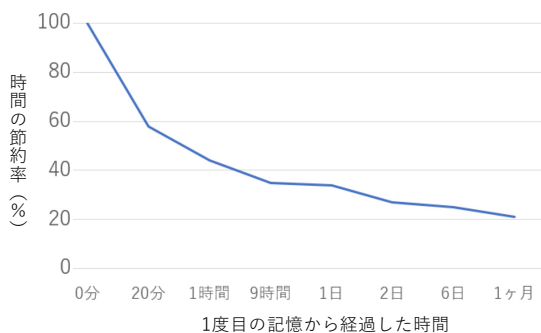


図 1 [1] の検証を基に作成した時間経過と再学習効率についてのグラフ

本論文では、分解順序の記録と再生により部品の再組立を支援する手法を提案する。本手法は、ひとつの部品を分解するごとに、分解手順を記録し、再組立を行うと

きに適切な順序で再生することによって組立手順を再現し、ユーザに提示する手法である。また、本手法を実装したシステムは、組立作業に苦手意識をもつユーザを想定しており、どのようなユーザでも快適に扱える汎用的な手法であることを念頭に置いている。また、本手法は、組立を行うユーザの作業や思考を極力妨げない特徴がある。

2 関連研究

2.1 立体物の組立作業支援

一般に立体物の組立作業は困難であり、様々な支援手法が提案されている。作業を支援する手段の 1 つとして、組立作業に曖昧さの起こらない製品設計をするという手法 [2] がある。文献 [2] では、組立作業の困難要因を評価し、作業の容易性を考慮した部品配置設計を行う手法を検討している。また、文献 [3] では、製品の改良の他に、組立操作に対する情報の提示手法を改善することで作業を支援する手法が挙げられる。さらに、文献 [4] では、組立作業マニュアルが作業対象物によって遮蔽されないシステムを提案している。

一方、手作業による組立を支援する技術として、Augmented Reality (AR) を利用した手法 [5],[6],[7],[8] が提案されている。文献 [5] では、AR を用いたマニュアルと紙や電子マニュアルを用意し、パズルの組立操作に関する操作時間、正答率、マニュアルの使いやすさを評価検証している。AR マニュアルの評価は、紙及び電子マニュアルに比べて高く、AR を用いた作業支援の有効性を示している。文献 [6] では、簡易マーカーを用いてカメラの位置を検出し、CAD で作成した画像とカメラ映像のマッチングを行い、作業指示を行うシステムを提案している。文献 [7] では、AR を用いて作業空間に手本となる教師ビデオを重ねて表示する事によって、複雑な作業を支援している。しかし、組立作業を行うときに形状の似た部品がある場合、部品を取り間違える可能性がある。文献 [8] では、AR アプリケーションを用いて立体物の組立手順や接合面を提示することで、組立を支援する手法を提案している。図 2 のように、実際の組立物を模した三次元モデルを表示することで、組立を支援する。複雑な立体パズルを用いて、デザインの知識を持つユーザと持たないユーザを対象に検証を行っている。実験の結果、アプリケーションはどちらのユーザからも組

立作業が快適になったという評価を受けている。現代において普及率が高いという理由でスマートフォン向けにシステムを開発しているが、スマートフォンの操作を行うために組立作業を一時中断する必要がある。図2の組立作業と比べると、埋蔵文化財の一つである石器の組立はより複雑で、より困難である。石器は、制作手法や当時の人間の行動を調査するために、石器を組み立てて元になる母岩を復元したり、復元された母岩を分解したりすることがある。しかし、石器は形状が複雑であり、再組立は容易ではない。ゆえに、他の立体物と同様に、分解と再組立には支援が必要とされる。図3は、Yangらの手法[3]が提示した石器の組立順序の実験結果を示している。この手法は分解と再組立にも有用である。

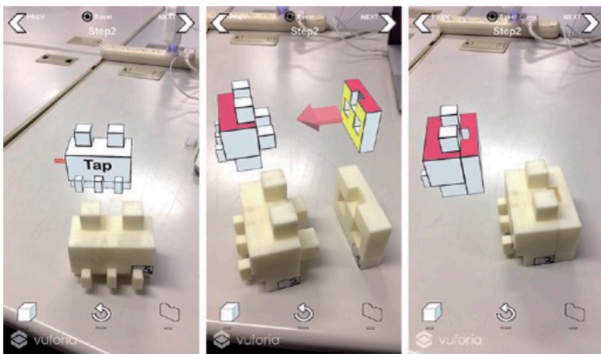


図2 ARアプリケーションを用いた組立支援 [8]

2.2 母岩の復元支援

立体物の再組立支援が必要な例として、考古学分野の母岩の復元支援システムが挙げられる。同一母岩から製作された石器は、接合資料と呼ばれる。接合資料は、その母岩を有する集団の行動や痕跡を理解する手がかりとなるため、石器の接合は考古学において重要である [9]。そのため、同一母岩から製作された石器の形状から接合面を推定することで、接合資料の作成が行われてきた。一方、剥離後の石器は石器製作者の剥離技術や製作技法を推測する手がかりとなるため、母岩を復元するために組み立てたとしても剥片を調査するために再び分解することがある。分解・調査された石器は、再び組み立てる必要がある。しかし、石器は複雑な形状をしており、専門的な知識があっても組み立てには労力を要する。さらに、手作業での調査は石器を破損する要因にもなるため、近年はコンピューターを用いて接合資料を作成する手法が提案されている。文献 [3] では、三次元計測点群

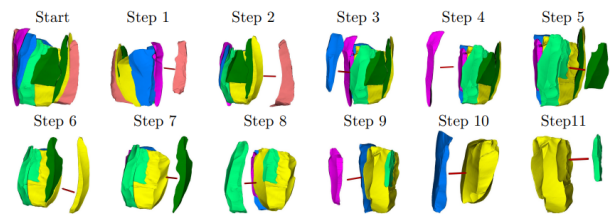


図3 石器の組立順序の提示 [3]

から、コンピュータ内で石器接合資料を作成し、接合資料のデータを解析することによって、石器の組立順序を抽出する手法を提案している。文献 [3] は石器を模したパズルを用いてパズルの組立時間を計測し、作業時間を大幅に減少させ、提案手法の有効性を示した。調査や展示のために繰り返し行うことが想定される石器の復元には有効だが、この手法には接合資料の三次元計測が必要であり、組立支援可能な対象物の範囲は限定される。

3 再組立支援手法

3.1 再組立支援システム

本節では、提案する再組立を支援するシステムについて説明する。本システムでは、専用の簡易マーカーを用いた分解順序の記録と組立順序の提示を可能とする。記録と提示を行うときには、ユーザの組立操作や思考を妨げないようにすることが重要である。図4(a)は分解と再組立を行う作業環境のレイアウト図である。作業場所は、対象物の分解と再組立を行う場所であり、対象物のサイズに応じてどのくらいの場所が必要かを考慮して決定する。図4では、55cm×45cmとしている。対象物は15cm×20cm程度の大きさである。また、図4(b)はレイアウト図を基に作成した作業環境である。カメラの高さは1mに設置されている。カメラのフォーカスタイプはオートフォーカスであり、対角視野 (dFoV) は78°である。ユーザの目の前には分解や組立を行うスペースがあり、作業場所は真上からWebカメラで撮影する。撮影内容はユーザの目の前にあるモニター画面に映し出されるため、ユーザはモニター画面を参照しながら作業を行う。作業場所の横にはマーカーを置くスペースを確保する。再組立時にユーザーが見ている状況と録画された映像は同一ではないが、接合箇所が見えるように録画された映像であれば、組立に利用できる。ゆえに、分解時には、接合箇所をきちんと見えるように録画する必要がある。

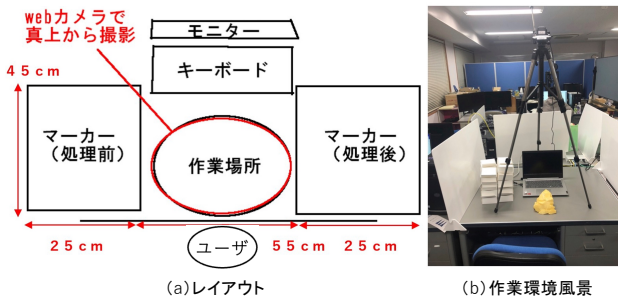


図4 作業環境のレイアウト

3.2 本システムの簡易マーカー

本節では、部品を識別するために使用する簡易マーカーと簡易マーカー読み取り機能について説明する。本システムでは、分解した部品と分解手順の映像を対応付けるための目印が必要になる。そこで、事前にシステムのために作成した目印の大きさや位置をカメラ画像内から検出し、モニターに映し出された目印の近くに、対応する情報をリアルタイムで表示する機能を開発する。目印にできるものの例として、AR マーカーや QR コード (Quick Response Code)[10] が挙げられる。

まず、AR マーカーは、目視による識別が容易な目印を作成することが可能である。また、一つの画像に複数の AR マーカーが含まれている場合でも、すべて同時に検出することが可能である。しかし、マーカー型ビジョンベース AR のライブラリは動作環境が限定的であったり [11]、本システムの他の機能と組み合わせたときにリアルタイムで動作させることが困難であるといった問題があった。また、QR コードについても、AR マーカーと同様に、複数の QR コードを一つの画像で同時に検出することが可能であり、本システムで利用可能である。しかし、本研究では分解手順を識別するために、QR コードより簡単に利用できる簡易マーカーを使用した。

本手法で使用する簡易マーカーは図5のような3×3マスで構成されている。赤色の部分がキーとなっており、カメラ内でこの赤を認識すると、該当する簡易マーカーの読み取りが開始される。青色のマスと黄色のマスは、簡易マーカーの ID 情報であり、各簡易マーカーは黄色=1、青色=0 として8桁の2進数の ID を持つ。例えば、図5の簡易マーカーが持つ ID は 10001001 である。本手法の簡易マーカーは固有の ID を持つ。そのため、1回の組立作業に対して同一 ID を持つ簡易マーカーを使用することはできない。

一方、マーカーの代わりに、キーボードを用いて分解した部品と分解手順の映像対応付けも可能であるが、部品の分解時に両手がふさがっていることがあるため、キーを押すのが難しい場合がある。また、部品が保存されている箱を探す際に、マーカーの代わりに、箱上面もしくは側面に番号を記載すれば探す手間を省けるが、箱の組立順序番号によって、箱の利用順が決まられてしまい、箱を再利用するときの利便性が下がる。よって、本手法では、独自開発した簡易マーカーを用いて、分解した部品と分解手順の映像との対応付けを行う。

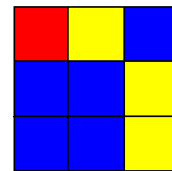


図5 本システム独自の簡易マーカー

3.3 簡易マーカーの識別

モニター画面に映し出された作業環境のカメラ映像には、図6のような格子状の白線が引かれている。格子の大きさは手で調整できるため、カメラの高さや簡易マーカーの大きさなどの環境によって適宜調整する。

取得したカメラ映像を、左上の画素から順に探索を行い、RGB 色情報を取得する。取得した画素の情報を格子毎にグループ化し、簡易マーカーに該当する赤色に近い色とそれ以外の色で2値化を行い、該当する画素を多く持つマスに簡易マーカーの座標とする。簡易マーカーの座標を発見したら、ID の識別を行う。赤色の画素を多く持つ格子を左上にして3×3マスの画素を探索し、簡易マーカーの識別手法と同様に2値化を用いてマス内の色を判別する。青色の画素を多く持つマスを0、黄色の画素を多く持つマスを1とする。簡易マーカーを識別した状態は図6のように表示される。同一格子内の画素の割合が一定以上であることをマーカー識別の条件としているため、図6のように、多少格子と簡易マーカーがずれていても識別が可能である。簡易マーカーの上側に表示された01011010という数字が、識別された簡易マーカーの ID 情報である。また、簡易マーカーに該当する色は組立を行う立体物と異なる色である必要がある。同

じ物体を撮影した場合でも、作業環境の光量とカメラの設定によって映像が取得する画素は大きく異なるため、簡易マーカを2値化するための閾値は適宜調整が必要である。

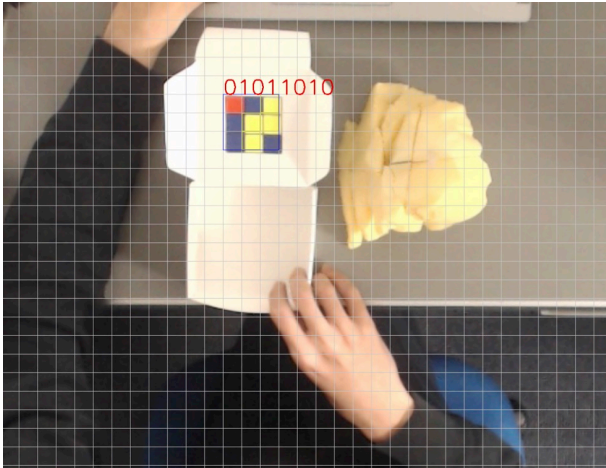


図6 簡易マーカを識別した状態

3.4 本システムによる分解と再組立

本システムは、主に3つの機能から構成されている。1つ目は、分解順序を記録する機能である。2つ目は、部品を並び替えるための機能である。3つ目は、組立手順を提示する機能である。以下に詳細な機能を説明する。

3.4.1 分解順序の記録手法

図7は簡易マーカと分解手順を記録した映像の対応関係を示している。図7のmarker1をカメラが2秒間識別し続けると、Movie1.aviの録画が開始される。録画開始と同時にユーザは分解作業を行う必要があるため、録画が始まるタイミングを音声ファイルの再生によって提示する。また、映像の妨げになるため、記録中は図6で表示されていたマーカIDと格子は非表示にし、図8のような状態になる。録画が開始されたらユーザはMovie1.aviの撮影中に立体物から部品を一つ分解し、分解した部品をmarker1が貼り付けられた箱に入れる。立体物から部品を外すとき、撮影した映像は再組立の際に手がかりになるため部品の接合面をカメラに向けて作業することが重要である。部品を箱に入れた後、marker1が貼り付けられた箱をカメラ画面外に移動し、marker1を識別不能な状態にすることで録画を終了する。この作業を繰り返すことによって、本システムは表1のような、映像とマーカIDとの対応表を作成し、

保存する。

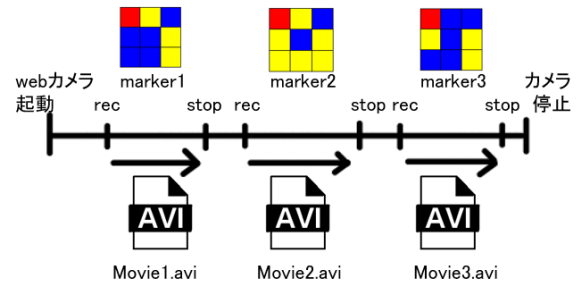


図7 簡易マーカと分解手順を記録した映像の関係図

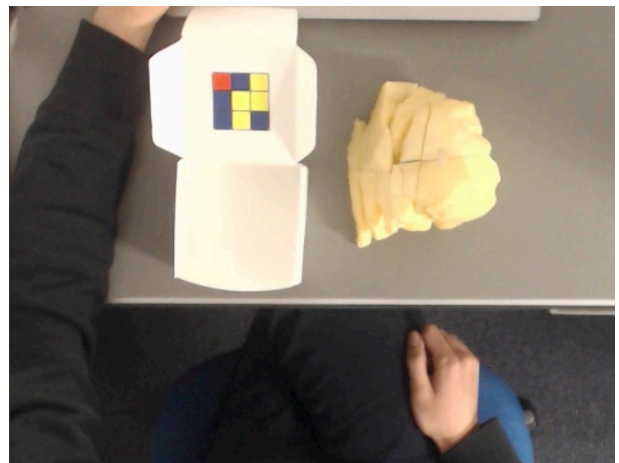


図8 動画の記録が開始されている状態

表1 図7の記録対応表

分解順序	マーカID	映像
1	10001001	Movie1.avi
2	10101111	Movie2.avi
3	00101001	Movie3.avi

3.4.2 分解順序の識別

本手法では、システムが保存した表1に示す情報に基づいて、部品が入った箱を組立順序に沿った順番に並べることで、組立作業を効率化する。表1の情報を持っている状態で簡易マーカを識別すると、識別した簡易マーカのIDと表1のマーカIDを照合し、一致する場合は分解順序の番号を簡易マーカの左上側に表示する。図9, 10は、実際に並び替えを行う様子である。例えば、図9の左側に赤丸で囲ったところが分解順序番号が表示されている場所である。

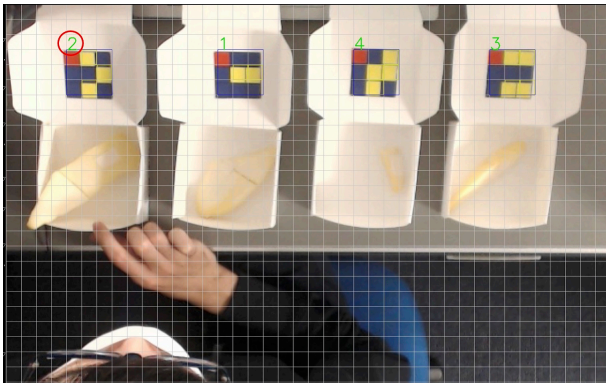


図9 簡易マーカースに対応する組立順序番号の表示

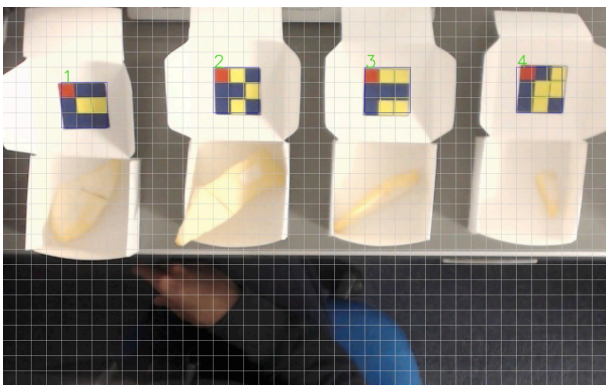


図10 組立順序番号を参照して並び替えを行う様子

3.4.3 組立順序の提示手法

3.4.2 項で部品が入った箱を分解順序に沿って並び替えることにより、部品を使用する順番が定まる。本項では組立順序が定まっている箱に基づいた、組立順序の提示手法について述べる。表1の情報をシステムが持っている状態で簡易マーカースを識別すると、識別した簡易マーカースのIDと表1のマーカースIDを照合し、一致する場合は対応する映像の逆再生を自動的に開始する。簡易マーカースに対応する映像は、図11のように表示される。分解手順を録画した映像を、録画した順番と逆順に再生することで、組立を支援する映像を提示することができる。ユーザは箱から部品を取り出し、箱に貼られたマーカースに対応する映像に従って組立を行う。ただし、組立を行う時にユーザは必ずしも一度の映像再生で作業を完了できるとは限らない。そのため、組立順序の再生が一度完了した後に、マーカースが移動していないことを確認できたらもう一度同じ動画の再生を繰り返すようにする。以上のような手法を用いることで、ユーザの組立作業を妨げることなく組立順序を提示することが可能で

ある。

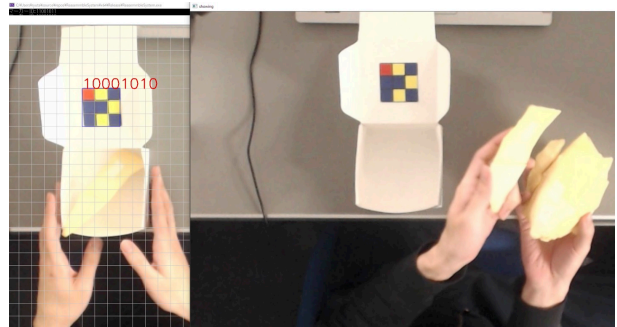


図11 マーカースに対応する映像の再生

4 実験

本章では3章で提案したシステムを用いて立体物の再組み立てをすることで、提案手法の有効性について検証を行い、得られた結果を考察する。

本実験では、図12(a)のような石器を模したパズルの組立を行った。パズルの部品総数は15個である。2.2節で述べたように、石器の組立と解体は調査において重要でありながらも、労力を要するものである。パズルを解体したものが図12(b)である。部品の形状は複雑なものが多く、支援なしで組み立てることは非常に困難である。



(a) (b)

図12 石器を模したパズルとその展開図

4.1 体験者実験

提案手法の有効性を検証するために、5人のユーザが図12のパズルを組み立てた。はじめに提案手法を用いずにパズル分解し、部品の位置がランダムになるようにシャッフルを行う。その後、支援システム無しで再組立を試みた。その次に、提案手法の支援システムを用いてパズルの分解を行い、箱の位置がランダムになるようにシャッフルを行う。その後、支援システムを用いて箱を組立順序に並び替え、再組立を試みた。分解終了から再



図 13 ツールに基づいて再組立を行う様子

組立を行うまでの間、部品を入れた箱を保管する。このとき、箱の順序関係は維持されない前提とすれば、部品の組み立て順序と、部品が保存されている箱の順序を再構成する必要がある。

表 2 は、パズルの分解を行うのに要した時間である。また、支援ツールは部品を 1 つずつ外すことを前提としているため、ツール無の時も同様に 1 つずつ部品を外す条件下で実験を行っている。表 2 から、ツールを使用することで平均して 6 分程度のオーバーヘッド (余剰時間) が発生していることがわかる。これは、分解手順を記録した映像を基に組立順序の再現を行うというコンセプト上、分解手順の記録データがいかに正確かが重要になるため、必要な時間だと考えられる。

表 3 は、パズルの並び替えを行うのに要した時間である。支援ツール無の時にはこの工程は行われないため、かかった時間がそのままオーバーヘッドになる。しかし、石器パズルのような各部品の識別が困難な立体物の組立を行う際に、組立に必要な正しい部品を選択することは重要になるため、必要な時間だと考えられる。

表 4 は、パズルの再組立を行うのに要した時間である。この作業は支援システム無で達成することは非常に困難であるため、一定時間経過時にユーザにギブアップする権利を与えている。本実験では、60 分経過時にギブアップできる。ギブアップした場合、経過時間を 60 分と表 4 に記載した。また、完成形を記憶しておらず、組立に行き詰ったユーザにはパズルの完成形の写真を与えた。

その結果、支援ツール無では 5 人中 3 人が途中で組立を諦め、残りの 2 人も写真の補助無しには組み立てることは不可能だった。しかし、支援ツールを用いることで、平均 13 分で組み立てることができるようになった。

図 14 は表 2~4, の結果をグラフにまとめたものであ

る。ツール有りの場合、分解に要した平均時間が 7 分 37 秒、並べ替えに要した平均時間が 4 分 43 秒、再組立に要した平均時間が 13 分 20 秒であることから、分解から組立の作業を完了させた平均時間は、25 分 40 秒であった。

表 2 分解に要した時間

体験者	ツール有	ツール無	OH(余剰時間)
A	6 分 43 秒	46 秒	5 分 57 秒
B	9 分 31 秒	1 分 19 秒	8 分 12 秒
C	8 分 23 秒	1 分 47 秒	6 分 36 秒
D	7 分 03 秒	2 分 52 秒	4 分 11 秒
E	6 分 24 秒	1 分 32 秒	4 分 52 秒
平均	7 分 37 秒	1 分 39 秒	5 分 58 秒

表 3 並べ替えに要した時間

体験者	ツール有：時間	ツール無：時間
A	4 分 41 秒	-
B	4 分 46 秒	-
C	7 分 01 秒	-
D	4 分 05 秒	-
E	2 分 51 秒	-
平均	4 分 43 秒	-

表 4 再組立に要した時間

体験者	ツール有：時間	ツール無：時間
A	10 分 06 秒	60 分
B	11 分 36 秒	44 分 58 秒
C	15 分 43 秒	58 分 36 秒
D	10 分 51 秒	60 分
E	16 分 46 秒	60 分
平均	13 分 20 秒	56 分 43 秒

表 5, 表 6 は図 14 のユーザ A に焦点を当ててパーツ毎の作業時間をまとめたものである。表 6 はパーツ毎の組立に要した時間を表しているが、支援ツール無で作業を行うと組立ミスによる作業進捗の逆行が発生し、1 つのパーツに要した作業時間を定量化できなかったため省略している。ツール有で分解を行う際の時間にばらつきがあるが、1 つのパーツに時間がかかった要因として、

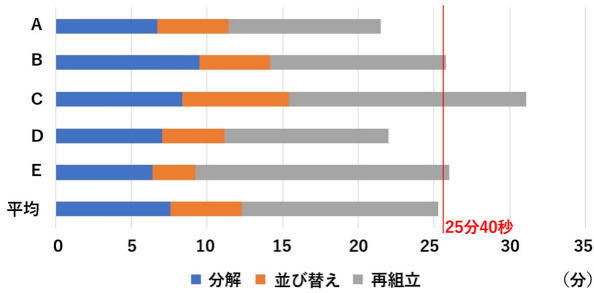


図 14 支援ツール有の作業全体時間

マーカの認識能力が低下した際にロスタイムが発生した点や、分解手順を丁寧に記録しようとした点が挙げられる。

ツール有で再組立を行う際に、1つのパーツに時間がかかった要因として、同様にマーカの認識能力によるロスタイムが挙げられる。また、分解手順を記録する際に手で隠れた場合や、カメラから垂直な位置に接合面があった場合に接合面が視認できなくなり、効率が低下するといった問題が発生した。これは、分解手順の記録手法をユーザに提示する手法が不完全だったことが原因として考えられる。

4.2 先行研究との比較実験

2.2 節で述べた手法 [3] は、組立手順を画面上に表示する手法である。文献 [3] で述べられている組立手順のみ画像で提示する手法と、本研究の支援手法を用いて、未経験者と 15 年以上の遺跡調査や遺物処理の経験年数のある考古学者による再組立実験を行い、本手法の有用性を検証した。文献 [3] で述べられている手法を用いて、未経験者と考古学者による再組立時間の比較を図 15 に示す。6 人の未経験者が組み立てを行ったときの平均組立時間を「先行①」、考古学者による組み立てを行ったときの組み立て時間を「先行②」で示す。「先行①」と「先行②」の再組立時間は、文献 [3] の結果から引用したものである。ここで「先行①」に示した未経験者による組み立てでは、組み立て上限時間を 60 分とした。よって 60 分で組み立てを締めた場合は、60 分として計算している。支援手法を使用しない場合、文献 [3] の 6 人の未経験者群は再組立完了まで時間いっぱいの 60 分かかった。一方、考古学者は組立に 30 分かかった。文献 [3] の手法では、未経験者による再組立は 9 分で完了した。一方、考古学者による再組立は 13 分で完了した。文献 [3] の手法の支援を受けた場合、未経験者は考古学者より 4

表 5 パーツ毎の分解に要した時間 (ユーザー A)

パーツ	ツール有：時間	ツール無：時間	OH
1	24 秒	2 秒	22 秒
2	18 秒	2 秒	16 秒
3	42 秒	3 秒	39 秒
4	25 秒	7 秒	18 秒
5	30 秒	3 秒	27 秒
6	31 秒	2 秒	29 秒
7	18 秒	2 秒	16 秒
8	15 秒	3 秒	12 秒
9	37 秒	7 秒	30 秒
10	16 秒	3 秒	13 秒
11	25 秒	2 秒	23 秒
12	20 秒	2 秒	18 秒
13	27 秒	3 秒	24 秒
14	20 秒	7 秒	13 秒
15	36 秒	3 秒	33 秒
16	19 秒	0 秒	19 秒
合計	6 分 43 秒	46 秒	357 秒
平均	25 秒	3 秒	22 秒

分短縮した。この結果は次の理由によると考えられている。3D プリンタで作った石器は、剥離面の再現精度が低いところがある。実物の場合は、自然面と表面の色などが手がかりになるため、考古学者は組み立ての時間は更に短くなるはずである。また、考古学者は文献 [3] の手法で構築した手順が正しいかどうかを、提示画像を確認しながら組み立てたため、未経験者よりも時間がかかった。よって、文献 [3] の手法は未経験者には有用であることが示された。

文献 [3] の手法と本研究の支援手法を用いたときの、未経験者による分解と再組立時間の比較を図 16 に示す。「先行①」の「支援なしの再組立」と「支援ありの再組立」は文献 [3] の結果から引用したものである。再組立手法を行うためには、分解順序の確定と記録が必要である。「先行①」の「組立情報の構築」は文献 [12] の結果から引用したものである。「本手法」は、「先行①」とは異なる 5 人の未経験者が分解と組み立てを行ったときの平均時間を示す。支援手法を使用しない場合、文献 [3] の未経験者群は再組立完了まで時間いっぱいの 60 分か

表 6 パーツ毎の組立に要した時間（ユーザー A：支援ツール有）

パーツ	ツール有：時間
1	20 秒
2	24 秒
3	55 秒
4	35 秒
5	25 秒
6	56 秒
7	36 秒
8	53 秒
9	54 秒
10	34 秒
11	51 秒
12	46 秒
13	29 秒
14	38 秒
15	29 秒
16	21 秒
合計	10 分 6 秒
平均	29 秒

かった。一方、「本手法」を用いた 5 人の未経験者群は組立に平均 57 分かかった。文献 [3] の手法は組立情報の構築に 264 分かかった。一方、「本手法」はパーツの分解と並び替えが 12 分 20 秒で完了した。支援手法を使用する場合、文献 [3] の未経験者群は 9 分で完了した。一方、「本手法」を用いた未経験者群は組立に 13 分 20 秒かかった。「本手法」の「支援ありの再組立」は「支援なしの再組立」より平均 43 分 23 秒短縮した。このことから、本手法は再組立に効果があることを確認できた。また、t 検定を用いて計算された p 値 (0.000062) は 0.05 を下回っていることから、有意性が認められる。また、「支援ありの再組立」について、図 15 の「先行②」の手法と「本手法」は、同等の再組立時間とすることができた。このことは、組立映像を提示することの有効性を示唆している。一方、「支援ありの再組立」に関して、本手法より文献 [3] の手法の方が再組立時間が平均 4 分 20 秒短い。しかし、文献 [3] の手法は石器の計測データに基づいて組立情報を構築する必要があり、本実験で用い

た石器データでは、組立情報の構築に 264 分かかっている。一方、本手法では実物を分解して記録する時間が 13 分 20 秒かかっている。組み立て情報構築時間と再組立の時間を総合すると、本手法は文献 [3] の手法と比較して、有用性が向上している。

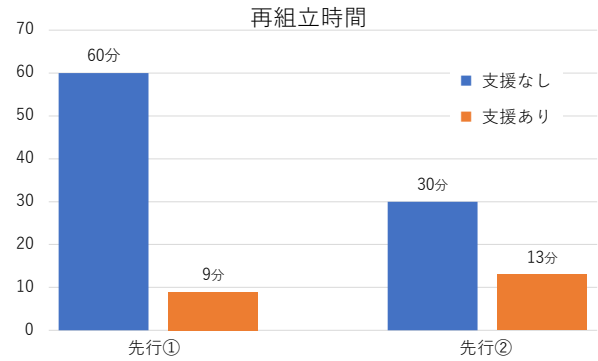


図 15 文献 [3] による支援ありとなしの場合に未経験者と考古学者の再組立時間比較（先行①は未経験者が組立。先行②は考古学者が組立。）

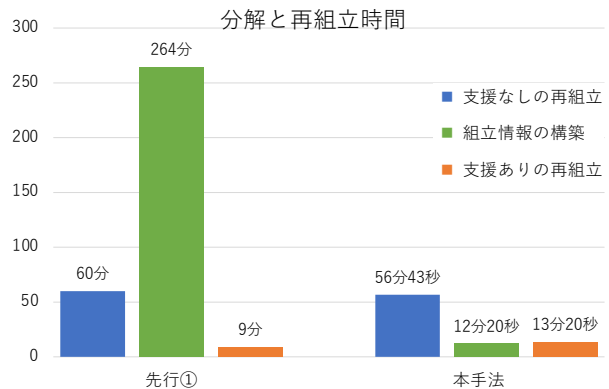


図 16 文献 [3] の「先行①」と本手法の支援ありとなしの場合に未経験者の再組立時間比較（先行①と本手法両方とも未経験者が組立。）

5 まとめと今後の課題

本論文では、一度分解した立体物を再組立することの困難さに着目し、簡易マーカーを用いて部品の分解順序を記録することで再組立を支援する手法を提案した。本手法では、立体物から分離した部品を簡易マーカーと対応付け、分離した順番を記録することによって、再組立に使用する部品の順番を明確にした。また、再組立を行う際に、分解時の映像を逆再生したものを提示することで組立の工程を疑似的に再現し、組立時間を効率化し

た。本論文で提案した手法を実装し、調査を目的に分解と再組立を行うケースがある石器を模したパズルを用いて検証を行った。本研究で提案したシステムを用いることで、システムを使用しなかった場合と比較して再組立に要した作業時間が減少し、組立内容も正確なものになり、本手法の有効性を確認した。

今後の課題としては、分解内容をよりわかりやすく録画するための手法と、操作性を改善することが挙げられる。

なお、本論文は NICOGRAPH 2022 で発表した論文 [13] に加筆したものである。論文査読者からの有益なご指摘に深謝する。

参考文献

- [1] ヘルマン・エビングハウス著, 宇津木保 訳, 望月衛 閲: “記憶について”, 1978.
- [2] 荒川雅裕: “組立作業における作業困難を回避するための部品配置設計と作業時間推定”, 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.784, pp. 4352-4366, 2011.
- [3] XI YANG, KOUICHI KONNO, FUMITO CHIBA, SHIN YOKOYAMA: “Visualization of Flake Knapping Sequence with Analyzing Assembled Chipped Stone Tools”, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 18, No. 1, pp. 40-50, 2019.
- [4] 武田研恒, 加藤龍, 森下壮一郎, 杉正夫: “水平作業台ディスプレイを用いた組立作業支援システムのための自動的に遮蔽を解消する情報提示手法の提案”, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp. 23-24, 2014.
- [5] 瀧塚令子, 加藤晴久, 柳原広昌, 菅野勝: “AR技術を利用した操作支援装置の有用性についての検証-実用に即したユースケースを使った実験結果の報告”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.40, No.26, pp. 41-46, 2016.
- [6] 山中耕平, 榎原弘之, 是澤宏之: “ARを用いた作業支援システムにおける作業確認の自動化”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 36-37, 2020.
- [7] 後藤道彦, 植松裕子, 斎藤英雄, 仙田修司, 池谷彰彦: “作業空間への教師ビデオ重畳表示による AR支援システム”, 画像電子学会誌, Vol.39, No.5, pp. 631-643, 2010.
- [8] SAKESON YANPANYANON, THONGTHAI WONGWICHAI, TAKAMITSU TANAKA: “AUGMENTED REALITY (AR) APPLICATION FOR CUBE PUZZLE ASSEMBLING-Follow the application in a smartphone step-by-step while assembling”, Journal of Science of Design, Vol.4, No.1, pp. 19-28, 2020.
- [9] 五十嵐彰: “考古資料の接合: 石器研究における母岩・個体問題”, 史学, Vol.67, No.3/4 pp. 105-128, 1998.
- [10] 長屋隆之, 山崎知彦, 原昌宏, 野尻忠雄: “高速読取り対応 2 次元コード [QR コード] の開発”, 情報処理学会, Vol.52, pp.253-254, 1996.
- [11] “ARCore とサポートされている開発環境の概要”, <https://developers.google.com/ar/develop> (参照 2022-02-26).
- [12] XI YANG, KATSUTSUGU MATSUYAMA, KOUICHI KONNO: “A New Method of Refitting Mixture Lithic Materials by Geometric Matching of Flake Surfaces”, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 15, No. 4, pp. 167-176, 2016.
- [13] 田中隆太, 今野晃市, 田中隆充: “部品の再組立支援インタフェースのための AR マーカーを用いた分解順序の記録手法の検討”, NICOGRAPH 2022, (F-8), 1-9, 2022.

田中 隆太



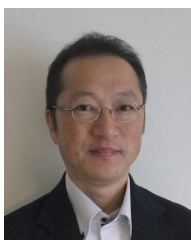
2020年岩手大学工学部卒業。2022年岩手大学大学院総合科学研究科理工学専攻修士課程修了。同年、アルファシステムズ(株)に入社。

游 夢博



2012年西北農林科技大学(中国)卒業。2015年に岩手大学工学研究科デザイン・メディア工学専攻博士前期課程修了, 2018年同大学同研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年より西北農林科技大学講師。2022年より岩手大学助教, 現在に至る。コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。芸術科学会会員。

今野 晃市



1985年, 筑波大学第三学群情報学類卒業。(株)リコーソフトウェア研究所, ラティス・テクノロジー(株)を経て, 現在, 岩手大学工学部教授。CG, CAD, VR, 遺物計測などの研究に従事。著書に「3次元形状処理入門」がある。博士(工学)。芸術科学会, 映像情報メディア学会, 日本情報考古学会, 情報処理学会, EuroGraphics会員。

田中 隆充



1993年神戸芸術工科大学卒業。1996年Central St Martins College of Art and Design(ロンドン芸術大学大学院)修了。その後,(株)田中デザインオフィスにてプロダクトデザイナーとして勤務し, 家電, 携帯電話, 産業機械, 照明器具等のデザインに携わり, 幅広い分野でグッドデザイン賞等を多数受賞。2004年千葉大学大学院博士課程修了(博士(工学))。現在は岩手大学教授, 北陸先端学科学技術大学院大学客員教授, 日本包装機械工業会講師等。日本デザイン学会, 芸術工学会, 大学美術教育学会, Asia Digital Art and Design Association Japan会員。