

立体物の組み立て過程の表現方法の比較 Comparison of expression mode of the assembly process of 3D objects

中津 櫓男† 伊藤 涼祐†
Narao Nakatsu Ryosuke Ito

1. はじめに

利用者が自分で組み立てなければならない製品には、通常組み立ての過程をいくつかのステップに分けて説明した説明書が添付されており、そのステップに従って組み立てを行う。各ステップは通常、ある方向からみた組み立て途中の製品図からなっている。その図は、本来 3 次元であるものを 2 次元で表現しているため、細かい部分や隠れた部分がわかりにくい時があり、試行錯誤しながら組み立てなければならない場合がある。また、説明書が簡潔になりすぎて、利用者が組み立て工程を十分理解できない場合があり、短時間できれいに組み立てることが困難なケースも多い。最近のように、製品の多品種少量生産が一般的になり、製品のライフサイクルが短くなれば、すべての製品に完成度の高い説明書を準備することが困難となっている。そこで説明図に代わって、初めて製品を組み立てる人にもわかりやすいものが必要とされる。

VRML は空間内に 3 次元物体をモデル化するための言語で、利用者が空間内部を移動しながら自由に視点を変えて物体を眺めることが可能である。筆者らはこの機能を利用して、部品の組立工程を 3 次元アニメーションとして表示するシステムを開発した[1]。利用者は、最もわかりやすい視点から、アニメーションを見ることができ、アニメーションの再生中に視点の変更が可能である。こうした機能はテレビゲームでも実現されており、利用者にとって難しい機能ではなくなっている。Parallel Graphics[6]社は機械のメンテナンスマニュアルを 3D 化することを提案し、そのツールを開発・販売している。わが国でも Web 立体コンテンツの利用が進みつつある[7]。本報告ではこの 3 次元アニメーションの効果を調べるために、平面図による説明図のみ、視点の変更が可能な 3D の説明図、組み立て過程を 3D アニメーション化したものを使ってそれぞれ同一の物体の組み立て実験を行ったのでその結果を報告する。2D アニメーションの効果について、宍戸らは実物とリンクした教材としてアニメーションを利用し、その効果を評価している[4]。渡邊らは解説手段としてのアニメーションの効果を考察している[5]。ここでは 3 次元アニメーションの効果を、物体を組み立てるという視点から調べた。

2. 実験の方法

2.1 予備実験

19～24 歳の大学生 60 名を対象に、3D アニメーションを見ながら図 1 にある車両ベースの組み立てを行わせ、完成までにかかった作業時間を測定した。この予備実験は、組み立て作業時間の個人差を測定するためのものであるが、視点の変更方法を含めたアニメーションソフトの使用方法

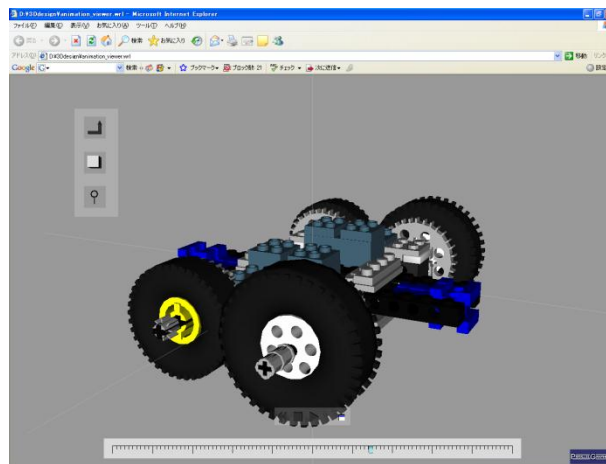


図 1 予備実験で作成した車両ベース

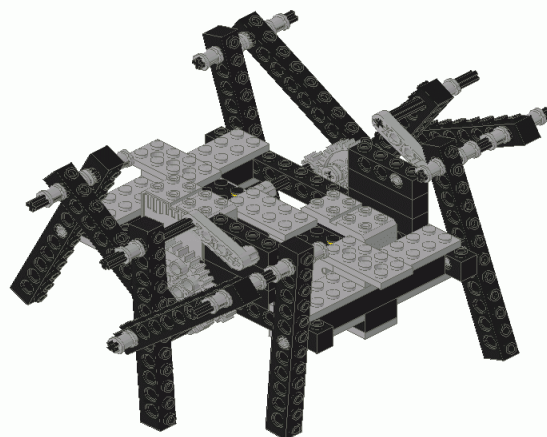


図 2 本実験で作成したロボット

の練習も兼ねている。実験後、3 次元図形の認識に関係したペーパーテストを行った。このテストは物体の展開図や立体の構造認識に関する内容になっている（付録参照）。

予備実験における作業時間と立体認識力テストを参考に、グループ間格差が無くなるよう、被験者を 20 人ごとの 3 グループにわけ、2.2 に示す 3 種類の組み立て説明資料をもとに、図 2 の 6 足歩行ロボット[3]の組み立て作業を行ってもらった。このロボットは 92 個の LEGO 部品からなり、足の部分の作成には、複数の部品の立体的な位置関係の把握が必要となる。予備実験によるグループ分けを表 1 に示す。グループ名は本実験で用いた材料名としている。

2.2 組み立て過程の表現方法

どの資料においても全体の組み立て過程を 8 ステップにわけ、各ステップにおいて必要となる部品リストを表わす

† 愛知教育大学教育学部 Faculty of Education, Aichi University of Education

表1 予備実験によるグループ分け

	作成時間	立体認識テスト
平面図 グループ	avg:22.5分 SD:7.05	avg:4.45点 SD:2.18
立体図 グループ	avg:22.5分 SD:8.67	avg:4.40点 SD:2.58
アニメ グループ	avg:22.5分 SD:6.87	avg:4.45点 SD:1.63

同じ画像を表示した。その画像に加えて、組み立て後の完成品の表示方法として次の3つの材料を準備した。

平面図：各ステップで使用する部品リストを全て使ってできるそのステップの完成図を2D画像で表示したもの。ただし、ステップ5,7,8では、完成図だけでは作成が困難なので、補助的な説明図も同時に提示した(図3)。

アニメ：各ステップで使用する部品リストを示したwindowとアニメーション表示のためのwindowが表示される。アニメーション表示windowでは、平面図と同一のステップで、組み立ての様子を3次元アニメーションで提示した。繰り返し再生すること、再生の一時停止・再開は可能であるが、早送りや巻き戻しをして任意の時点から再生することはできない。今回使用したアニメーションでは複数の部品が同時に移動する作りになっている。視点の変更は、再生中を含め、任意の時点で可能になっている。このソフトの操作は、予備実験で使用したものと同一である。(図4)

立体図：アニメと同じソフトを利用するが、アニメーション表示windowにはそのステップの完成形だけが表示さ

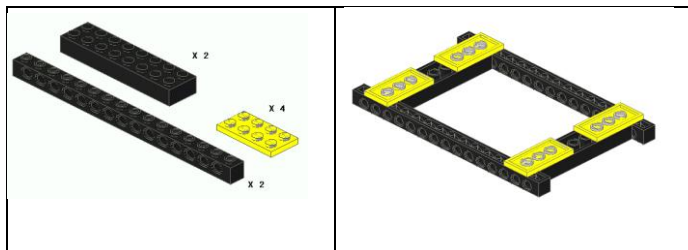


図3 部品リストを示す図と完成図

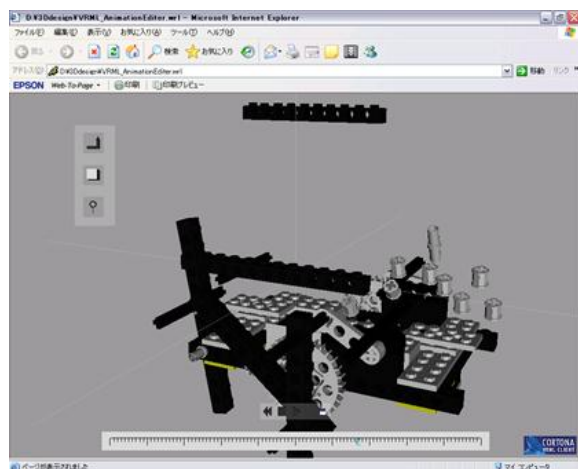


図4 アニメーションの1場面

れる。アニメーション再生ができないように設定されているが、拡大・縮小と視点の移動は可能で、完成形をさまざまな角度から見るができる。

各グループの被験者には、それぞれの材料を見て図2のロボットを作成してもらった。いずれの実験においても組み立てが終了した時点で実験を終了した。以前の実験の経験では、必要な部品を探し集めるために多くの時間を必要としていた。また形状が同じで長さの違う部品を誤って使用するケースが見られた[2]。この反省から今回の実験では、各ステップで必要とする部品を予め分けて準備しておいた。このため被験者は部品を探す手間がかからず、また、誤った部品を使うことも無く、組み立てに集中することができた。実験では各ステップを開始した時間を記録するプログラムを作成しておいた。これによって、各ステップごとに要した時間や以前のステップに戻った場合も検出できた。

実験後、LEGOブロックで遊んだ経験、LEGOブロックの好みの程度、パソコン操作の得意度についてのアンケート調査と、本実験について意見調査を行った。1時間経過しても組み立てが終わらない場合は、その時点で実験を中断して、アンケート調査を行った。

3. 実験結果

予備実験と本実験における作業時間の関係を見るために、相関分析を行った。その結果、両者には弱い正の相関が認められた($r = .476, p < .001$)。予備実験と本実験の前半の作業時間の間には、更に強い正の相関が認められた($r = .587, p < .001$)。この結果から、予備実験の作成時間が短い人ほど本実験での作成時間が短いことが確認でき、材料による差を見るためには、予備実験の結果に基づいて均等なグループ分けをすることの必要性が確認できた。

本実験の結果を表2に示す。比較的簡単な1~6ステップまでを前半、複雑な足の組み立て工程である7,8ステップを後半とした。前半は部品を選び、結合場所と部品の方向さえ間違わなければ正しく組み立てることができる。後半は、モータの回転がギアを通してロボットの足の上下運動として伝わるメカニズムを意識しなければ、正しい組み立てができない。本実験において、60分をオーバーしたものは実験を中断した。中断時にステップ7で作業中であれば、その被験者のステップ7の作業時間を(中断時までのステップ7の作業時間+ステップ7の作業時間の平均/2)とし、ステップ8の作業時間をステップ8の作業時間の平均とした。一方、中断時にステップ8で作業中であれば、その被験者のステップ8の作業時間を、(中断時までのステップ8の作業時間+ステップ8の作業時間の平均/2)とした。制限時間内に完成できなかった者は、平面図で3名、立体図で2名、アニメで0名であった。

表2 本実験の結果(単位は秒)

	前半	後半	全体
平面図 グループ	947.5 SD: 305.2	1726.7 SD: 767.3	2674.2 SD:956.6
立体図 グループ	1107.5 SD: 403.5	1264.0 SD: 575.9	2371.4 SD:915.7
アニメ グループ	1057.5 SD: 208.9	1096.6 SD:324.9	2154.0 SD:462.5

本実験において、組み立て時間全体では 3 つの材料で有意差は見られなかった($F(2,57)=1.98, n.s.$)が、後半だけに限定すると 1%水準で有意差がみられた($F(2,57)=5.92, p=0.0046$)。さらに後半では、Welch 検定によれば、平面図とアニメの間には 1%水準で有意差が認められ($t(26)=3.30, p=0.0028$)、平面図と立体図の間には 5%水準で有意差が認められた($t(35)=2.01, p=0.043$)。立体図とアニメでは有意差は認められなかった。

次に、立体図形の認識テストの影響を分析した。テストは 10 問で 1 問 1 点として採点し、各グループ 20 名の中で、テストの得点の上位 8 名を空間認識力高群、下位 8 名を空間認識力低群とし、使用した材料と空間認識力の 2 要因で、繰り返しのある二元配置法による分散分析を行った。

予想としては空間認識力高群のほうが空間認識力低群よりも作業時間が短いと想像される。そこで、各グループの上位 8 名(下位 8 名)の選び方は、高得点(低得点)順に選んでゆくが、最後に同一得点の者から何名かを選ぶ必要が生じた場合は、なるべく作業時間の長い者(短い者)を選ぶことにした。このように空間認識力の差の影響が小さくなるように群を構成して分析したが、使用した材料による有意差は認められなかったが、空間認識力高群のほうが 5%水準で有意に作業時間が短かった($p=0.037$)。両者の交互作用は認められなかった。

アンケート項目の中で、パソコン操作が得意かどうかを 5 段階で調査した。この得点と使用した材料の 2 要因で、繰り返しのある二元配置法による分散分析を行った。この結果、パソコン操作が得意な群はそうでない群に比べ、作業時間が有意に短かった($p=0.03$)。

かつて LEGO ブロックで遊んだ経験と完成に要する時間の間に、相関はなかった。

実験終了後には、難しかったステップと実験を通しての感想・意見を書いてもらった。その結果、ほとんどの被験者が後半部分の難しさをあげていた。

アニメグループで見られた意見のいくつかを以下に記す。

○さまざまな角度から見ることで、部品の長さや穴の位置の確認に役立った。

○自分で組立図を動かせるので、穴の位置などを間違えずに組み立てることができた。

○平面より立体のほうが分かり易い。言葉でも説明があれば、なおよい。

● 同時に数ヶ所部品が動くと、順番がわからなくなった。1 つずつ動く場合は分かり易かった。

立体図グループで見られた意見の中には、予備実験のアニメーションよりも、完成した図が表示されるだけのほうが組み立てやすく感じたという意見もあった。

平面図グループでは他のグループと違い、否定的な意見のほうが多かった。部品のつながりが平面図から判読するのが難しいことがあり、予備実験のアニメーションのほうが分かり易かったという意見が多くあった。

4. 考察

表 2 に示すとおり、統計的な有意差は認められないが、前半部分については、作業時間の単純平均は平面図<アニメ<立体図の順になり、平面図グループが最も短い時間で組み立てることができた。立体図とアニメでは、各ステッ

プの初期状態では、正面から見た立体が表示されており、まず視点の移動を行って見やすい視点から立体を見るという操作が不可欠である。また、最も分かり易い視点を探すのに、多少の試行錯誤が必要になる。これに対して平面図では、最も分かり易いと思われる視点から見た図が最初から表示される。このため、一見して部品の配置や接続関係が理解できる場合には、平面図を見て組み立てる場合が最も作業時間が短かったものと思われる。

これに対して後半部分の組み立てでは、作業時間の単純平均ではアニメ<立体図<平面図の順になった。先にも述べたように後半部分は複雑で、複数の部品が 1 本の軸で連結されたり、可動部品を適切な位置に移動してからでないと部品を連結することができなかつたり、ギアの回転がロボットの足の上下運動に変換されるように組み立てなければならぬなど、完成図と同じになるように組み立てるための工夫を必要とする。斜め上から見た平面図だけでは部品の関係が分かりにくいと考えて、真上からみた部品の配置図など、補足的な図面を同時提示したが、それでも部品の位置関係・接続関係が平面図では捉えにくかったようである。このため平面図グループでは前半の倍近くの時間がかかっていた。ちなみに平面図グループで制限時間内に完成しなかった 3 名のうち 2 名は、前半部分は平均的な所要時間であったにもかかわらず完成に至らなかった。立体図では完成型が 3D で表示されており、自由に視点を移動して部品の位置関係・接続関係を把握できるが、どの順に部品を組み立ててゆくかは利用者に任されている。組み立て順を誤れば、一度ばらして再度組み立てる手順を必要とするケースが起こり得る。アニメでは部品を組み立てる順がアニメーションで示されるため、その順に従ってゆけば、問題なく組み立てが完了する。

後半部分については、平面図グループが他のグループに比べて有意に時間がかかっていた。立体図とアニメグループでは、単純平均ではアニメグループのほうが作業時間が短かったがその差は有意とは認められなかった。一般に、組み立て時間は個人に負うところが大きい。平面図や立体図は構造を理解した上で、組み立て手順を考えなければならないが、アニメでは組み立ての手順をアニメーション表示するため、どのように組み立てればよいかは分かりやすかったものと思われる。表 2 によれば、アニメグループは前半・後半とも組み立て時間の分散が他のグループに比べて小さくなっている。少なくとも 1 回はアニメーションを視聴する必要があるが、アニメーションで示される順に部品を組み立ててればよいので、立体構造の理解の優れた者もそうでない者も差が少なくなったと思われる。他のグループでは、立体構造をすばやく理解したものは早く、そうでないものは遅くなり、組み立て時間の分散が大きくなったと考えられる。

本実験の結果から、立体を表示して、自由に視点を移動できる機能は有効であることは認められたが、アニメーション自体の効果については、統計的な有意差は認められなかった。被験者の意見によれば、立体図から容易に立体構造の理解ができる者にとってはアニメーションを煩わしいと感じ、そうでない者にとってはアニメーションは分かり易いものの、複数の部品が同時に動くアニメーションではかえって混乱を引き起こす場合があるようであった。

同時に 1 つの部品しか動かさないようなアニメーションは確かに分かりやすいが、アニメーション全体の長さが長くなり、結果として作業時間が延びることになる。これまでの経験から、完成率はアニメーションの作りかたによって大きく左右される。特に、多くの部品が同時に移動するアニメーションでは、人間は各部品の動きを十分に理解できないことがわかった。従って、組立工程をアニメーション化する場合、同時に移動させる部品の数は、高々 2 ～ 3 個にすることが望ましい。

個人の立体認識力と作業時間の関係では、立体認識力の高い群がそうでない群に比べて 5 % 水準ではあるが、有意に作業時間が短いことが確認できた。

立体認識力の高い群は、材料を長時間見る必要なしに、物体の構造を理解でき、作業に取り掛かることができる。一方、立体認識力の低い群は、視点を変えていろいろな方向から物体を眺めて構造を理解したり、十分に構造が理解できないまま作業を始めて、途中で試行錯誤をしながら組み立てたりするため、時間がかかっているようである。

今回の実験で使用した説明材料は全てパソコン上で閲覧し、マウスのクリックやドラッグ操作を必要とする。このため、スムーズに説明材料を見るにはパソコン操作に慣れているほうが有利であると考えられる。これは本実験からも確認され、パソコン操作を得意と回答した上位 5 名と不得意と回答した下位 5 名を比較したところ、作業時間はパソコン操作が得意と回答した 5 名の群が 5 % 水準で有意に短かった。

以上の結果から、次のようにまとめることができる。

1. 単純な構造物はその完成形を平面図として見せるだけで十分である。一方、複雑な構造物については、平面図だけでは難しい。
2. 構造が理解できてもある決まった手順を踏まないと組み立てることができない場合（例えば、立体パズルなど）、あるいは、立体構造の把握が苦手な人にはアニメーションによる説明が有用と思われる。
3. 構造を理解すれば、組み立て手順を瞬時に頭に思い浮かべることのできる人には、アニメーションは冗長であり、視点変更が可能な立体図表現が適している。

初期画面で完成図を表示しておき、アニメーションの再生を行わなければ、アニメは立体図としての利用が可能である。平面図も VRML も WEB で配信可能であるため、こうした Web ベースの組み立て説明図が紙面に代わる実用的なツールとして利用できるものと考えられる。

参考文献

- [1] 中津檜男, 宮崎ゆい, 杉浦弘樹, データベースを用いた 3 次元部品のオンライン組み立てサポートシステムの開発, 愛知教育大学研究報告 56 輯, 7-12, 2007 年 3 月.
- [2] 中津檜男, 橋詰沙紀, 部品の組み立て過程を表現する 3 次元アニメーションの有効性, 日本教育工学会全国大会論文集, 233-234, 2007 年 9 月.
- [3] Sato, Jin, Jin Sato's Lego Mindstorms: The Master's Technique, No Starch Press, 2002.

[4] 宍戸, 相川, 西田, 森, 「シミュレーションと実験キットを連携した教材の評価」, メディア教育研究, 4 巻, 2 号, 71-79, 2008.

[5] 渡邊, 向後, 「タブレット端末における動画付き教材の提示方法が学習に及ぼす影響」, 日本教育工学会研究報告集, JSET12-1, 221-228, 2012.

[6] <http://www.parallelgraphics.com/>

[7] <http://www.tanakaprint.co.jp/web3D/index.html>

付録 空間認識力テストの問題例

【問 5】

下の図のような立方体の箱にリボンをかけました。展開図にリボンのかかり方をかきなさい。

