

修士論文

組み立て作業支援のための ARシステム設計ガイドラインの提案

田井中 溪志

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 加藤 博一 教授

インタラクティブメディア設計学 研究室（情報科学領域）

令和2年3月13日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

田井中 溪志

審査委員：

加藤 博一 教授	(主指導教員, 情報科学領域)
清川 清 教授	(副指導教員, 情報科学領域)
神原 誠之 准教授	(副指導教員, 情報科学領域)
藤本 雄一郎 助教	(副指導教員, 情報科学領域)

組み立て作業支援のための AR システム設計ガイドラインの提案*

田井中 溪志

内容梗概

組み立て作業支援に対して、拡張現実感（AR）技術が有効であることは数多くの論文で確認されており、また近年その AR 技術を手軽に扱えるヘッドマウントディスプレイの登場やシステム開発環境の充実などにより、AR を用いたシステムが、容易に設計・開発可能になった。ただし、効率的な作業支援システムを作成するには、どのような情報をどのように表現するのかといった情報デザインが重要となる。これには専門的な知識やシステム開発経験が必要となるが、現在、これを解決するためのガイドラインは存在しない。そこで、本稿では、これまでに発表された AR を用いた情報提示方法をもとに、作業の内容や使用する位置姿勢推定技術に応じた適切なシステムの情報デザインを補助するガイドラインを提案する。そして、本ガイドラインの効果について、本ガイドラインを使用することで、均一な情報デザインが可能かどうかを確認する実験と、その情報デザインから作成された AR システムは高品質であるということを確認する実験の 2 種類を実施した。その結果、利用者の知識や経験に関わらず、開発コストを抑えつつ、作業効率の良い高品質な AR システムが作成することが期待できる。

キーワード

拡張現実感, AR システム, 組み立て作業支援, ガイドライン, 情報デザイン

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和 2 年 3 月 13 日.

A Proposal of Augmented Reality System Design Guidelines for Assembly Work Support*

Keishi Tainaka

Abstract

Many papers prove that augmented reality (AR) technology is effective in supporting assembly work. In recent years, a head-mounted display that can easily handle the AR technology has been introduced, and the system development environment has been enhanced. This made it possible to easily design and develop AR systems. However, in order to create an efficient work support system, information design such as what kind of information and how to express it is important. This requires specialized knowledge and system creation experience, but currently there are no guidelines to solve this. In this paper, based on the information presentation method using AR that has been published so far, this paper proposes a guideline to assist information design of an efficient system according to the work content and the technology of position and orientation estimation. We did 2 experiments. One confirms that this guideline can create a uniform information design. The other one confirms that the AR system created from that information design is high quality. As a result, regardless of the knowledge and experience of the user, a high-quality AR system with low development costs and good work efficiency was able to be created.

Keywords:

Augmented Reality, AR System, Assembling task support, Guideline, Information design

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 13, 2020.

Contents

1. はじめに	1
2. 関連研究	4
2.1 既存の AR システム設計ガイドライン	4
2.2 情報提示方法に関する研究	4
2.3 AR システム作成の補助を行う研究	6
2.4 本研究の位置づけ	7
3. 提案ガイドライン	9
3.1 概要	9
3.2 対象とするタスク	9
3.3 対象とする利用者	10
3.4 タスクの分解	11
3.5 利用可能なトラッキング技術の検討	11
3.6 情報提示方法の選択	12
3.6.1 使用可能な情報提示方法	12
3.6.2 候補群からの選択基準	13
3.6.3 選択補助	14
3.7 システム開発のノウハウ	14
3.8 提案ガイドラインの効果確認	15
4. 実験 1（再現性検証実験）	18
4.1 被験者	18
4.2 実験タスク	18
4.3 実験条件	19
4.4 実験環境	19
4.5 実験の流れ	20
4.6 評価指標	21
4.7 二つのデザイン表の類似度計算方法	21
4.8 実験設計	22
4.9 結果	23
4.10 考察	26
4.10.1 サブタスク分解時のばらつき	26

4.10.2 情報提示方法選択時のばらつき	28
4.11 まとめ	29
5. 実験 2（品質検証実験）	36
5.1 被験者	36
5.2 実験タスク	36
5.3 実験に使用した AR システム	36
5.4 実験条件	36
5.5 実験環境	37
5.6 評価指標	37
5.7 NASA-TLX	37
5.8 実験設計	38
5.9 結果	38
5.10 考察	44
5.11 まとめ	45
6. おわりに	46
6.1 まとめ	46
6.2 今後の課題	46
謝辞	48
参考文献	49
付録	52
A. サブタスクの種類とトラッキングの自由度で変化する使用可能な情報提示 方法一覧	52
B. 実験前のアンケート	54
C. 作業手順書	56
D. デザイン表	58
E. 実験後のアンケート	59

List of Figures

1	緑色の土台の指定位置（右端から 10 マス，上から 7 マス離れた場所）に赤色ブロックを配置する場合（左側は，視野内右上に画像を固定表示，右側は，赤色ブロックの最終場所に赤色フレームと 3D アニメーションを重畳表示）	2
2	黄色ブロックの上に揃えて赤色ブロックを配置する場合（左側は，視野内右上に画像を固定表示，右側は，赤色ブロックの最終場所に赤色フレームと 3D アニメーションを重畳表示）	2
3	Microsoft の AR ガイドライン（[1] より抜粋）	4
4	ネジを設置する際の情報提示方法 (a) の緑の矢印で，目標場所までの頭の回転を促す．(b) の半透明の 3D 矢印で視点移動を促す．(c)(d) 目標場所に到達すると，矢印は消えてき，次の作業，正確な位置を示す 3D モデルが現れる．	5
5	視点誘導を行う情報提示方法	6
6	半透明動画を視野内に表示する情報提示方法	7
7	作業者の見る角度に応じて動画を回転させる情報提示方法	8
8	提案ガイドラインを利用した情報デザインの流れ	10
9	ユーザートラッキングとオブジェクトトラッキングの関係	13
10	情報提示方法選択ツールで提示される情報提示例	15
11	再現性検証実験における実験環境	20
12	立木の交差部に，ロープを 2 回巻きつける工程（上）とロープの端を既に巻き付けられたロープの下を通すようにもっていく工程（下）	31
13	PC 組み立て作業における工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつき（レーベシユタイン距離）	33
14	ロープワークにおける工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつき（レーベシユタイン距離）	33
15	AR システム作成未経験者群で PC 組み立て作業における工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係	34
16	AR システム作成未経験者群でロープワークにおける工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係	34
17	AR システム作成経験者群で PC 組み立て作業における工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係	35

18	AR システム作成経験者群でロープワークにおける工程ごとの難し いと感じた被験者の割合とばらつきの関係	35
19	PC の組み立て作業における各システムを使用したグループの平均 作業時間	40
20	ロープワークにおける各システムを使用したグループの平均作業 時間	40
21	PC の組み立て作業における各システムを使用したグループの平均 エラー回数	41
22	ロープワークにおける各システムを使用したグループの平均エラー 回数	41
23	PC の組み立て作業における各システムを使用したグループの SUS の平均スコア	42
24	ロープワークにおける各システムを使用したグループの SUS の平 均スコア	42
25	PC の組み立て作業における各システムを使用したグループの NASA- TLX のスコア	43
26	ロープワークにおける各システムを使用したグループの NASA- TLX のスコア	43
C.15	電原ユニットの組み付け作業の作業手順書	56
C.15	筋交い縛りの作業手順書	57
C.15	ブロックの組み立て作業の作業手順書	58
D.15	提案ガイドラインを使用したグループが利用するデザイン表	59
D.15	既存ガイドラインを使用したグループが利用するデザイン表	59

List of Tables

1	サブタスクの種類とその内容一覧	17
2	オブジェクトの選択における情報提示方法選択補助のためのチェッ ク項目	17
3	情報提示方法におけるレーベシユタイン距離	25
4	平均デザイン表作成時間	25
5	デザイン表内に 3D モデルの種類の平均	25
6	サブタスクにおけるレーベシユタイン距離	26

7	グループ化したサブタスクにおけるレーベシュタイン距離	27
8	グループ化した情報提示方法におけるレーベシュタイン距離	32
9	未経験者の情報提示方法におけるレーベシュタイン距離	32
10	経験者の情報提示方法におけるレーベシュタイン距離	32
11	経験者と実験タスクごとの順位和検定の P 値	32
12	情報提示方法のばらつきと難しいと感じる工程	32
A.26	サブタスク：オブジェクトの選択におけるトラッキングの自由度と 使用可能な情報提示方法一覧	53
B.26	AR システムの経験に関する質問	54
B.26	AR の知識を確認するための質問	55
E.31	実験後のアンケート内容	60

1. はじめに

我が国において、製造業は GDP の約 2 割を占め、他産業の生産への波及効果は最も高く、まさに基幹産業と言える [2]。しかし、その労働者の一人当たりの生産性は近年横ばいが続き、伸び悩んでおり、製造業の労働生産性における国際的な順位は下降している [3]。製造業において、重要な作業の一つは製品の組み立て作業があり、この作業効率の向上が製造業さらには日本産業における労働生産性の向上に寄与すると考えられる。その組み立て作業に対して、ヘッドマウントディスプレイ（以降、HMD）を利用し、現実空間にデジタル情報を重畳表示する拡張現実感（以降、AR）技術を適用することで、その作業効率（早さ・正確性・理解のしやすさなど）が向上されることが知られている [4, 5]。そして、企業や工場において、従来、紙やディスプレイを用いていた作業支援手順書に対し、AR 作業支援システムの導入が期待されている。今後、導入する場合には、従来手順書を作成している人々が、システムの設計・実装を行うということが株式会社富士通研究所との共同研究の結果から確認した。

そして、近年、HoloLens や MagicLeap などの AR 技術を手軽に実現可能で高性能な HMD が登場し、さらに Unity や Vuforia などの AR アプリケーション作成を容易にするツールと組み合わせることで、手軽に AR システムを作成出来るようになった。しかし、実際に作成するとなった場合に、作業効率を向上させる情報デザインが正しくなされなければ、AR システムの有利性には期待できない。この情報デザインとは、作業効率向上が可能になるなどの高品質な AR システム作成のために、AR 技術を用いてディスプレイ上に表示する情報には何を使用して、何処に、どのように表示するのかといった情報の提示方法を設計することである。

しかし、作業空間上に情報を表示可能な場所は、使用する HMD や画像処理技術による位置姿勢推定技術によって異なる。また、情報デザインを行う際、3D モデルや動画、画像といった使用する情報の表示形式や、視野内固定表示や実物体への重畳表示などの表示可能場所は作業の内容や支援する対象、利用者がシステムに求めるものによって異なることを我々は知見として得ている。例えば、図 1 に示す様に、緑色の土台上に右端から 10 マス、上から 7 マス離れた場所に赤色ブロックを横向きに配置する場合を考える。画像をディスプレイ上の視野内右上に固定表示するだけであれば、作業者はマスの数を数えて配置しなければならないのに対して、直接、ブロックの最終設置場所に赤いフレームや 3D アニメーションを重畳表示することで、作業者の理解がしやすくなる。それに対して、図 2 に

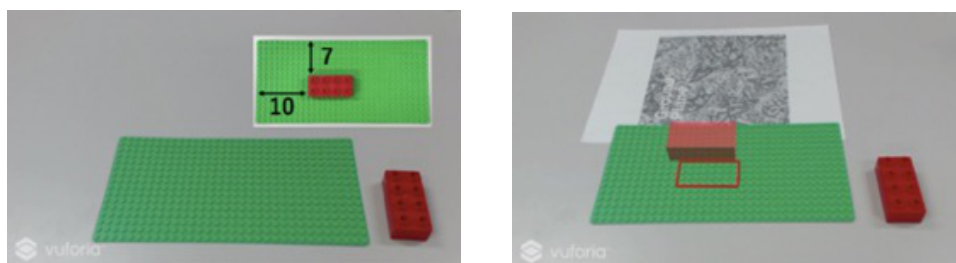


Figure 1 緑色の土台の指定位置（右端から 10 マス，上から 7 マス離れた場所）に赤色ブロックを配置する場合（左側は，視野内右上に画像を固定表示，右側は，赤色ブロックの最終場所に赤色フレームと 3D アニメーションを重畳表示）

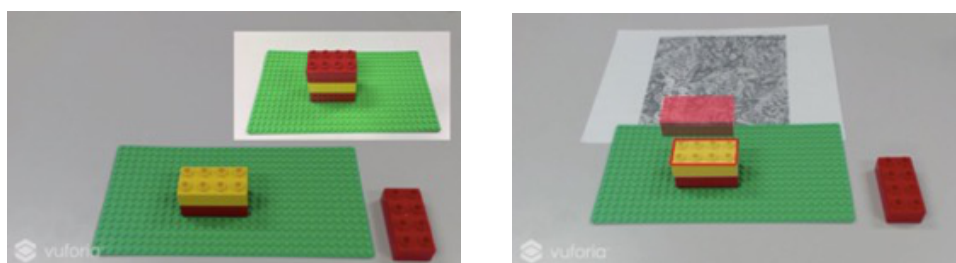


Figure 2 黄色ブロックの上に揃えて赤色ブロックを配置する場合（左側は，視野内右上に画像を固定表示，右側は，赤色ブロックの最終場所に赤色フレームと 3D アニメーションを重畳表示）

示す様に，作業空間中にただ一つある黄色ブロックの上に，赤色ブロックを揃えて配置する場合を考える．この場合，最終設置場所に 3D モデルやアニメーションを重畳表示に比べ，画像を視野内に固定表示であっても，同じくらい作業者は理解がしやすいもの，もしくはそれ以上に直感的に理解がしやすいものとなっている．

このように，情報デザインを行うためには，少なくとも位置姿勢推定技術や作業支援内容を考慮しなければならず，これには AR に関する専門的な知識とシステム開発の経験が重要となる．そして，この知識や経験というものは習得することが難しいといった問題がある．

そこで，本研究では，企業や工場における従来作業手順書を作成する人々が AR システムを作成する場面において，情報デザインに関連する問題が発生する．この問題に対し，AR に関する知識や経験の不足を補うガイドラインを構築し，それを作業支援手順書作成者に提供することで解決できるのではないかと我々は考

えている。

一方、AR システム作成については、3D モデルの操作方法・それにとまなう振る舞いなどを補助するガイドラインは存在するが、作業支援のための情報デザインを補助するガイドラインは存在しない。

そこで、本稿では、これまでに発表された AR を用いた情報提示方法をもとに、使用する位置姿勢推定技術や作業支援内容に応じて適切なシステムの情報デザインを補助するガイドラインを提案する。本ガイドラインでは、HMD を用いた組み立て作業支援を対象とする。その作業（以降、タスク）を一定の粒度の小さな作業（以降、サブタスク）に分解し、それぞれの利用可能な技術を考慮し、適切な情報提示方法を提示することで、利用者に対し容易な情報デザインを可能にする。

そして、本稿では、本ガイドラインを使用することで、AR の知識や経験に関わらず、高品質な AR システムを作成可能になることを検証するために、実験を 2 つに分けて行なった。1 つは、「本ガイドラインを使用することで、利用者の AR に関する知識や経験に関わらず、均一なデザイン表の作成が可能か」を確認する再現性検証実験である。もう一つは、「本ガイドラインを使用して情報デザインを行なった結果をもとに、作業効率の良い AR システムは作成可能か」を確認するため品質検証の実験を行った。その結果、本ガイドラインを使用することで、AR システムの経験が無い者よりも経験がある者ほど、均一なデザインが可能であり、恩恵を受けやすいという結果となった。ただし、さらに分析を行うことで、その結果は、本ガイドラインが利用者の幅広いニーズに対応できる潜在能力を示す結果になった。さらに、本ガイドラインを使用することで、情報デザインを行うシステム設計者と、その後のシステム実装を行う者の負担を軽減することを確認した。

以降、2 節では、本研究に関連する研究について述べ、3 章では、提案するガイドラインについて述べ、4、5 章では、提案ガイドラインを検証する実験とその結果について述べ、考察する。6 章で、まとめる。また、付録 A-E には、実験で使ったアンケート内容や作業手順書を添付する。

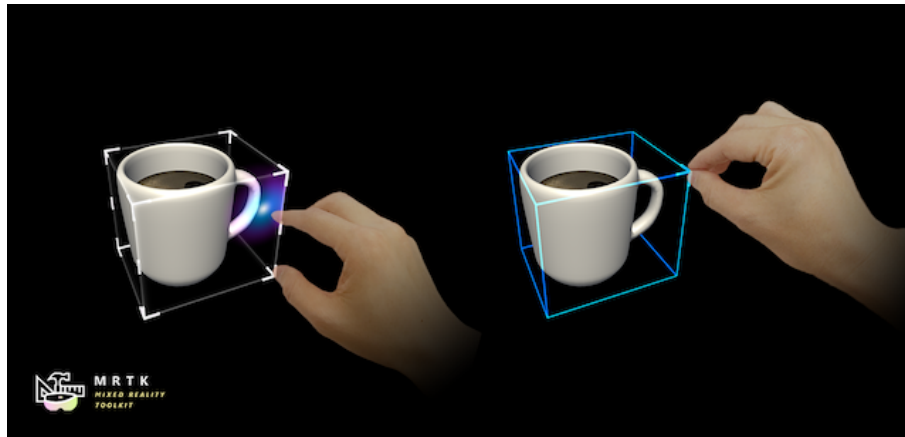


Figure 3 Microsoft の AR ガイドライン ([1] より抜粋)

2. 関連研究

以下，AR システムを設計補助を行うためのガイドラインと研究について述べる．

2.1 既存の AR システム設計ガイドライン

近年，スマートフォンや HMD で AR 技術を用いたシステムが容易に作成可能となった．スマートフォンでは，様々な AR システムを設計するためのガイドラインが出てきている．代表的なものとして，Apple や Google が公開している AR システム設計ガイドラインがある [6, 7]．また，Microsoft の HoloLens という HMD に対しても AR の設計ガイドラインがある [1]．これらのガイドラインは，図 3 に示す様に，3D モデルを操作するための方法や操作した時の反応についての設計方法は記述されているが，画像や動画，3D モデル等の支援情報を何処にどの様に表示するのかといった情報提示方法については記述がほとんどない．よって，既存のガイドラインだけで，適切な情報提示方法を用いて，効率的な作業支援システムを設計することは困難となる．

2.2 情報提示方法に関する研究

作業支援のための効率的な AR システムを作成するにあたり，さまざまな情報提示方法が開発された [8, 9, 10]．Henderson らの研究 [8, 9] では，装甲車内といった狭い空間での，HMD を使用したメンテナンス作業に対し，3D モデルを作業空間



Figure 4 ネジを設置する際の情報提示方法 (a) の緑の矢印で、目標場所までの頭の回転を促す．(b) の半透明の 3D 矢印で視点移動を促す．(c)(d) 目標場所に到達すると、矢印は消えてき、次の作業、正確な位置を示す 3D モデルが現れる．

に重畳表示する AR システムや、視野内や作業空間にテキストや画像を表示するシステム、ディスプレイ上に表示される作業手順書を使用した場合の作業効率を比較した．その結果、図 4 に示す様な、作業空間上に 3D モデルを重畳表示、または 3D の矢印を表示し視点移動の補助を行うことで、設置作業において、作業効率を向上させた．また、作業全体でも、3D モデルを作業空間上に重畳表示する方法は作業者の理解のしやすさを向上させた．さらに、組み立て作業に対しても、同様に、AR システムとディスプレイ表示の比較調査を行った．その結果、作業効率や満足感、理解のしやすさの面で、AR システムの有効性を証明した．

また、Sukan らの研究 [10] では、HMD を装着してタスクを行う場合、操作したい物体が視野外に存在する、もしくは障害物によって隠れている状況で、効率的な視点誘導を行なった．対象となる物体に対して何処から見るのか、また何処に目を向けるのかに観点を置き、図 5 の様な 3D アニメーションを用いて、視線誘導を行った．結果として、視野内表示の情報提示方法よりも作業効率が向上した．

Goto らの研究 [11] では、作業の説明動画を動作ごとに自動で動画を切り分け、その動画に対し様々な加工をを加え、HMD の視野内に提示することで、作業効率を向上させた．その結果、ブロックの組み立て作業に対して、動画を作業空間の隣に表示することで、作業理解を向上した．また、図 6 折り紙を折る作業に対しては、動画を半透明にし、作業者の視野内に重畳表示する情報提示方法が、作業理解を向上させた．

Pathirathna らの研究 [12] では、図 7 HMD を使用してタスクを行う際、視野内に表示する動画は、作業環境に対する利用者の HMD の角度合わせて、回転させることで、実物との比較を容易にし、作業効率を向上させた．

しかし、これらの情報提示方法は、利用できる環境が限定されており、多様な

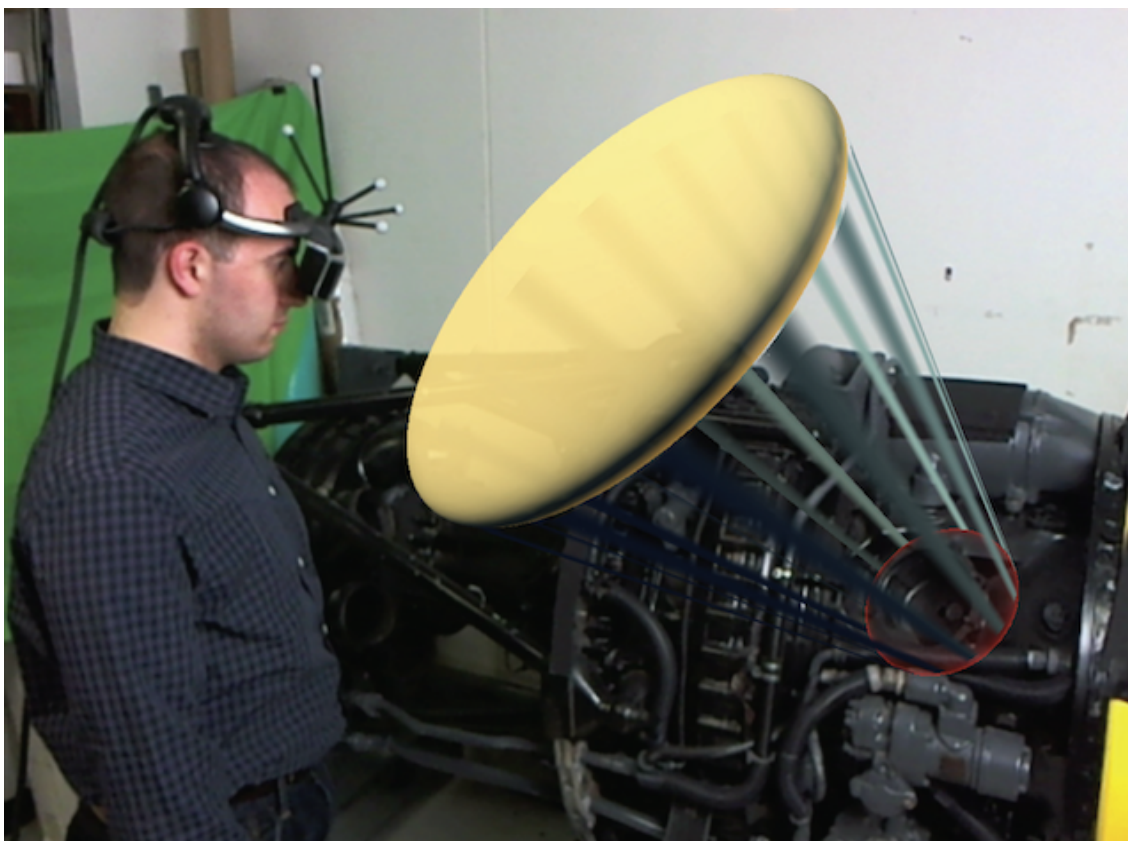


Figure 5 視点誘導を行う情報提示方法

状況のタスクや環境には対応できない．また，作業に対する効果もタスクによって様々である．Radkowski らの研究 [13] では，効率的な AR システムを作成する場合，情報提示方法は，タスクの難しさと提示する情報の難しさを考慮しなければ効率の良い AR システムは作成できないことが判明した．高品質な AR システムを作成するためには，これらの情報提示方法を状況に応じて使い分ける必要がある．

2.3 AR システム作成の補助を行う研究

他にも AR 作業支援システムを作成するためには，使用するデバイスや，システム作成者に求められる開発能力，利用する開発プラットフォーム，動画や画像，音声，テキストなどを使用した支援技術などの様々な要素を検討する必要がある．

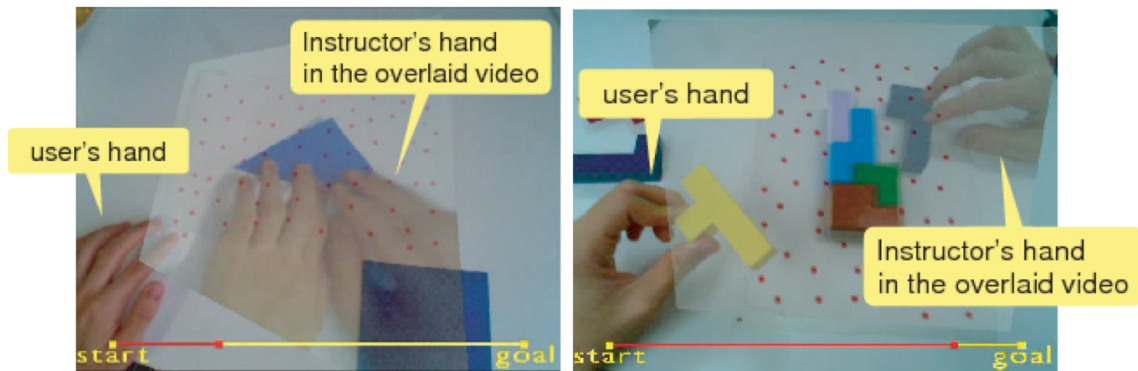


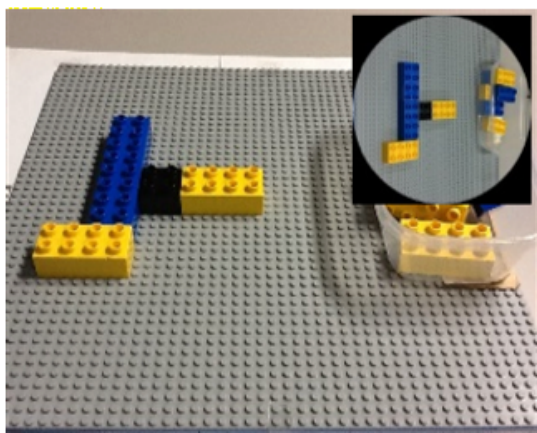
Figure 6 半透明動画を視野内に表示する情報提示方法

そこで, Palmarini ら [14] は, AR システム作成者に, タスクの内容に関する各 10 個の質問が記載された 4 つの質問票, 計 40 個の質問を行うことで, そのシステムに対し, 「AR 技術がどのくらい求められているのか」, 「どのハードウェアが適しているのか」, 「どの開発プラットフォームが適しているのか」, 「どういった支援技術が適しているのか」の 4 つの要素において適切な技術を推薦する手法を提案した. しかし, これは, タスク全体に対しては粗い推薦しかなされておらず, タスクの中のさらに細かい工程ごとの内容や環境に応じたシステム作成はできない.

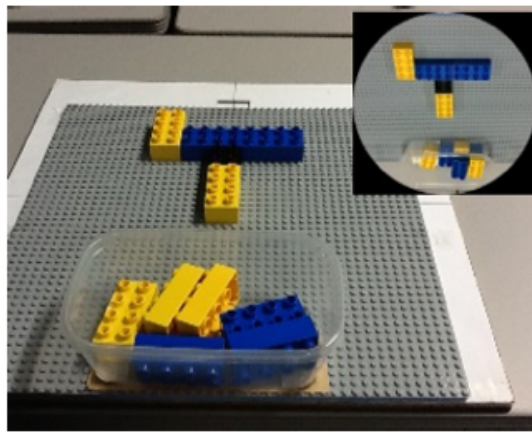
2.4 本研究の位置づけ

組み立て作業のための効率的な AR システムを作成するためには, 情報デザインが重要となる. しかし, この情報デザインを行う際に使用する情報提示方法は, さまざま提案されているが, どれも特定のタスクや環境下でのみ使用可能なものであるため, ここから自身に適した情報提示方法を見つけ出し, 利用することは難しい. 現状として, これらの情報提示方法を使用してシステム作成者の需要に合わせた AR システムの作成を補助する研究としては, 大まかな技術推薦が可能な程度でしかなされていない.

そこで, 我々は, タスクの内容や環境, 開発者の需要を考慮して, 情報提示方法の選択を補助することで, 情報デザインに関する問題を解決することを目指す.



(a)



(b)

Figure 7 作業者の見る角度に応じて動画を回転させる情報提示方法

3. 提案ガイドライン

タスクの内容や利用可能な位置姿勢推定技術に応じて、情報提示方法を示し、サブタスクというより細かい粒度で作業支援システムのデザイン表を作成できるガイドラインを提案する。このデザイン表とは、サブタスクごとに対応する情報提示方法が記入された表を指す。そして、このガイドラインの仕組みを利用できるように、「Dr. AR」と名付けた Web ページを作成した。この Web ページを利用すると、容易にデザイン表を作成することができ、システム開発のノウハウも獲得できる。以下、まず、ガイドラインの概要、対象とするタスクや利用者について、その後、システム設計に必要な3つのステップ、タスクの分解と利用可能なトラッキング技術の検討、情報提示方法の選択のそれぞれについて、最後にシステム開発について述べる。

3.1 概要

実環境において、人の扱うタスクは多種多様である。そのため、AR システム設計において、対象タスク全体に対して適切な情報提示方法を議論するのは困難である。一方、これを一定の粒度をもつ小さなサブタスクに分解することで、その種類をある程度体系化でき、適切な情報提示方法を検討しやすいと考えた。さらに、利用可能な、HMD の位置姿勢追跡 (以降、ユーザトラッキング) 情報、またはタスクで使用する部品や道具の位置姿勢追跡 (以降、オブジェクトトラッキング) 情報により、利用可能な情報提示方法はおのずと制約を受ける。そこで、提案ガイドラインでは、図8に示す通り、作業支援 AR システムの情報デザインを3つのステップで構成する。まず、支援対象となるタスクを本ガイドラインで設定しているサブタスクの種類に基づき、一定粒度の小さなサブタスクへと分解する。そして、分解した各サブタスクに対して、利用可能なトラッキング技術の検討を行う。最終的に、各サブタスクに対して、サブタスクの種類と検討したトラッキング技術に基づき情報提示方法を選択し、全体のシステム設計となるデザイン表の作成を行う。

3.2 対象とするタスク

本ガイドラインは、基本的には、1人で行い、広い範囲を歩き回らず、遠隔操作を使用しない組み立て作業を対象としている。具体的には、機械部品の組み付け

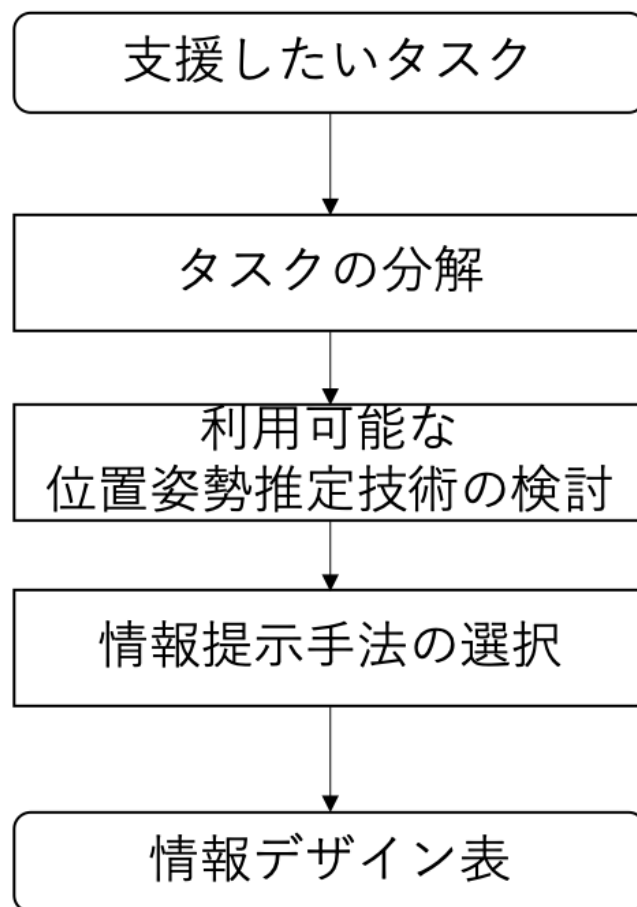


Figure 8 提案ガイドラインを利用した情報デザインの流れ

作業やサーバの筐体への配線作業，家具の組み立て作業，商品の梱包作業などを想定している．

3.3 対象とする利用者

本ガイドラインの利用者として，タスクの内容を十分に把握し，AR 技術を使用するための基本知識を持った者を対象とする．ただし，その後のタスク分析，タスク内容や使用するデバイスや画像処理技術を考慮した情報提示方法の利用に関する知識はガイドライン側が提供するため，利用者には求めないものとする．一方，設計以降の開発については利用者の能力に委ねている．そのため，さらに，

Unity等のメディアプラットフォーム、ならびに HoloLens 等の HMD を使用した開発技術を持つ者を対象とする。また、本ガイドラインでは AR システム開発のノウハウを提供しているため、この知見を獲得したい者も対象となる。

3.4 タスクの分解

本ガイドラインで、全てのタスクを扱うために一定の複雑さの粒度を持つサブタスクに統一する。本ガイドラインを作成するにあたり、ブロックの組み立て、ロープワーク、折り紙、PC 筐体への部品組み付け作業を確認した。この結果、これらのタスクを表現するために考案した 6 種類のサブタスクを表 1 に示す。

まず、オブジェクトの選択とは、対象物を見つける、または、手に取る動作を指し、他の動作の前に設定されることが多い。次に、オブジェクトの設置とは、対象物を手順で指定された箇所に設置する動作を示し、その中でも、オブジェクトの設置（方法説明必要）とは、「部品 A を筐体 B に対し捻りながら設置する」など、設置に特別な動作や複雑で難しい動作が含まれ、前もって設置方法を説明する必要がある場合の設置動作を指す。また、オブジェクトの設置（方法説明不要）とは、「部品 A を部品 B の隣に設置する」など、設置が単純で、前もって設置方法を説明する必要がない場合の設置動作を指す。次に、オブジェクトの変形とは、対象物の形や状態を変更する動作を指す。例えば、「折り紙を折る」といった動作がある。次に、オブジェクトのサイズ調整とは、対象物の長さや重さなどの数値を計測する動作を指す。例えば、「木材の端から 50cm の場所に印を打つ」などがある。最後に、オブジェクトの観察とは、対象物に対する視点移動や対象物自体の移動により、観察位置・方向を変更する動作を指す。例えば、「PC 筐体の背面から側面に作業場所を変更する」などがある。

このサブタスクの種類を基にタスクの分解を行う。例えば、「机上の部品を指定場所に置く」という内容のタスクがあれば、まず「机上の部品を手にする」という「サブタスクの選択」と、「部品を指定場所に置く」という「オブジェクトの設置（設置説明方法が不要）」に分解することができる。

3.5 利用可能なトラッキング技術の検討

次に、タスク全体における利用可能なトラッキング技術について検討を行う。本稿では、HMD や対象物の位置と姿勢情報は、図 9 のようにシステム空間内に設定されている世界座標系との関係で定義された、ユーザートラッキングと、世界

座標系基準型オブジェクトトラッキングと HMD 基準型オブジェクトトラッキングといった 2 種類のオブジェクトトラッキングを用いる。その上で、まずタスク全体、サブタスク全てで共通して使用する HMD におけるユーザートラッキングの利用可能な技術とその自由度について検討する。さらに、分解した各サブタスクで、対象物におけるオブジェクトトラッキングの利用可能な技術とその自由度について検討する。トラッキング技術には、RGB-D カメラやマーカ、光学式モーションキャプチャなどを用いて位置姿勢情報を取得可能なものに加え、埋め込み式のジャイロセンサーなどを用いた姿勢情報のみを取得可能なものなどがある。例えば、HMD に HoloLens を使用する場合であれば、RGB-D カメラやジャイロ、加速度、方位センサーを使用し、システムに対して HMD の 3 次元位置・3 次元姿勢の自由度を持つユーザートラッキングが利用可能となる。また、HMD のカメラと小球マーカが貼り付けられた部品を使用する場合であれば、RGB カメラを使用し、HMD に対してその部品の 3 次元位置情報のみの自由度を持つ HMD 基準型オブジェクトトラッキングが利用可能となる。部品にジャイロ、方位センサーが内蔵されている場合であれば、システムに対してその部品の 3 次元姿勢情報のみの自由度を持つ世界座標系基準型オブジェクトトラッキングが利用可能となる。

3.6 情報提示方法の選択

本ガイドラインで提示する情報提示方法は、これまで発表された研究 [8, 9, 10, 12] などをもとに作成されている。そして、分解した各サブタスクの種類と検討したトラッキング技術とその自由度から、それぞれのサブタスクに対して情報提示方法の候補を提示する。そこから、利用者は自身が求めるシステムに適切な情報提示方法の選択を行う必要がある。そこで、本ガイドラインでは、利用者に対して推薦を行なっている。ただし、この推薦は弱いものとなっており、様々な利用者の要件に沿う様に作成されている。

3.6.1 使用可能な情報提示方法

情報提示方法は、サブタスクの種類と利用可能なトラッキング技術の自由度をもとに、使用可能なものが変化する。例えば、オブジェクトの選択においては、図 A.26 に示す様に、HMD に Microsoft の HoloLens を使用し、対象物に AR マーカを取り付ける場合、ユーザートラッキングとオブジェクトトラッキングは両方と

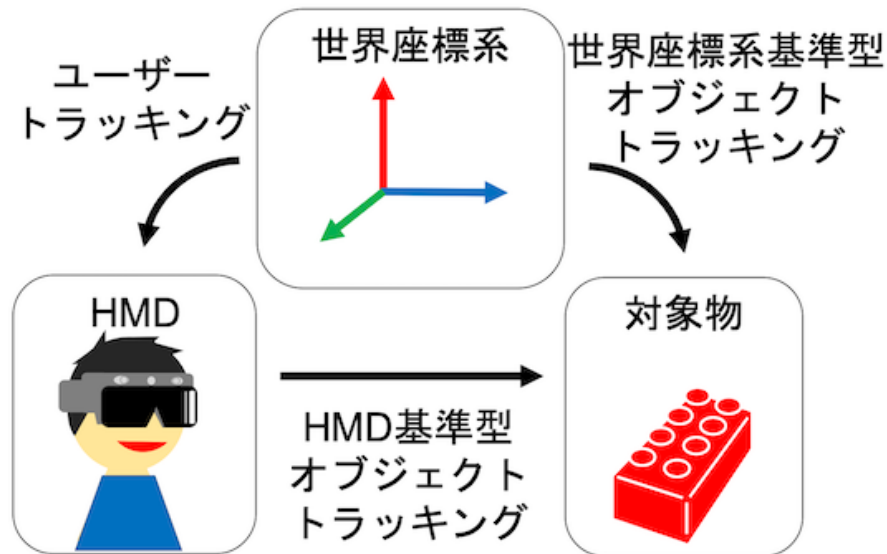


Figure 9 ユーザートラッキングとオブジェクトトラッキングの関係

も位置姿勢情報が取得可能となる。その場合，使用可能な情報提示方法は，1～5 全てである。それに対して，AR マーカを使用しない，すなわち，オブジェクトトラッキングができない場合には，使用可能な情報提示方法は，1～4 となる。さらに，HMD に Google Glass v1 を使用する，すなわち，ユーザートラッキングが姿勢のみ推定可能な場合には，使用可能な情報提示方法は，1 と 3 となる。本ガイドラインでは，サブタスクの種類とトラッキング技術の自由度をもとに，使用可能な情報提示方法を適切な方法の候補として，利用者に提示する。

3.6.2 候補群からの選択基準

利用者は，提示された情報提示方法の候補の中から，自身の需要に適したものを選択する。そこで，本ガイドラインでは，選択基準として，サブタスクを実行した場合の作業者の理解のしやすさと，システムを開発する場合の物体の 3D モデルの準備にかかる時間や費用などの実装コストを考えている。しかし，多くの情報提示方法において，作業者の理解のための補助の度合い（以降，補助レベル）の大きさと実装のしやすさはトレードオフの関係にある。具体的に，実装がしやすく作業者の理解のための補助レベルが小さい情報提示方法には，視野内に支援

情報を含む画像や動画を表示させる方法がある。ただし、扱える情報が2次元のものに限られるため、3次元の実物との比較動作が必要になることがある。反対に、実装しにくくの補助レベルが大きい情報提示方法には、対象物に3Dモデルや3DCGアニメーションなどを重畳表示する方法がある。ただし、対象物に直接重畳表示可能なため、直感的に理解がしやすくなる。

実装しやすく補助レベルが小さい情報提示方法であっても、作業者にとって十分に理解しやすく、利用に適した場面が多いということが、本ガイドラインを作成するにあたり経験的に判明した。

3.6.3 選択補助

そこで、適切な情報提示方法選択の補助として、実装の負担と理解の補助レベルを考慮し、図10に示す通り、実装しやすく補助レベルが小さい情報提示方法から順に候補を提示することとした。一方、例外的に支援が必要と考えるサブタスクに対しては、実装は難しくなるが補助レベルの大きい情報提示方法の選択を推薦する。推薦方法としては、サブタスクの内容に関して、簡単なチェック項目を用意した。利用者は、サブタスクの特性を理解した上で判断し、チェック項目を利用することで、ガイドラインが推薦する情報提示方法を確認することができる。具体的には、オブジェクトの選択における選択補助ツールのチェック項目を図2に示す。そして、現在提示されている情報提示方法が表A.26とする時に、選択補助ツールにて、「3Dモデルやアニメーションの準備が困難である。」と「対象物が現在の視野角外にある（身体、頭部、目線を動かして、対象物を探す必要がある）。」といった項目にチェックを入れた場合、推薦される情報提示方法は、2の場所を示すマップを視野内に固定表示する情報提示方法となる。これにより、利用者の需要に適した情報提示方法の選択を容易になった。

3.7 システム開発のノウハウ

我々は本ガイドラインを作成するにあたって様々なARシステムを開発した。そこで得た開発のノウハウをまとめている。以下にその一例を示す。画像や動画、3Dモデルなどで表現された支援情報を視野内に表示する場合は、表示ディスプレイに実物の原寸大表示が可能ものであれば原寸大表示にすると見やすくなるという事例がある。例えば、オブジェクトの選択というサブタスクにおいて、様々な部品の中から対象物を見つける場合、通常、実物と大きさが異なって見える支

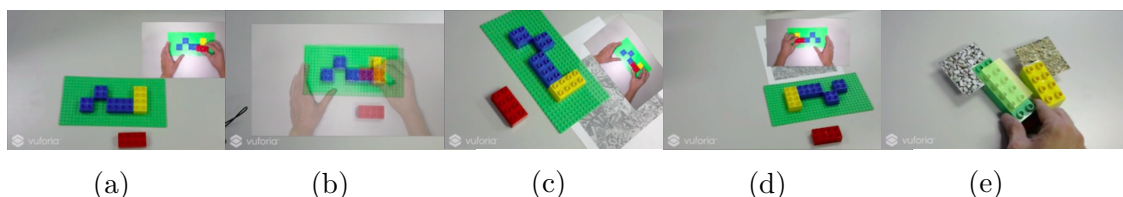


Figure 10 情報提示方法選択ツールで提示される情報提示例

サブタスクの種類：オブジェクトの設置（方法説明が不要），ユーザートラッキングの自由度：3次元位置＋3次元姿勢，対象物のオブジェクトトラッキングの自由度：3次元位置のみ，指定箇所のオブジェクトトラッキングの自由度：3次元位置＋3次元姿勢の場合に提示された情報提示方法候補である．左から順に実装がしやすい順で並ぶ．それぞれ (a) は設置場所を示す画像または動画を視野内固定位置に表示，(b) は設置場所を示す半透明画像または動画を視野内に表示，(c) は設置場所を示す画像または動画を角度に応じて視野内に表示，(d) は設置場所を示す画像または動画を作業場所付近に表示，(e) は設置場所に設置後の状態を示す 3D モデルを重畳表示する情報提示方法を示す．

援情報を使用すると，作業者は，見た目だけを参考に対象物を見つけなければならないのに対し，支援情報が原寸大であれば，比較対象同士の大きさは等しくなり，見た目と大きさの両方の要素を利用して見つけることができ，作業者の理解や作業を容易にすることができる．また，組み立て作業は両手を使用する場面が多い，そのため，今のサブタスクから次のサブタスクへの遷移は，ジェスチャー入力だけでなく，音声入力を用いると良いという事例がある．その際，使用できる音声コマンド等は，HMD のディスプレイ上に常時表示しておくが良い．そして，デザイン表の作成後，こういったノウハウを参考に開発するとさらに良いシステムを完成させることができる．

3.8 提案ガイドラインの効果確認

そして，提案ガイドラインは，公開後にさまざまな人に使用してもらい，フィードバックを受けて，改良し高品質なものにしていく．しかし，その効果についても確認しておく必要がある．そのため，我々は「提案ガイドラインを使用すると利用者の知識や経験に関わらず，高品質な AR システムが作成可能か」を確認するために，2つの実験を行った．1つ目に，「提案ガイドラインを使用することで，利用者の AR に関する知識や経験に関わらず，均一なデザイン表の作成が可能か」を確認する再現性検証実験を行った．2つ目に，「提案ガイドラインを使用して作成したデザイン表から，作業効率の良い AR システムは作成可能か」を確認する

ため品質検証の実験を行った.

種類名	内容
オブジェクトの選択	対象物を見つける，または手に取る動作
オブジェクトの設置（方法説明必要）	対象物を指定の箇所へ比較的複雑な手順を用いて設置する動作
オブジェクトの設置（方法説明不要）	対象物を指定の箇所へ単純に設置する動作
オブジェクトの変形	対象物の形や状態を変更する動作
オブジェクトのサイズ調整	対象物の長さや重さなどを測り取る動作
オブジェクトの観察	対象物に対する視点移動や対象物自体の移動により，観察位置・方向を変更する動作

Table 1 サブタスクの種類とその内容一覧

番号	チェック項目
1	3D モデルやアニメーションの準備が困難である．
2	対象物が何かの陰に隠れている等，直接の発見，視認に障害がある．
3	囲に複数の似た物体があり，対象物をより分ける必要がある．
4	対象物が現在の視野角外にある（身体，頭部，目線を動かして，対象物を探す必要がある）．
5	対象物の持ち方に指定がある（対象物の向き，手を添える位置等）．

Table 2 オブジェクトの選択における情報提示方法選択補助のためのチェック項目

4. 実験1（再現性検証実験）

被験者を2群にわけ、それぞれ提案ガイドライン、既存ガイドラインを参照させながら、ある組み立てタスクの情報デザイン表を作成させる実験を行った。それぞれの群で作成された表を比較することで、同群内での、その再現性を確認した。以降は、被験者、使用した実験タスク、実験の流れ、実験を評価する指標、レーベシユタイン距離、実験設計、結果、考察について述べる。

4.1 被験者

実験において、被験者は奈良先端科学技術大学院大学内で募集を行なった。募集の条件として、日本語で書かれた手順書や Web ページを読むため、日本語が堪能であること、そして、AR に関する知識、システムの開発経験の有無に関係なく募集した。

被験者は、23 歳から 27 歳までの男女を含む 18 名の大学院生であった。実験前に、表 B.26 に示すように、AR 技術を用いたアプリケーションまたはシステムの作成経験に関する質問を行なった。その結果、AR システムの作成経験が全く無い被験者が 10 名、1～3 個の作成がある被験者が 7 名、7～9 個の作成経験がある被験者が 1 名であった。同時に、表 B.26 に示すように、AR システムに関するテストも実施した。その結果、正解数が 7 問中 4 問以下の者が 3 名、5 問の者が 4 名、6 問の者が 9 名、全て正解した者が 3 名であった。このテストの正解数と、AR システムの作成経験を考慮し、18 名の被験者を均等になるようにランダムに 2 群に分けた。

また、テストの結果から、正解数が 4 問以下であった者は、実験前に、1 時間程度、AR について説明された本 [15] を用いて、AR の定義と光学透過型の HMD、トラッキング、較正、位置合わせ、状況適応型可視化の章について勉強を行なった。その後、再度同様のテストを実施し、知識の習得を確認した。

4.2 実験タスク

実験タスクとして、2 種類の作業を用意した。1 つは、図 C.15 に示すような、環境に固定された PC 筐体に対し、電源ユニットを組み付け、ケーブルをマザーボードの指定コネクタへ配線し、カバーを閉じる操作を必要とする PC の組み立て作業。もう 1 つは、図 C.15 に示すような、環境に固定された立木に対し、ロープを

筋交い縛りで結びつける操作を行うロープワークを用意した。さらに、実験の前に、デザイン表の作成に慣れてもらうためのチュートリアルとして、図 C.15 に示すような、環境に固定された土台にブロックを設置する作業を用意した。

4.3 実験条件

2群に分けた被験者の片方のグループには、我々が提案するガイドラインを Web サイトとして一般公開しているものを参考にしながら、デザイン表を作成するグループである。それに対して、もう片方のグループには、Apple と Google が公開している AR を使用したスマートフォン向けの AR アプリケーションの設計に関する補助を行う Web サイト [6, 7] と Microsoft が公開している HoloLens を使用した設計補助を行う Web サイト [1] を参考にして、デザイン表の作成を行なった。その際、Apple と Google の Web サイトに関しては、日本語のサイトは無く、そのため、英語が苦手な学生には、Chrome の自動翻訳機能を用いて読んでもらった。そして、被験者は、2種類の実験タスクに対してデザイン表の作成を行うが、提案ガイドラインを使用するグループでは、実験中のすべての実験タスクにおいて、提案ガイドラインを参考にしてデザイン表を作成する。それに対して、既存ガイドラインのグループでは、すべての実験タスクに対して、既存ガイドラインを参考にして作成する。そのため、この実験は異なるグループの被験者がそれぞれの条件のもと実験を行う被験者間実験となっている。

そして、被験者全員に対し、実験をするにあたり、被験者が情報デザイン表を作成した場合に、その後のシステム実装にかかる費用や時間、労力等のコストは気にせず、完成したシステムを利用する作業者の作業効率の向上を一番考慮する様に伝えた。

4.4 実験環境

実験は、静かで周囲に人がいない部屋で行なった。図 11 に示す様に、椅子と机を用意し、机の上に使用する実験タスクと富士通のノート PC (LIFEBOOK WU2/C3) を用意した。実験タスクはその都度準備し、使用しない場合は同じ部屋の被験者から離れた場所で保管した。被験者はこの環境で、実験タスクを体験・確認し、その後、デザイン表の作成を行なった。この時、体験は立ったまま行い、その後、椅子に座りながら同ノート PC 上で、デザイン表の作成を行なった。



Figure 11 再現性検証実験における実験環境

4.5 実験の流れ

以下に実験の流れを示す。

1. 提案ガイドラインの Web サイト「Dr. AR」（または、既存ガイドラインの Web サイト）の使い方やデザイン表の作成方法を習熟 [50 分]
2. 実験タスク 1 を被験者が完全に理解するまで、動画等を見てもらいながら、実際に体験 [15 分]
3. 提案ガイドラインを使用したグループは、デザイン表の作成は主に Web ページ上で情報を入力し、Web ページの出力結果である csv ファイルに対して、追加で情報提示方法内で使用する画像や動画、3D モデル自体の詳細な表現方法について Excel シート上で入力した。既存ガイドラインを使用したグループは、デザイン表の作成は図 Excel シート上で、サブタスクの内容とそれに対する情報提示方法の内容を入力した。 [40 分]
4. デザイン表に関するアンケートや聞き取りの実施 [5 分]
5. 休憩 [10 分]

6. 実験タスク2に対して手順2~4を繰り返した

実験タスク1と2は被験者ごとによりランダムに入れ替えを行った。

4.6 評価指標

評価指標として3つある。まず、同群内での各被験者により作成されたデザイン表の類似度を評価するために、文字列類似度計算などに使用されるレーベシュタイン距離を採用した。また、ガイドライン自体のユーザビリティを評価するために、デザイン表の作成時間、実験後のアンケート、インタビュー内容を使用した。さらに、生成されたデザイン表からシステムを実装する際の費用を評価するために、間接的にそれを反映する使用された3Dモデルの種類や数、システムを実装するために費やした時間などを分析した。

4.7 二つのデザイン表の類似度計算方法

類似度計算には、レーベシュタイン距離を使用する。レーベシュタイン距離とは、2つの文字列がどの程度類似しているかを示す数値である[16]。数値が小さいほど、2つの文字列の類似度は大きいと言える。このレーベシュタイン距離は、ある文字列に対して、文字の置換・追加・削除の3つの編集操作を用いて別の文字列に変換する手順における操作の最小回数として与えられる。具体例として、「OCTOBER」と「COLOR」という文字列のレーベシュタイン距離を計算する場合、以下の手順で2つの文字列の編集操作を行う。

- 「OCTOBER」:左から1番目に「C」を挿入
- 「COCTOBER」:左から3番目の「C」を「L」に置換
- 「COLTOBER」:左から4番目の「T」を削除
- 「COLOBER」:左から5番目の「B」を削除
- 「COLOER」:左から5番目の「E」を削除

この時、この「OCTOBER」と「COLOR」の文字列同士の最小編集操作回数は5であるので、レーベシュタイン距離は5となる。しかし、全く異なる文字列「HAPPY」と「COLOR」の場合のレーベシュタイン距離も同じく5となり、

「OCTOBER・COLOR」と「HAPPY・COLOR」の場合では類似度が同じということになってしまう。この結果は見た目から受ける類似度とはかけ離れていることがわかる。そこで文字列の長さを考慮する必要が出てくる。このレーベシユタインを2つの文字列の最大長で割ることで標準化を行う。つまり、最大長である「OCTOBER」の文字数7で割ると、「OCTOBER・COLOR」では0.714, 「HAPPY」の文字数5で割ると「HAPPY・COLOR」では1.00となる。この標準化されたレーベシユタイン距離では、0に近いほど類似度が高く、1に近いほど全く異なる文字列同士ということを示す。以降本稿で扱うレーベシユタイン距離は全て、標準化したものを示す。

そして、一般的には、スペルチェック [17] や、DNA 配列同士の類似度判定 [18] に利用されている。それ故、デザイン表中のサブタスクの並び・情報提示方法の並びの類似度評価にも親和性が高いと考え使用した。

また、本研究では、被験者が作成したデザイン表中のサブタスクや情報提示方法にそれぞれIDを振った。このIDは提案ガイドラインに登録されているサブタスクや情報提示方法をもとに振り当てた。既存ガイドラインを使用した被験者の中で、提案ガイドラインには登場しないサブタスクや情報提示方法が出現した場合には、その都度新しいIDを振り当てた。そして、被験者のデザイン表に同士でサブタスクや情報提示方法のIDの並びをレーベシユタイン距離で計算し類似度評価を行った。

4.8 実験設計

この実験に対する仮説は以下の通りである。

- 仮説1 提案ガイドライン使用グループは既存ガイドライン使用グループに比べ、デザイン表内の情報提示方法の並びのばらつき（レーベシユタイン距離の平均）が小さくなる。
- 仮説2 提案ガイドライン使用グループは既存ガイドライン使用グループに比べ、デザイン表作成の作業時間が短くなる。
- 仮説3 提案ガイドライン使用グループは既存ガイドライン使用グループに比べ、デザイン表から実装されるARシステムのコストは小さくなる。

4.9 結果

提案ガイドライン使用グループ内の全デザイン表（9つ）から作成される情報提示方法の並び全ペアに対するレーベシュタイン距離の平均値と，既存ガイドライン使用グループでの同値を表3に示す．その結果，提案ガイドライン使用グループは，既存ガイドライン使用グループに比べ，ばらつきは変わらないという結果となり，仮説は立証されなかった．表4に，各グループと実験タスクごとにデザイン表作成時間の平均を示す．その結果，提案ガイドライン使用グループの方が，作成時間が短かったことがわかり，仮説2は立証された．このことから，提案ガイドラインを使用すると，時間が短縮され，システム設計者にとって，デザイン表作成の負担軽減につながると予想される．

表5に，デザイン表に沿ってARシステムを実装する場合に準備しなければならない3Dモデルの種類の平均を示す．この結果から，提案ガイドライン使用グループの作成したデザイン表は既存ガイドラインのものと比べて，3Dモデルの種類が少なくなり，システム開発者にとっては実装がしやすいものとなっていた．

実験後のアンケートとして，既存ガイドラインを使用した被験者から以下の様なコメントを受けた．

被験者 A （デザイン表作成時）情報提示方法はいくつかの選択肢から選びたかった

被験者 B （デザイン表作成時）言葉で情報提示方法を表現することが難しい

被験者 C （デザイン表作成時）絵で表現したい

被験者 D （デザイン表作成時）書いた情報提示方法が実際にその場で体験出来たら，分かりやすい

被験者 E （デザイン表作成時）書いた情報提示方法がHoloLensの機能を逸脱していないか確認したい

被験者 F （今後の情報デザインは）簡単な入力でその場で体験・作成できるようになって欲しい

被験者 A や B, C のように，情報デザイン表を作成する場合，情報提示方法を言葉で表現することが難しかったという意見が多く，その解決策として，利用可能な情報提示方法の選択肢が欲しいという意見をいくつか受けた．現在の状況に対

し利用可能な情報提示方法の選択肢を提供することは、我々が提案するガイドラインが行なっていることであり、一定の利用者の需要として確認できた。また、被験者 E の意見においても、提案ガイドラインは、始めに、利用可能なトラッキング技術を考慮した上で情報提示方法を提供していることから、この問題も解決可能であるといえる。さらに、Web サイト上で提供された情報提示方法は、隣に、使用した場合のサンプル動画を載せていることから、被験者 D, F にも対応可能であると考え

また、提案ガイドラインを使用した被験者からは以下の様なコメントを受けた。

被験者 G (Web サイト上でのデザイン表作成後) 編集できるようにして欲しい

被験者 H (PC 組み立ての工程内の)「整理する」に対して、サブタスクの種類の割り当てに悩んだ

被験者 I (Web サイト上でのデザイン表作成時) 似た様な動作を繰り返す記述しなければいけない場面があったので、コピーや前のデータを残すなどの機能が欲しい

被験者 J (Web サイト上でのデザイン表作成時) 情報入力の画面と、内容が追加されていくデザイン表を同時に見たい

この被験者の意見のとおり、提案ガイドラインの Web サイトでデザイン表を作成するツールの UI に少し問題があった。今後の更新で、意見を取り入れ改善していくつもりだ。

グループ	PC の組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.61	0.71
既存ガイドライン使用グループ	0.75	0.70

Table 3 情報提示方法におけるレーベシュタイン距離

グループ	PC の組み立て作業 (秒)	ロープワーク (秒)
提案ガイドライン使用グループ	1503	1917
既存ガイドライン使用グループ	1980	2278

Table 4 平均デザイン表作成時間

グループ	PC の組み立て作業 (個)	ロープワーク (個)
提案ガイドライン使用グループ	4.33	1.11
既存ガイドライン使用グループ	9.33	4.00

Table 5 デザイン表内に 3D モデルの種類の平均

4.10 考察

3章で述べた通り，情報デザイン表の作成においては，まず，サブタスクに分解を行い，その後，各サブタスクに対して，情報提示方法の選択を行う．そのため，結果の節で述べたばらつきの原因を分析するために，サブタスク分解時のばらつきと，各サブタスクに対する情報提示方法の選択のばらつきに分けて考える．

仮説1 タスクをサブタスクへ分解した時点での選択されたサブタスクのばらつきが大きいのではないか．

仮説2 サブタスクから情報提示方法を選択する際に，難しい工程によってばらつきが大きくなっているのではないか．

4.10.1 サブタスク分解時のばらつき

仮説1を確認するために，サブタスクのばらつきに注目した．提案ガイドライン使用グループ内の全デザイン表（9つ）から作成されるサブタスクの並び全ペアに対するレーベシユタイン距離の平均値と，既存ガイドライン使用グループでの同値を表6に示す．その結果，PC組み立て作業では，提案ガイドライン使用グループは既存ガイドライン使用グループに比べてばらつきが小さくなっていた．しかし，それとは逆にロープワークでは，大きくなっていた．

PC組み立て作業は，作業手順書の1工程内での使用する部品や道具などの対象物の変化や，PC筐体の側面，背面，対象物を見たりと視点の変化が激しい実験タスクのため，既存ガイドライン使用グループでは，サブタスクとなり得る選択肢が多くなり，被験者によってサブタスクのばらつきが発生した．それに対して，提案ガイドライン使用グループでは，提案ガイドラインが決められているサブタスクの種類から選択したために，ばらつきが小さくなった．次に，ロープワークでは，1工程内の対象物は，ほとんどロープであること，必要となる動作が「ロープを巻く，結ぶ」などの同様の動作が続くことから，サブタスクが比較的揃いやすい実験タスクとなっていた．

グループ	PCの組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.27	0.60
既存ガイドライン使用グループ	0.57	0.14

Table 6 サブタスクにおけるレーベシユタイン距離

さらに、既存ガイドライン使用グループでは、被験者のデザイン表作成後、実験者が事後的に、デザイン表の文章からサブタスクの分類を行なっている、この時、便宜的に、「ロープを巻く」という動作であっても、最初物理的に離れていたものが操作によって取り付けられるサブタスクは「オブジェクトの設置」に、物理的に離れていないものや同じ物体内で変化するサブタスクは「オブジェクトの変形」と分類した。それに対して、提案ガイドライン使用グループでは、1つのサブタスクに対して、提案ガイドラインが決められているサブタスクの種類から選択されたものが被験者によって異なることが多くあった。具体的には、図12に示すような、ロープを立木に巻き付けたり、ロープ同士の間隙や輪にロープの端を通すなどの工程である。これに対して、ロープを一つの対象物とみなして、「オブジェクトの変形」を選択する被験者もいれば、ロープの先を対象物、ロープの間隙や輪を指定箇所として別々のものとみなして「オブジェクトの設置」を選択する者もあり、意見が分かれるサブタスクが多く見られた。

そして、この対象物の捉え方の違いのみで、同じ内容であっても異なったサブタスクに対して、同じサブタスクとみなし、グループ化して再度サブタスクのばらつきを計算し、表7に示す。その結果、提案ガイドライン使用グループのロープワークにおけるサブタスクのばらつきが小さくなった。このことから、提案ガイドラインで定めたサブタスクの種類のカテゴリー分け方法は、直感的にわかりやすいものではなく、利用者の困惑を誘発し、それによって、利用者によるサブタスクのカテゴリー分けにばらつきが生じているという問題があることがわかった。今後は、決定木を使用した段階的な分類方法を用いるなど、サブタスクの種類を、再度、直感的な理解を考慮して分類を行う必要がある。

また、これらのグループ化したサブタスクから、次に選択される情報提示方法の中にも同じ内容、同質の方法がみられたことから、これらの情報提示方法についても、サブタスク同様グループ化を行い、情報提示方法のばらつきを再計算し、表8に示す。その結果、PCの組み立て作業とロープワークともに、提案ガイドライン使用グループが既存ガイドライン使用グループに比べ、ばらつきが相対的に小さくなった。ただし、絶対的な大きさは依然大きいため、さらにさまざまな

グループ	PCの組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.10	0.22
既存ガイドライン使用グループ	0.57	0.14

Table 7 グループ化したサブタスクにおけるレーベシュタイン距離

要素ごとに分析を行なった。その結果、AR システム作成経験が無いグループとあるグループで分けた場合に、情報提示方法のばらつきに大きく違いが現れた。その結果を表 9, 10 に示す。AR システムの作成経験が無い被験者群では、ばらつきが提案ガイドライン使用グループと既存ガイドライン使用グループとでは、変わらなかった。それに対して、経験者群では、提案ガイドライン使用グループが、既存ガイドラインのグループと比べてばらつきが顕著に小さくなった。さらに、ウィルコクソンの順位和検定 [19] を用いて、既存ガイドライン使用グループ内で、被験者ごとの他の被験者とのばらつきの平均と、提案ガイドライン使用グループ内での同値について順位和検定を行い、表 11 に示す。結果から、P の値は全体としては、PC の組み立て作業においては、5% より大きくなるが、5% に近い値が出た。またロープワークに対しては、5% をより小さくなったことから、十分では無いが多少の有意差を確認できた。そして、経験者群でみると、両方の実験タスクで有意差を確認できた。しかし、未経験者群では、有意差は確認できなかった。このことから、提案ガイドラインは AR システムの作成経験がある者ほど効果が得られやすいということが判明した。

4.10.2 情報提示方法選択時のばらつき

提案ガイドラインでは、サブタスクの作業難易度に応じて、情報提示方法の推薦を行なっている。しかし、その推薦の最終結果は、複数の情報提示方法を提示している。ここから、被験者は適切な方法を自分で考えて選択する必要がある、ここで被験者の主観や思考が影響し、難しいサブタスクでばらつきが生じているのではないかと考えた。そこで、作業手順書の工程ごとに被験者が難しいと感じた割合と、情報提示方法のばらつきについてまとめて、図 13, 14 に示す。そして、2 種類の実験タスクそれぞれで、工程ごとの情報提示方法のばらつきと被験者が難しいと感じた工程の相関係数を計算した結果を表 12 に示す。その結果、難しいと感じた工程と、情報提示方法とのばらつきが正の相関が見られた。このことから、原因 2 の通り、ばらつきが難しいと感じる工程で生じていることが判明した。

提案ガイドライン使用グループにおいて、難しくないと感じた工程においては、視野内に画像や動画を固定表示する情報提示方法が選ばれることが多かったのに対し、難しいと感じた工程では、選択が分かれた。その理由として、難しい工程であっても、「3D モデルやアニメーションを使用した方が分かりやすい」と考えた被験者や「動画の方が分かりやすい」と考えた者がおり、意見が分かれた。さらに、動画を視野内に固定表示する場合であっても、動画を半透明にして視野内

に表示させることで、見本動画と実物体との差を考慮しながら作業が可能になる情報提示方法を選ぶのか、実物体とHMDとの角度に合わせて、動画を回転させることで、動画と実物体との比較を容易にする方法を選ぶのかなど、ここでも選択が分かれるという結果となった。

また、この難しいと感じた工程とばらつきの関係について、被験者をARシステムの経験の有無で分け、図15, 16, 17, 18に示す。その結果から、ほとんどの場合で、難しいと感じられる工程でのばらつきが大きくなっているが、経験者群の一部分難しくないと感じる工程においてもばらつきが大きくなっていた。その理由として、経験者の中には、難しく無い工程であっても、「作業による間違いをより回避できる者」や「より理解しやすいもの」などを考慮し、独自の工夫を加えた結果、選択に違いが現れた。

つまり、利用者は、難しいと感じた作業に対して、情報提示方法に工夫を加える傾向にあり、その工夫が被験者ごとのばらつきを発生させていることがわかった。さらに、そうでない場合であっても、情報提示方法の選択の際、補助のために提示方法の推薦を行っているが、その推薦の強制力が小さいために、利用者ごとの思考の違いが、いくつかの情報提示方法候補の中から選択する提示方法が被験者ごとでばらつく大きな理由となっていることがわかった。今後は、このばらつきを抑制するために、サブタスクの種類や作業環境、情報提示方法の種類、その支援内容などの関係を明らかにし、より精度の高い情報提示方法の推薦が必要となる。

4.11 まとめ

提案ガイドラインを使用すると、デザイン表のばらつきが小さくはならなかったが、結果的に選択された情報提示方法の内容で見た場合には、既存ガイドラインと比較して、ばらつきが、相対的に小さくなることが確認された。しかし、ばらつきの大きさは絶対的に見て依然大きい状態である。この原因として、タスクを分解する際、現状の提案ガイドラインが定めているサブタスクの種類の分類方法が不十分であること。さらに、情報提示方法の選択には、作業の難しさによって、情報提示方法の選択が変化する傾向にあったが、そもそも被験者ごとに、作業の難しいと感じるサブタスクにばらつきがあること。また、情報提示方法の選択補助として、低い精度の推薦を行なっているために、利用者の思考が反映されやすく、この被験者ごとの思考の違いがばらつきに影響していることが挙げられる。また、提案ガイドラインを使用することで、デザイン表作成時間が短縮され、シ

ステム実装は簡単になる．このことから，提案ガイドラインはシステム設計者と開発者の負担を軽減できるものであると考える．

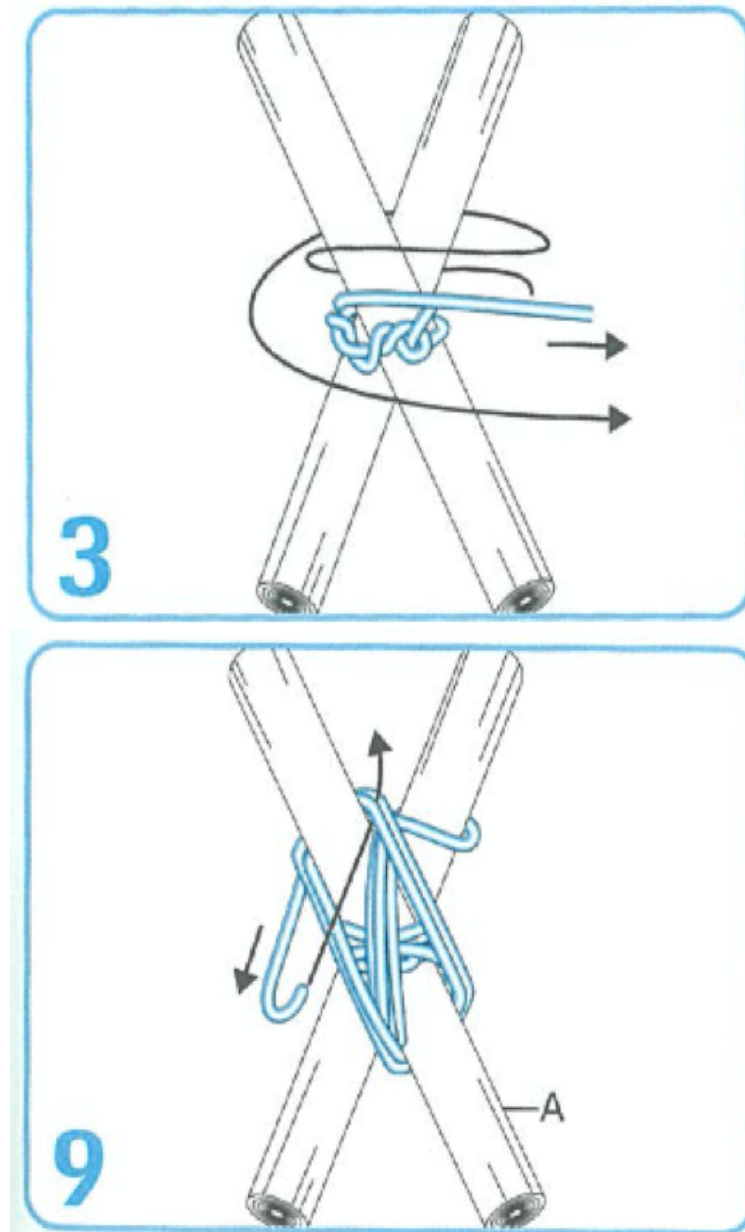


Figure 12 立木の交差部に、ロープを2回巻きつける工程（上）とロープの端を既に巻き付けられたロープの下を通すようにもっていく工程（下）

グループ	PC の組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.51	0.42
既存ガイドライン使用グループ	0.75	0.70

Table 8 グループ化した情報提示方法におけるレーベシュタイン距離

グループ	PC の組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.59	0.53
既存ガイドライン使用グループ	0.66	0.52

Table 9 未経験者の情報提示方法におけるレーベシュタイン距離

グループ	PC の組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.41	0.30
既存ガイドライン使用グループ	0.77	0.87

Table 10 経験者の情報提示方法におけるレーベシュタイン距離

グループ	PC の組み立て作業	ロープワーク
被験者全員	0.066	0.005
AR システム作成未経験者	0.785	0.198
AR システム作成経験者	0.0286	0.029

Table 11 経験者と実験タスクごとの順位和検定の P 値

グループ	PC の組み立て作業	ロープワーク
提案ガイドライン使用グループ	0.46	0.52

Table 12 情報提示方法のばらつきと難しいと感じる工程

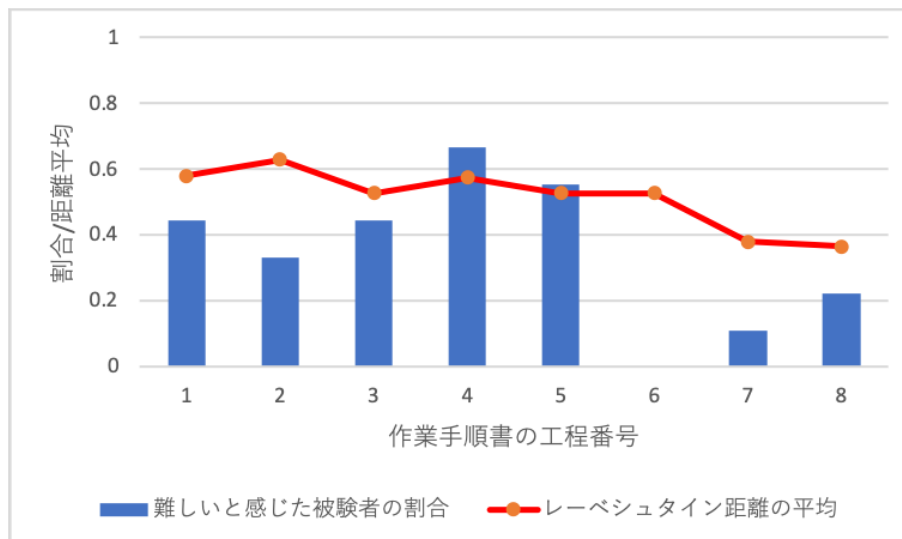


Figure 13 PC 組み立て作業における工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつき (レーベシュタイン距離)

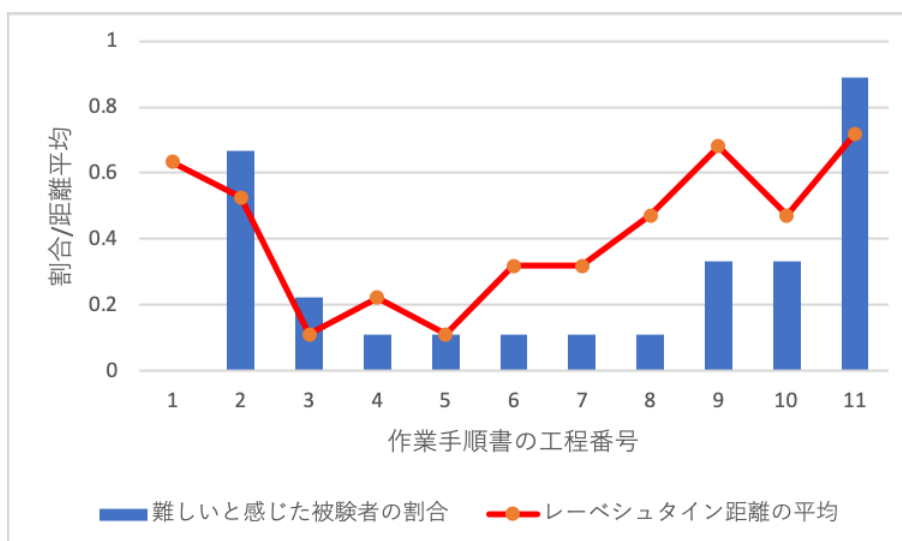


Figure 14 ロープワークにおける工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつき (レーベシュタイン距離)

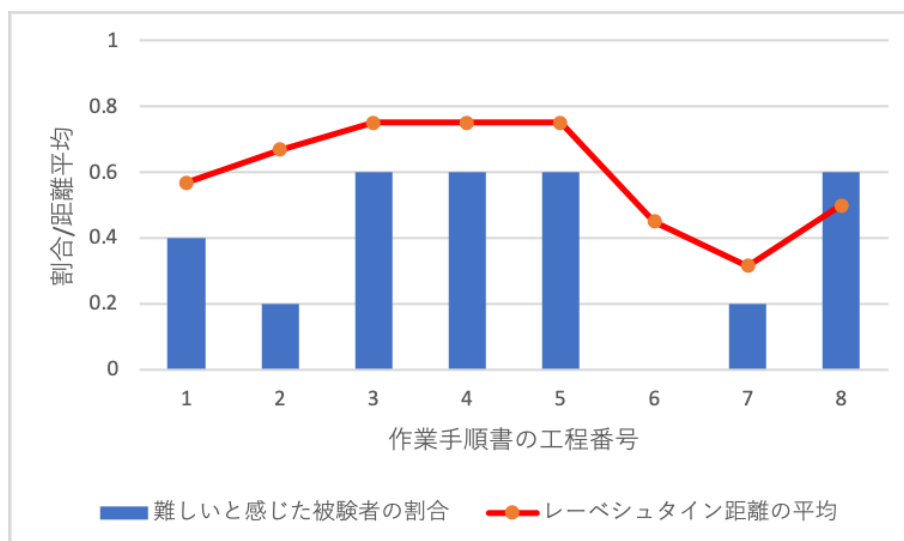


Figure 15 AR システム作成未経験者群でPC 組み立て作業における工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係

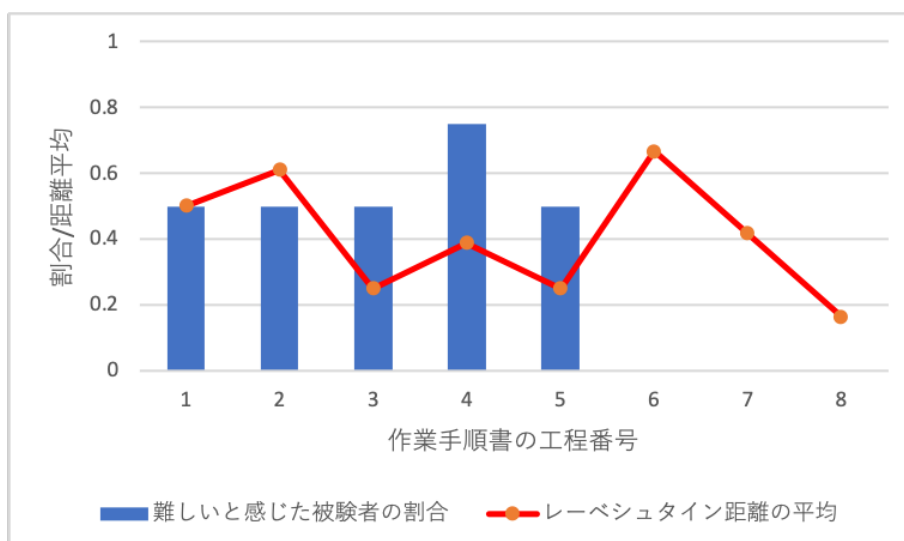


Figure 16 AR システム作成未経験者群でロープワークにおける工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係

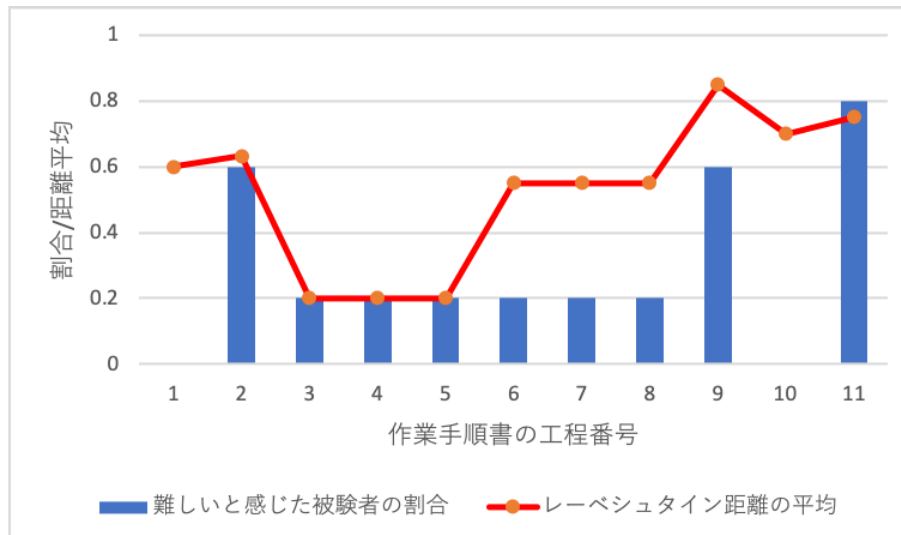


Figure 17 AR システム作成経験者群でPC 組み立て作業における工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係

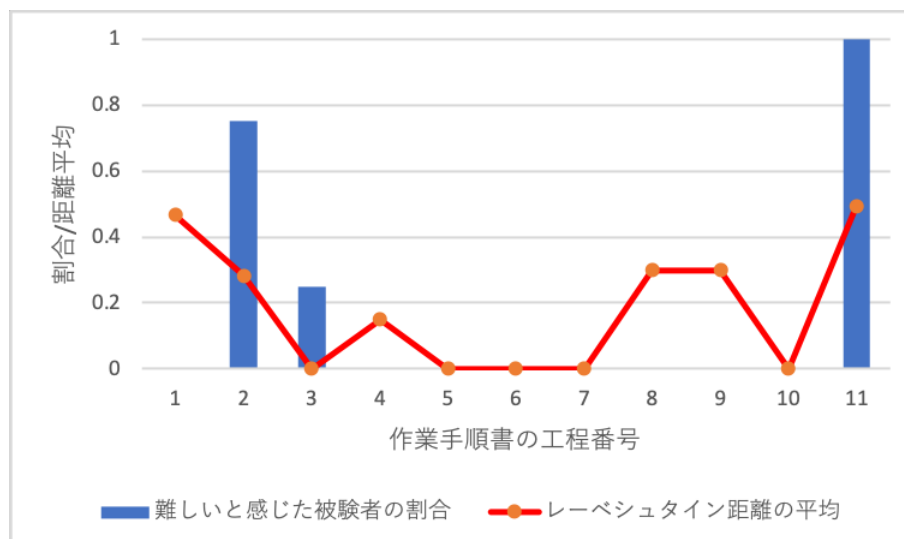


Figure 18 AR システム作成経験者群でロープワークにおける工程ごとの難しいと感じた被験者の割合とばらつきの関係

5. 実験2（品質検証実験）

実験1で被験者ごとに作成された情報デザイン表が作成された．2種類の実験タスクにおいて，既存ガイドラインを使用したARシステム作成経験のあるグループと未経験のグループから1つずつ，提案ガイドラインを使用したARシステム作成経験のあるグループと未経験のグループから1つずつ選択し，実験者がそれぞれを8種類のARシステムを実装した．そして，被験者にランダムで，提案ガイドラインを使用して未経験者が作成したデザイン表をもとに実装されたARシステム，経験者が作成したデザイン表をもとに実装されたARシステム，提案ガイドラインを使用して未経験者が作成したデザイン表をもとに実装されたARシステム，経験者が作成したデザイン表をもとに実装されたARシステムを使用して，実際に実験タスクを実行してもらい，作業時間や作業中のエラー回数，アンケートの主観評価をもとに品質の検証を行なった．

5.1 被験者

実験1同様に，被験者は，作業支援のARシステムに興味がある者を条件に募集をおこなった．被験者は，22歳から30歳までの26名の学生，そのうち男性が21名，女性が5名であった．

5.2 実験タスク

実験タスクとして，実験1と同様の2種類の作業を用意した．

5.3 実験に使用したARシステム

実験1において，実験1の事前アンケートをもとに，2つに分けたグループそれぞれで，ARシステムの作成経験が最も豊富な者と，最も経験が少ない者が作成した2つの情報デザイン表をそれぞれ抽出した．そして，それをもとに，2種類の実験タスクに関するARシステム，計8種類のシステムを実装した．

5.4 実験条件

被験者は，2種類の実験タスクに対して，4種類のARシステムからランダムに2つ割り当てられ，タスクを行なった．この時，被験者には，作業中の間違い

を少なくすることを一番に考慮してタスクを遂行するように伝えた。

5.5 実験環境

実験は静かで、周囲に人がいない部屋で実施した。被験者の前に、机が1つと、その上に、実験タスクを用意し、作業中、実験者が、被験者の隣で作業の状態を観察を行なった。被験者は立った状態で実験タスクをおこなった。被験者は、ARシステムを使用する場合は、HMDを装着し、ディスプレイに表示される指示内容に従いながら、作業を行なった。この時、HMDにはHoloLensを使用した。このHMDの操作方法(例えば、AirTap、クリッカーを使用した操作、音声入力)の習熟度は、被験者が過去にHoloLensを体験しているかどうかで大きく変わることから、実験のはじめに、10分程度のチュートリアルを設け、そこで、被験者は、HoloLensの操作方法を十分に習得した。そして、実験では、作業中、間違った状態で次のサブタスクへ進んでしまった場合や、1分程度手が止まってしまった場合、被験者から、実験監督者へ作業の助けとなる質問が来た場合には、即時に、監督者が被験者に正しい作業を教示した。

5.6 評価指標

評価指標として、以下4つを使用した。まず、作業効率を比較するために、実験タスクを完遂する間の作業時間、作業中のエラー回数を計測した。エラーは、間違った状態で次のサブタスクへ進んでしまった場合や、1分程度手が止まってしまった場合、被験者から、作業の進め方について質問が来た場合を1回と計算した。また、作業中の負担やシステム自体の使いやすさを評価するために、実験後にNASA-TLX[20]とSUSを使用したアンケートを実施し、分析を行った。

5.7 NASA-TLX

本実験では、NASA-TLXを用いる。しかし、従来のNASA-TLXの計算方法には、重み付けにWWLを指標として用いる上で問題がある。一対比較は時間がかかるうえに、被験者にとって判断が難しく、負担となるものである。さらに、6項目の一対比較法で、1つの項目に対し一度も選択しなかった場合、重み付け係数は0になってしまう。このとき、作業者にとってワークロードの要素として最も寄与が低いとしても、その項目の素点が0とは限らない。そして、素点が0に

なると、WWL 算出の上で、その項目は全く関与しないことになる。6 項目のうちの 5 項目だけで平均値を算出することになり、線形モデルの効率を減少させ、被験者間のばらつきを増加させることにつながる。この問題の解決案として、三宅ら [21] は NASA-TLX の一対比較を行わない代わりに、6 項目で素点の一番大きい項目から順に 16 位の順位づけを行い、この順位をそのまま重み付け係数とした。これを行うことで項目の欠落を防ぐことができ、最終的に、重み付け総和を係数の総和である 21 で割って平均値とする。本研究では、この得点を評価に用いる。

5.8 実験設計

この実験に対する仮説は以下の通りである。

- 仮説 1 提案ガイドラインから作成された AR システムは、既存ガイドラインのシステムと比べ、作業時間が短い。
- 仮説 2 提案ガイドラインから作成された AR システムは、既存ガイドラインのシステムと比べ、エラー回数が少ない。
- 仮説 3 案ガイドラインから作成された AR システムは、既存ガイドラインのシステムと比べ、SUS の得点が最も高い。
- 仮説 4 提案ガイドラインから作成された AR システムは、既存ガイドラインのシステムと比べ、NASA-TLX のスコアが小さい。

5.9 結果

図 19, 20, 21, 22 に、各タスクと各システムごとに平均作業時間、作業中の平均エラー回数を示す。そして、これに t 検定を行なった結果、どの AR システム同士の比較も P 値が 0.1 を超え、有意差は見られなかった。この結果から、仮説 1 と 2 は立証されなかった。ただし、PC の組み立て作業において、作業時間の平均値は、提案ガイドラインをもとにした AR システムは、既存ガイドラインのシステムに比べ、同程度か短くなった。しかし、ロープワークでは、経験者の提案ガイドラインから作成された AR システムは、未経験者の既存ガイドラインから作成された AR システムに比べて、作業時間が長かった。さらに、エラー回数

の平均値は、2つの実験タスクともに、提案ガイドラインをもとにした2つのARシステムは、既存ガイドラインのシステムに比べ、少ない結果となった。

次に、SUSの結果を図23, 24に示す。この結果においても、t検定の結果、有意差は見られず、仮説3も立証されなかった。ただし、2つの実験タスクにおいて、提案ガイドラインから作成された経験者のARシステムは、既存ガイドラインから作成された2つのシステムと比べて、SUSのスコアの中央値は同じくらい、もしくは高かった。それに対して、提案ガイドラインから作成された未経験者のARシステムは、PC組み立て作業では、既存ガイドラインの2つのシステムよりも低い結果となったが、ロープワークでは、同程度か、それより高い結果となった。

次に、実験後に実施したNASA-TLXの結果を図25, 26に示す。この結果においても、t検定の結果、有意差は見られず、仮説4も立証されなかった。ただし、PCの組み立て作業においては、経験者の提案ガイドラインから作成されたARシステムのスコアの中央値は、既存ガイドラインの2つのシステムと同程度であったが、未経験者の提案ガイドラインから作成されたARシステムの中央値が、高い結果となった。また、ロープワークでは、提案ガイドラインの2つのARシステムは、既存ガイドラインの2つのARシステムと比べて、スコアの中央値が小さいという結果となった。

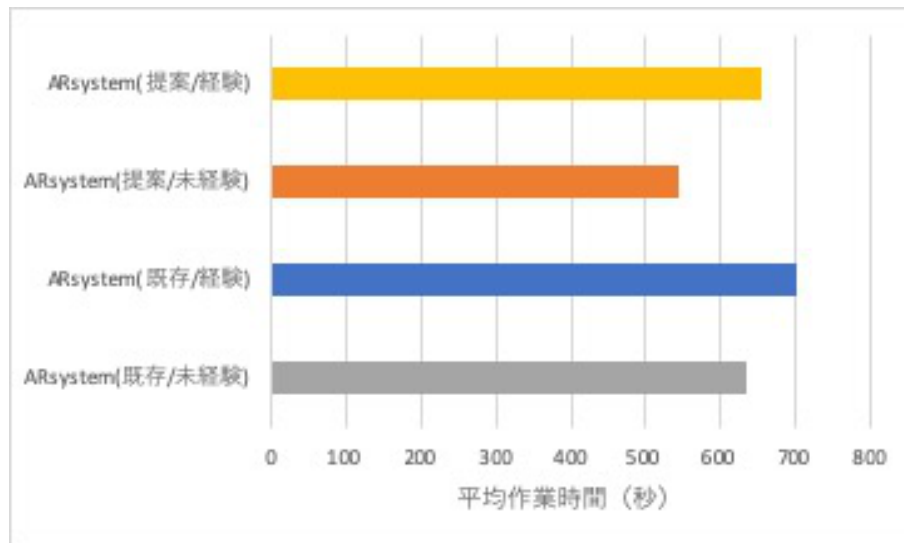


Figure 19 PC の組み立て作業における各システムを使用したグループの平均作業時間

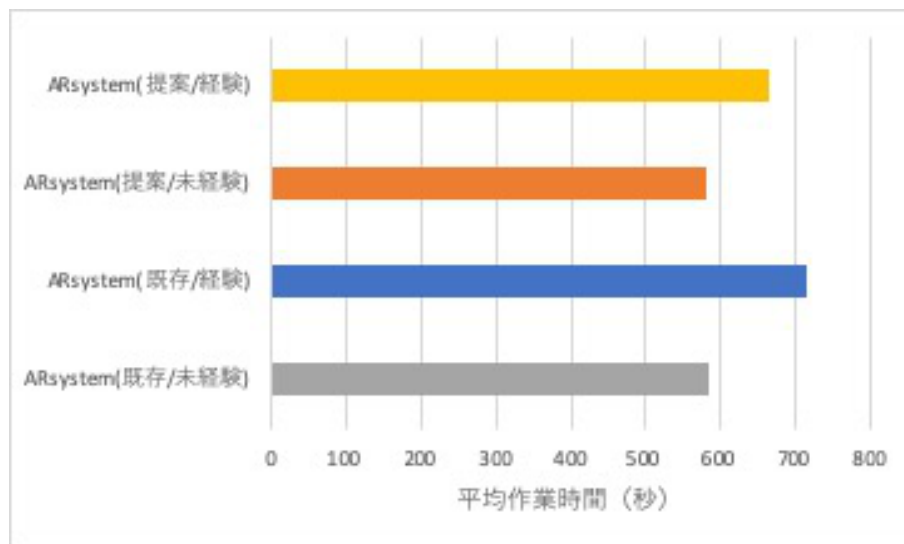


Figure 20 ロープワークにおける各システムを使用したグループの平均作業時間

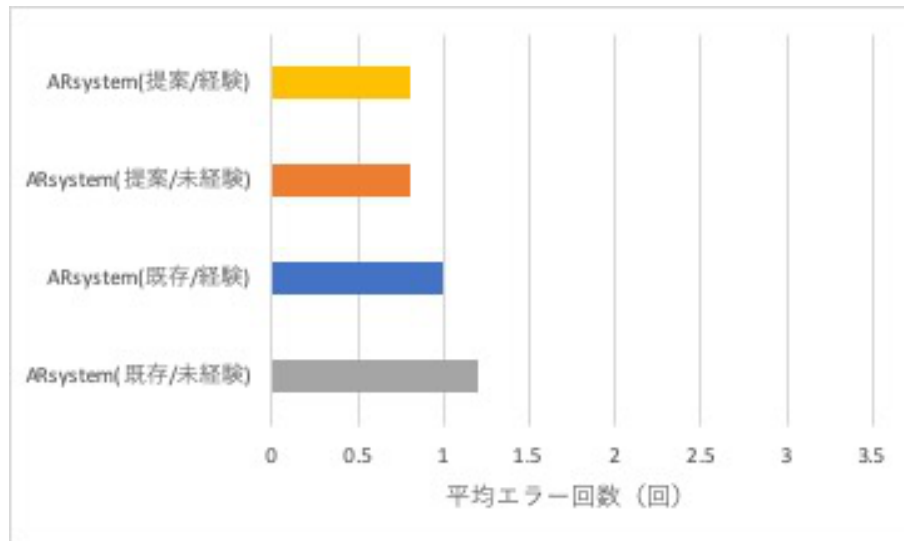


Figure 21 PCの組み立て作業における各システムを使用したグループの平均エラー回数

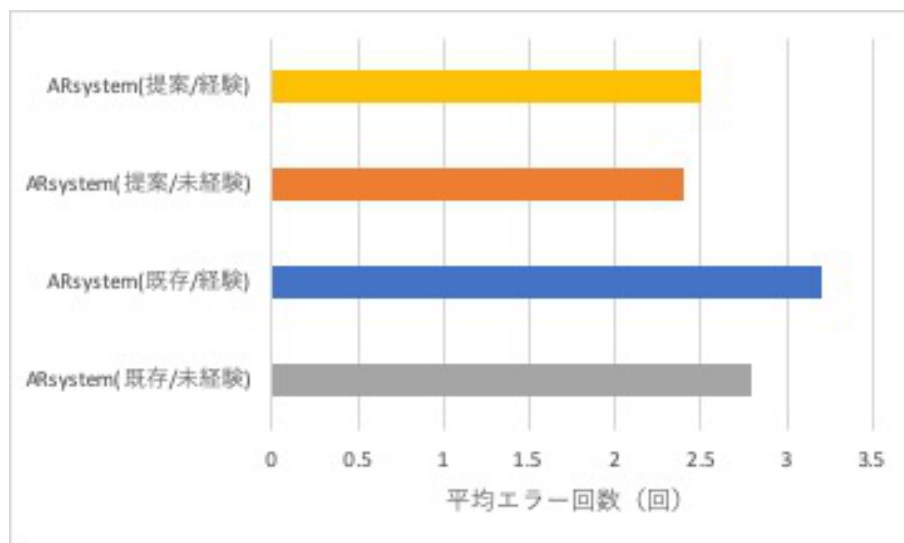


Figure 22 ロープワークにおける各システムを使用したグループの平均エラー回数

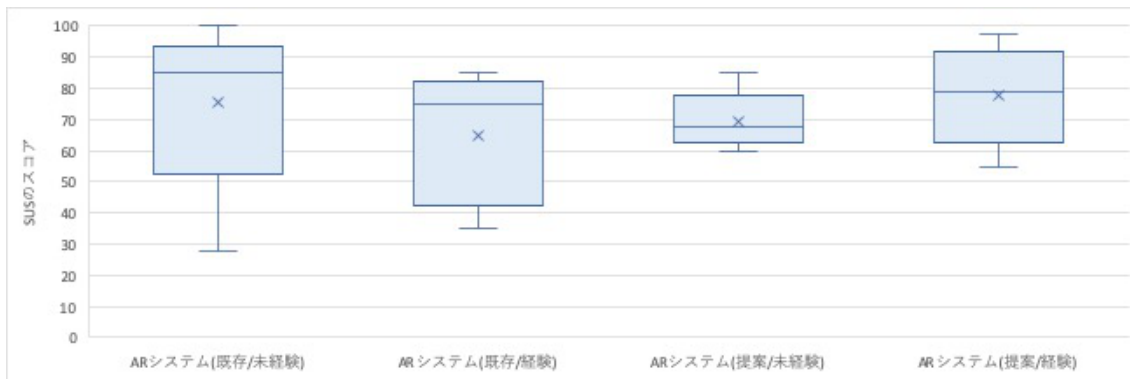


Figure 23 PCの組み立て作業における各システムを使用したグループのSUSの平均スコア

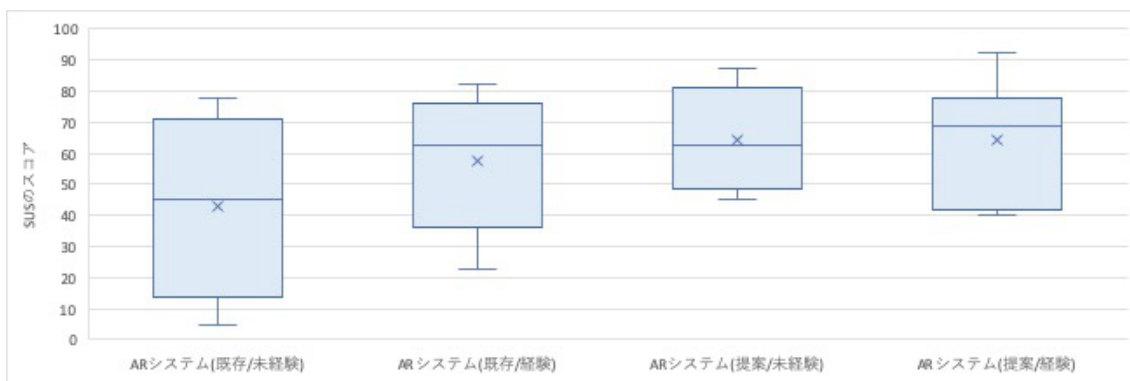


Figure 24 ロープワークにおける各システムを使用したグループのSUSの平均スコア

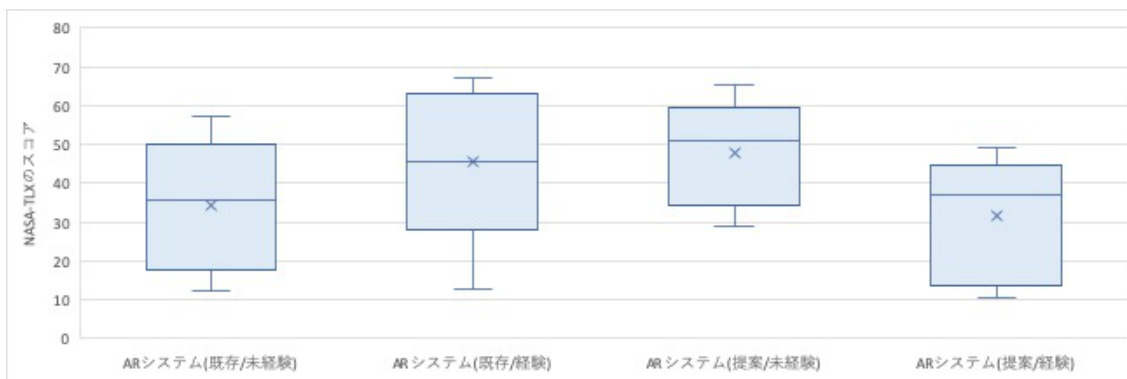


Figure 25 PCの組み立て作業における各システムを使用したグループのNASA-TLXのスコア

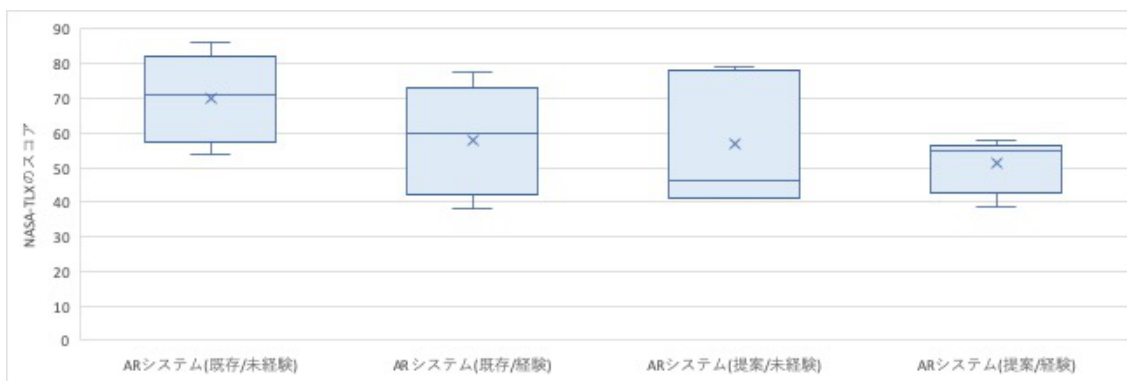


Figure 26 ロープワークにおける各システムを使用したグループのNASA-TLXのスコア

5.10 考察

本実験は、被験者 26 名に対して実施したが、各グループは 5～6 人となっており、被験者数が少なく、これが各結果に有意差が見られない結果につながったと考えられる。作業時間やエラー回数などの作業パフォーマンスは、提案ガイドラインから作成された AR システムを使用した場合と既存ガイドラインのシステムを使用した場合とで、平均値で見ると、提案ガイドラインの AR システムが有用であるように見える。さらに、SUS や NASA-TLX のスコアの結果においても、提案ガイドラインの AR システムは、中央値で見ると、使いやすく、作業負担も小さかった。このことから、提案ガイドラインを使用すると、既存ガイドラインを使用した場合に比べ、作業効率は維持しつつも、使いやすく、作業負担の小さい AR システムを作成可能であることが期待される。

実験後の被験者からのコメントより、これらの AR システムについて、3D モデルや 3DCG アニメーションの実物体への重畳表示は、作業内容が 3D で見ることができることや、物体を設置する場合でも設置方法や設置場所が明確で分かりやすいといった意見がある一方で、PC の組み立て作業においては、提案ガイドラインのシステムでは、「動画だけでも十分理解しやすい」、また、「コネクタ類を探す場合には、3D モデルではなく、写真の方が見やすい」という感想が得られた。さらに、既存ガイドラインのシステムでは、「実物体に 3DCG アニメーションを重ね表示しているが、実物体と重なって見にくく、作業しづらかった」という感想も得られた。これらが、3DCG の利用を極力抑え、画像や動画を多用した提案ガイドラインの AR システムが、3DCG を多用した既存ガイドラインのシステムに比べ、優位にあった原因であると考えられる。

また、提案ガイドラインを使用した、AR システムの作成経験を持つ被験者と経験がない被験者が作成した AR システムでは、違いがあった。経験者の AR システムでは、視野内固定表示や実物体への重畳表示方法が切り分けられて使用されていたのに対し、未経験者の AR システムでは、視野内固定表示や環境固定表示、実物体への重畳表示方法が混在しており、統一性が無い部分が見られた。これらが原因で、各結果で経験者の AR システムが未経験者のシステムと比べて、優位になったと考えられる。そして、これらの問題は、実装する際のトライアルアンドエラーによって、要所での情報提示方法を変更することで解決できると考える。

ただし、本実験では、情報提示方法を変更するようなトライアルアンドエラーは行わずに AR システムを実装した。すなわち、初期段階のシステムで、既存の

ものと比較し、評価したものとなっている。初期段階でのシステムにおいて、期待できる品質のシステムとなったことから、提案ガイドラインはシステム開発を補助していると考えられる。

実際に、提案ガイドラインを使用した被験者から実験後に、「画像が実物体と被って見にくいので表示場所をもっとディスプレイの隅にすべき」や「動画で使用する物体を見やすくアノテーションすべき」、「現在の作業の目標を分かりやすくするために、作業動画の隣に、最終状態を示す画像や、実物体の隣に最終状態を示す 3D モデルを設置すべき」などの改善案を得られた。既存ガイドラインでは、「3D アニメーションは実物体に重畳表示ではなく、隣に重畳表示すべき」や「3DCG アニメーション重畳表示する場合には、周辺環境の 3D モデルも同時に重畳することで、位置ズレがあっても分かりやすくなるのではないか」、「アニメーションが邪魔になる場合があるので、非表示にする機能が必要ではないか」といった改善案が得られた。これらを考慮した上で、再度修正を加えるとさらに高品質な AR システムが作成可能であると考ええる。

また、実験後の被験者からのコメントより、実験に使用した HoloLens が重く、「作業中にズレて、イライラした」や「作業中、視野角が小さく、ディスプレイ上の情報が見えにくかった」という感想を得た。ここから、HoloLens の使い心地が全体として結果に悪い影響を与えていることも考えられる。これは、HoloLens2 などの高品質は HMD の登場で解決できると考える。

5.11 まとめ

提案ガイドラインを使用すると、既存ガイドラインの場合と比べ、有意差は確認できなかったが、作業パフォーマンスは維持しつつ、作業負担の軽減や使いやすさの向上が期待できると考える。そして、本実験は情報提示方法を変更するようなトライアルアンドエラーは行わず、初期段階のシステム同士で比較を行ない、評価した。初期段階で、提案ガイドラインの AR システムは既存ガイドラインのシステムよりも良いもしくは同等の品質が見られたことから、今後さらに良いシステムへと改善する場合であれば、提案ガイドラインの使用が、システム実装者の負担の軽減にも繋がることが期待できる。

6. おわりに

6.1 まとめ

本研究は、組み立て作業支援のための AR システムを作成する際に問題となる情報デザインに対して、タスクを一定粒度のサブタスクに分解し、利用可能なトラッキング技術について検討し、そこから提示される情報提示方法をさらに、サブタスクの難しさや開発コストを考慮して推薦を行うガイドラインを提案した。そして、このガイドラインの組み立て作業に対する効果を確認するために、2種類の実験を行なった。1つ目に「提案ガイドラインを使用することで、利用者の AR に関する知識や経験に関わらず、均一なデザイン表の作成が可能か」を確認する再現性の検証実験、2つ目に、「提案ガイドラインを使用して作成したデザイン表から、作業効率の良い AR システムは作成可能か」を確認するため品質検証の実験を行った。1つ目の再現性検証実験において、提案ガイドラインを使用することで、既存ガイドラインを使用した場合と比べて、より均一な情報デザインを行えることがわかった。ただし、知識や経験の有無によって大きくばらつきが発生するため、利用者にとって、さらに分かりやすいサブタスクの種類の分類方法や、情報提示方法の選択補助が求められる。そして、提案ガイドラインから作成された AR システムの開発コストは、既存ガイドラインのシステムのコストに比べて、小さくすることができた。さらに、2つ目の品質検証実験において、提案ガイドラインから作成された AR システムは、既存ガイドラインのシステムと比べて、作業パフォーマンスやシステムの使いやすさ、作業負担の平均値や中央値で優位は結果を示した。このことから、AR システムの実装者の負担を軽減、作業者の作業効率の向上が期待される。

6.2 今後の課題

本実験では、提案ガイドライン使用時に、タスクをサブタスクへ分解する際に、サブタスクの分類方法についての利用者ごとに解釈の違いによりばらつきが発生した。このことから、利用者により分かりやすいサブタスクの種類の再定義が求められる。また、提案ガイドラインでは、様々な論文から引用した様々な情報提示方法を収録しているが、現在ある全ての情報提示方法を網羅している訳ではない。そのため、さらに、利用者の高品質な AR システムの作成を補助するためには、今後、新しい情報提示方法の追加や更新が必要となる。そして、情報提示方法が

増えていくにつれて，情報提示方法の選択が難しくなる．そこで，サブタスクの種類と情報提示方法の関係を，作業の難易度や周辺環境だけでなく，作業者のスキルや支援情報の内容も考慮して，選択補助を行う必要がある．また，ARシステムの情報デザインを行なった後のシステム実装に関しては，開発ノウハウを述べているだけの補助にとどまっている．このことから，使用する物体の3Dモデルを作成や配置といった更なる実装補助が求められる．

謝辞

本研究を発表するにあたり，ご指導頂きました方々に感謝いたします。まず，終始，幾度もの打ち合わせと，たくさんの助言を頂き，研究内容のみならず研究に対する姿勢や発表の準備方法など基本的なことから多くのことを学ぶことができました，インタラクティブメディア設計学研究室の加藤博一教授に心より感謝いたします。次に，本研究の動機や背景に関する丁寧なアドバイスや激励を頂きました，神原誠之准教授に心より感謝いたします。次に，幾度もの打ち合わせと，度重なる論文や修論の添削，実験準備やデータ分析に対する多大な助言と支援を頂きました藤本雄一郎助教に心より感謝いたします。次に，本研究は，株式会社富士通研究所との共同研究によるものであり，打ち合わせの度にいただきました丁寧なアドバイスや，実際の現場や人への調査に協力していただきました，茂木厚憲氏，長村一樹氏，倉木健介氏，吉武敏幸氏，福岡俊之氏にも心より感謝いたします。また，本ガイドラインのWebサイトを公開するにあたり，Webサイトの作成方法に関して多大な助言を頂きました，松本彩香氏，サイトに載せるための写真や動画の撮影に協力していただきました，申一鳴氏に感謝の意を表します。実験の際に，留学生用にシステムの英語化を行う際に，夜遅くまで翻訳に協力して頂きました，インタラクティブメディア設計学研究室のNicko Caluya氏，Isidro Butaslac氏に感謝の意を表します。そして，この実験を実施する際，プレ実験に協力頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室の学生の皆様，ありがとうございました。最後に，研究を続けるにあたって，金銭面や精神面で多大な協力して頂きました，両親，家族，友人，恋人には深謝いたします。

参考文献

- [1] Microsoft. Start designing and prototyping. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design>.
- [2] 経済産業省. 第 2 節 我が国の産業構造を支える製造業. <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2015/honbun.html/010102.html>.
- [3] 公益財団法人日本生産性本部. 労働生産性の国際比較 2018. [https://www.jpcc-net.jp/intl comparison/intl comparison 2018.pdf](https://www.jpcc-net.jp/intl%20comparison/intl%20comparison%202018.pdf).
- [4] Riccardo Palmarini, John Ahmet Erkoyuncu, Rajkumar Roy, and Hosein Torabmostaedi. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 49, pp. 215–228, 2018.
- [5] Jonas Blattgerste, Benjamin Streng, Patrick Renner, Thies Pfeiffer, and Kai Essig. Comparing conventional and augmented reality instructions for manual assembly tasks. In *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, pp. 75–82. ACM, 2017.
- [6] Apple. Human interface guidelines. <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/ios/system-capabilities/augmented-reality/>.
- [7] Google. Augmented reality design guidelines. <https://designguidelines.withgoogle.com/ar-design/augmented-reality-design-guidelines/introduction.html>.
- [8] Steven Henderson and Steven Feiner. Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 17, No. 10, pp. 1355–1368, 2010.
- [9] Steven J Henderson and Steven K Feiner. Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task. In *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 191–200. IEEE, 2011.

- [10] Mengu Sukan, Carmine Elvezio, Ohan Oda, Steven Feiner, and Barbara Tversky. Parafrustum: visualization techniques for guiding a user to a constrained set of viewing positions and orientations. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 331–340. ACM, 2014.
- [11] Michihiko Goto, Yuko Uematsu, Hideo Saito, Shuji Senda, and Akihiko Iketani. Task support system by displaying instructional video onto ar workspace. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 83–90. IEEE, 2010.
- [12] Shalika Pathirathna, Christian Sandor, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, and Hirokazu Kato. Video guides on head-mounted displays: the effect of misalignments on manual task performance. In *Proceedings of the 26th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and the 21st Eurographics Symposium on Virtual Environments: Posters and Demos*, pp. 9–10. Eurographics Association, 2016.
- [13] Rafael Radkowski, Jordan Herrema, and James Oliver. Augmented reality-based manual assembly support with visual features for different degrees of difficulty. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 31, No. 5, pp. 337–349, 2015.
- [14] Riccardo Palmarini, John Ahmet Erkoyuncu, and Rajkumar Roy. An innovative process to select augmented reality (ar) technology for maintenance. *Procedia CIRP*, Vol. 59, pp. 23–28, 2017.
- [15] Tobias Hollerer Dieter Schmalstieg. ARの教科書. マイナビ出版, 2018. 池田聖, 一刈良介, 大槻麻衣, 河合紀彦, 酒田信親, 武富貴史, 藤本雄一郎, 森尚平, 山本豪志朗 訳, 池田聖, 酒田信親, 山本豪志朗 編.
- [16] Vladimir I Levenshtein. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. In *Soviet physics doklady*, Vol. 10, pp. 707–710, 1966.
- [17] Eric Brill and Robert C Moore. An improved error model for noisy channel spelling correction. In *Proceedings of the 38th Annual Meeting on Associa-*

- tion for Computational Linguistics*, pp. 286–293. Association for Computational Linguistics, 2000.
- [18] Liviu P Dinu and Andrea Sgarro. A low-complexity distance for dna strings. *Fundamenta Informaticae*, Vol. 73, No. 3, pp. 361–372, 2006.
- [19] Frank Wilcoxon, SK Katti, and Roberta A Wilcox. Critical values and probability levels for the wilcoxon rank sum test and the wilcoxon signed rank test. *Selected tables in mathematical statistics*, Vol. 1, pp. 171–259, 1970.
- [20] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. Elsevier, 1988.
- [21] 三宅晋司, 神代雅晴. メンタルワークロードの主観的評価法 nasa-tlx と swat の紹介および簡便法の提案. 人間工学, Vol. 29, No. 6, pp. 399–408, 1993.

付録

A. サブタスクの種類とトラッキングの自由度で変化する使用可能な情報提示方法一覧

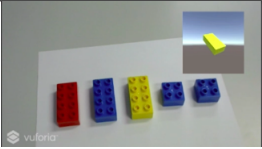
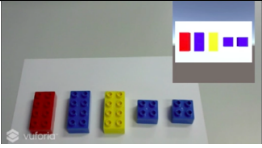
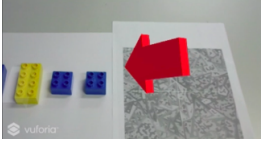
番号	サブタスクの種類	トラッキング技術の自由度	情報提示方法
1	オブジェクトの選択	ユーザートラッキング:N/A, オブジェクトトラッキング: N/A	 対象物を示す画像や動画を 視野内に固定表示
2	オブジェクトの選択	ユーザートラッキング:N/A, オブジェクトトラッキング: 位置	 場所を示すマップを視野内 に固定表示
3	オブジェクトの選択	ユーザートラッキング:位置 +姿勢, オブジェクトトラッ キング: 位置	 対象物を示す画像や動画を 作業環境に重畳表示
4	オブジェクトの選択	ユーザートラッキング:位置, オブジェクトトラッキング: 位置	 矢印やトンネルなど方向を 示す 3D モデルを視野内に 固定表示
5	オブジェクトの選択	ユーザートラッキング:位置 +姿勢, オブジェクトトラッ キング: 位置+姿勢	 3D モデルやアニメーショ ンを実物体に重畳表示

Table A.26 サブタスク：オブジェクトの選択におけるトラッキングの自由度と
使用可能な情報提示方法一覧

B. 実験前のアンケート

Table B.26 AR システムの経験に関する質問

番号	質問内容	選択肢
Q1	どれくらいの期間，拡張現実感（以降，AR）について習学していますか．	1ヶ月未満，半年未満，1年未満，2年未満，それ以上
Q2	ここ1ヶ月で，どのくらいの頻度でARに触れていますか．	一度も触れていない，3回以内，週に1～2回程度，週に3～4回程度，ほぼ毎日
Q3	あなたが思う自分のARに対する知識レベルを教えてください．	初級者，中級者，上級者
Q4	これまでにどのくらいの数のARアプリケーションまたはシステムを開発したことがありますか．	0個，1～3個，4～6個，7～9個，10個以上
Q5	最後にARアプリケーションまたはシステムを製作したのは，どのくらい前ですか．	製作経験なし，1週間以内，半年以内，1年以内，それ以上
Q6	これまでに，光学透過型ヘッドマウントディスプレイ (Optical-see-through head mounted display) を使用したことはありますか．	ある，ない
Q7	HoloLens を使用したことはありますか．	ある，ない

Table B.26 AR の知識を確認するための質問

番号	質問内容	選択肢
Q1	Microsoft の HoloLens は光学透過型ヘッドマウントディスプレイ（Optical-See-Through HMD）である．	正しい，誤り
Q2	ARにおけるトラッキングとは，ある物体の位置姿勢を逐次的に測定することである．	正しい，誤り
Q3	加速度センサにより，6 自由度の位置姿勢を測定できる．	正しい，誤り
Q4	6 自由度には，3 次元の位置と 3 次元の姿勢（方向）を含む	正しい，誤り
Q5	カメラによる物体の自然特徴点のトラッキングを行う際，テクスチャ として十分に疎で繰り返しの模様が良い（例：凹凸のない真っ白な壁）	正しい，誤り
Q6	AR マーカーを取り付けた物体をカメラで撮りながら，透過型ディスプレイ上でその物体に CG を重畳表示する際，1 つの座標系変換で実現できる	正しい，誤り
Q7	SLAM 技術を用いることで，世界座標系におけるカメラの位置姿勢を推定できる．	正しい，誤り

C. 作業手順書

実験に使用した電源ユニットを PC 筐体へ組み付ける作業を支援する手順書を図 C.15 示す。筋交い縛りを支援する手順書を図 C.15 示す。さらに、図 C.15 には、実験前のチュートリアルで使用したブロックの組み付け作業を示す。



Figure C.15 電源ユニットの組み付け作業の作業手順書

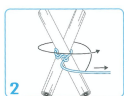
筋交い縛り

1. ロープの端から 2.5 cm 程度の場所に印をつける。

2. 丸太の交差部にロープを巻き付け、ロープの先を端から 25cm の位置で下から上に交差させ、ロープの端を巻きついている左側のロープに下から上に 2～3 回巻きつける。



3. ロープの元を強く引っ張り、結び目を引き締める。



4. 交差部の上に 2 回ほどロープに力を入れながら巻きつけ、端を交差部の下に持っていく。



5. 手前の丸太に、1 回だけロープを、力を入れながら巻き付け、今度は縦方向に巻きつける。



を入れながら巻きつける。



10. ロープの端を矢印のように持っていく。



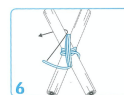
11. 丸太に、ロープの端を 1 回巻きつけ、ロープでクロスを作り、もう一度ロープを巻きつけ、ロープの端をクロスしたロープの内側に通し、結び目を引っ張り、固定して完成。



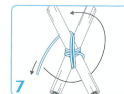
6. 矢印の様にロープを持って行き、縦方向に 3 回ほど、力を入れながら巻きつける。



7. 矢印のようにロープの端を持っていく。



8. 矢印のように、2 本の丸太の間に割りを入れる。



9. ロープの端を矢印のように持っていく、左斜め上りの割りを入れる様に 3 回ほど力

裏側から見た図（ただし、最後ロープは切らない）

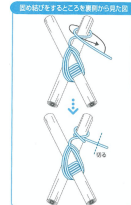
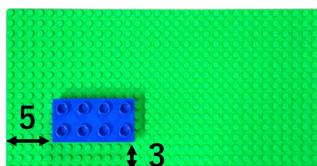


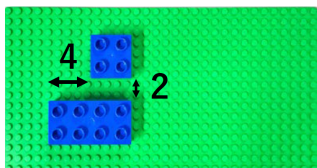
Figure C.15 筋交い縛りの作業手順書

ブロックの組み立て作業

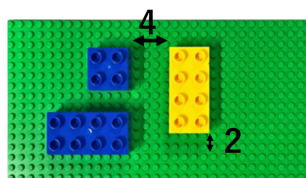
1. 緑の土台の上に、左端から5マス空け、下端から3マス空けて、2×4の青色ブロックを横向きに設置。



2. 緑の土台の上に、既に設置済の2×4の青色ブロックの左端から4マス空け、上端から2マス空けて、2×2の青色ブロックを設置。



3. 緑の土台の上に、既に設置済の2×2の青色ブロックの右端から4マス空け、既に設置済の2×4の青色ブロックの下端から2マス空けて、2×4の黄色ブロックを縦向きに設置。



4. 2×2の青色ブロックと2×4の黄色ブロックの上に2×4の赤色ブロック横向きに設置して、完成。

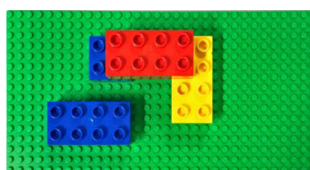


Figure C.15 ブロックの組み立て作業の作業手順書

D. デザイン表

図D.15に、提案ガイドラインにそって作成された情報デザイン表の例と、図D.15に、既存ガイドラインにそって作成された情報デザイン表の例を示す。

No.	サブタスクの内容	サブタスクの種類	情報提示方法	画像や動画，3Dモデル自体の表現方法
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Figure D.15 提案ガイドラインを使用したグループが利用するデザイン表

No.	サブタスクの内容	情報提示方法
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		

Figure D.15 既存ガイドラインを使用したグループが利用するデザイン表

E. 実験後のアンケート

Table E.31 実験後のアンケート内容

番号	質問内容	回答
Q1	デザイン表作成に対する難易度について教えてください.	1(難しい)-5(簡単) からの選択
Q2	完成したデザイン表はどのくらい完璧なものであると思いますか.	1(不十分)-5(完璧) からの選択
Q3	デザイン表作成中, 最も負担に感じた場面はどこですか.	自由記述
Q4	どこの補助が一番欲しいと感じましたか.	自由記述
Q5	既存ガイドラインについて気になったことがあれば, ご記入ください.	自由記述
Q6	実験全体について何か気になったことがあれば, ご記入ください.	自由記述