

修士論文

利用可能技術に応じたヘッドマウンテッドディスプレイ 型拡張現実感作業支援システムのための設計指針

安藤 瑞希

2019 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

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

安藤 瑞希

審査委員：

加藤 博一 教授 （主指導教員）

清川 清 教授 （副指導教員）

Alexander Plopski 助教

利用可能技術に応じたヘッドマウンテッドディスプレイ 型拡張現実感作業支援システムのための設計指針*

安藤 瑞希

内容梗概

拡張現実感とは実世界上の物体に対してコンピュータで生成された情報を重ね合わせて表示する技術である。実世界上の作業対象とマニュアル上の支援情報を関連付けた提示が可能という点から、拡張現実感とは作業支援の分野で幅広く研究が行われている。また、拡張現実感アプリケーションを作成する際の支援ツールとして、多くの研究者や企業が設計指針を提供している。しかし、これら設計指針の大半は拡張現実感を実現するための要素技術であるトラッキング技術が十分利用できる環境のみを想定しているため、実際に作業現場で使用するコンテンツの設計は難しい。本研究では、従来の設計指針では支援が困難であった、トラッキング技術が部分的に利用可能、もしくは利用不可能な作業環境であっても、有用な作業支援コンテンツを作成できる設計指針の開発を行う。マニュアル作業を支援する上で有用な可視化技術について調査を行い、それらを利用する際に必要となるトラッキング情報ごとに分類することで、直感的に作業支援コンテンツを設計できるような設計指針を実現した。本設計指針を作業支援の初心者にも利用してもらい、実際に作業支援システムを設計してもらうことで、本設計指針の堅牢性を確認した。

キーワード

拡張現実感，ヘッドマウンテッドディスプレイ，作業支援，設計指針

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文，
2019 年 3 月 15 日。

Design Guideline for Creating HMD based Augmented Reality Content in Task Support*

Mizuki Ando

Abstract

Augmented Reality (AR) is a technology which overlays information generated by computers on the real world. AR is a useful technology in task support domain because it can associate task information with specific locations in real world. Currently, AR content is designed by each expert's decision, and assistance to design appropriate AR content for novice designer is not sufficient. Although there is some study about design guidelines for AR content, these studies have a limitation. It assumed that tracking technologies to realize AR are available in the workspace. However, tracking technologies are often not available in actual workspace. In this research, we develop a design guideline that novice designers create effective AR content even in situations where tracking technologies are not available. By classifying AR technology into tracking information that is necessary when using them, I realized design guidelines that novice designers can design AR content intuitively. In user study, novice designed AR content to support actual assembly tasks using our design guideline. And, they achieved to design useful AR content corresponding to technical requirement.

Keywords:

Augmented Reality, Head-Mounted Display, Task Support, Design Guideline

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 15, 2019.

目次

図目次		v
表目次		vi
第 1 章	はじめに	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の貢献	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	関連研究と本研究の位置付け	3
2.1	作業支援分野における拡張現実感	3
2.2	拡張現実感を用いた作業支援システムの設計指針	5
2.2.1	表示コンテンツに関する設計指針	5
2.2.2	インタラクションに関する設計指針	6
2.3	本研究の位置付け	8
第 3 章	作業内容と技術レベルに応じた支援システムの設計指針	10
3.1	設計指針の概要	10
3.2	作業のサブタスクへの細分化	12
3.3	技術レベルに基づいた提示手法の決定	16
3.3.1	拡張現実感コンテンツとトラッキング技術の関係	16
3.3.2	技術別可視化手法選択表	18
第 4 章	設計指針の堅牢性に対する評価実験	23
4.1	目的	23
4.2	実験方法	23
4.2.1	被験者	24
4.2.2	作業内容	24
4.2.3	実験結果	28
4.2.4	考察	33

第 5 章	まとめ	35
	謝辞	36
	参考文献	37

図目次

2.1	拡張現実感による CG モデルの提示 [4]	3
2.2	拡張現実感によるビデオインストラクションの提示 [10]	4
2.3	作業完了に伴うインストラクションの自動更新 [20]	7
2.4	仮想オブジェクトの移動と回転の制限 [22]	8
3.1	技術別可視化手法選択表	11
3.2	マニュアル作業の流れ	12
3.3	作業のサブタスクへの分解	15
3.4	拡張現実感を用いた作業支援システム (左: [4], 右: [5])	16
3.5	Picture in Picture を用いた組み立て作業の支援 [25]	17
3.6	設置位置と姿勢 (ベースオブジェクトが作業空間に固定)	19
3.7	設置位置と姿勢 (ベースオブジェクトが作業空間に非固定)	19
3.8	設置位置と姿勢及び設置方法 (ベースオブジェクトが作業空間に固 定)	20
3.9	設置位置と姿勢及び設置方法 (ベースオブジェクトが作業空間に非 固定)	20
3.10	オブジェクトの特定	21
3.11	オブジェクトの移動・観察	21
3.12	オブジェクトのサイズ調整	22
3.13	オブジェクトの変形	22
4.1	作業支援コンテンツの設計の流れ	24
4.2	拡張現実感アプリケーションの開発経験について	25
4.3	タスク 1 のマニュアル	26
4.4	タスク 2 のマニュアル	26
4.5	タスク 3 のマニュアル	27
4.6	タスク 4 のマニュアル	27

表目次

3.1	サブタスク一覧表	13
3.2	作業のサブタスクへの分解	15
4.1	各作業におけるトラッキングの条件	25
4.2	堅牢性評価実験の結果 [%]	28
4.3	タスク 1 (条件 1) の設計結果	29
4.4	タスク 1 (条件 2) の設計結果	29
4.5	タスク 2 (条件 1) の設計結果	30
4.6	タスク 2 (条件 2) の設計結果	30
4.7	タスク 3 (条件 1) の設計結果	31
4.8	タスク 3 (条件 2) の設計結果	31
4.9	タスク 4 (条件 1) の設計結果	32
4.10	タスク 4 (条件 2) の設計結果	32

第 1 章 はじめに

1.1 本研究の背景

拡張現実感とはコンピュータによって生成された情報を人間が知覚した実世界情報に重ね合わせて表示することで人間の様々な活動を支援する技術である。実世界上の物体に紐付けられた情報の表示や、現実世界にあたかも存在するような CG の表示が可能という点から、教育 [1] やエンターテインメント [2]、作業支援 [3] の分野等に応用されている。特に作業支援の分野では、手順書と実世界上の作業対象の対応付けを直感的に行えるという利点からメンテナンス [4] や組み立て作業 [6] における拡張現実感の有用性が示されている。また、Vuforia[7] や Mixed Reality Toolkit[8] などの様々なライブラリや開発キットが提供され、拡張現実感技術を用いたアプリケーションの開発が容易にできるようになってきている。

しかしながら、実際の作業現場での拡張現実感の利用は拡大していないという現状がある。この原因の 1 つとして、拡張現実感を専門としないシステム開発を担当するエンジニアなどが実際の作業内容に対して適切な作業支援システムを構築することが難しいことが考えられる。表示するコンテンツ自体やその見せ方、支援システムが持つ機能等が適切に作られていない場合、十分な支援効果が期待できない [6][9]。

この問題に対して、拡張現実感の研究者 [15][18] やフレームワークを提供している企業 [22][23] によって様々な拡張現実感システムの設計指針が提案されている。これらの設計指針では、コンテンツの表示方法、システムが持つべき機能、コンピュータによって生成された情報とのインタラクション方法やユーザインタフェース等に関する方針を示すとともに、具体的な支援情報の可視化手法も提示している。

しかし、これらの既存のガイドラインでは、幾何学的整合性などの拡張現実感環境を構築するために必要な要素技術であるトラッキングが利用可能なことを前提としており、部分的に拡張現実感環境が構築可能な場合は想定されていない。技術開発が進んだことで空間上に基準となるマーカを設置せずに、ユーザの動きをトラッキングできるようになったが、特徴点の少ない環境や暗所ではその効果を十分に発揮できないという技術的課題も残っており、実際の作業現場で常にご利用することは難しい。そのため、要素技術が部分的に利用可能な場合を想定し、適応的に拡張現

実感システムの設計が可能な指針が必要であると考えた．そこで，本研究では，拡張現実感環境を構築するために利用可能な技術レベルに作業支援方法を選択可能な設計指針の構築を目指す．

1.2 本研究の貢献

本研究の貢献は，従来の研究では困難だったトラッキング技術を利用できない環境下での有用な作業支援コンテンツを作成できる設計指針の開発である．具体的には，まず，支援対象の作業をいくつかの部分課題（サブタスク）へ分割する．その後，分割したサブタスクに対して，オブジェクトやユーザの三次元位置・姿勢のトラッキングを位置・姿勢の6自由度が取得できる場合，三次元位置のみが取得できる場合，三次元姿勢のみが取得できる場合，位置・姿勢ともに取得できない場合のように，場合分けが行われた表を用いて，実際に利用可能な技術レベルに応じた支援方法を選択する．

1.3 本論文の構成

以降，2章では，既存の拡張現実感を用いた作業支援アプリケーションやその設計指針について説明し，本研究で提案する設計指針の位置付けについて述べる．3章では，本研究で提案する設計指針について詳述する．4章では提案した設計指針の評価実験について述べ，その有用性について述べる．最後に5章で，本研究のまとめを述べる．

第 2 章 関連研究と本研究の位置付け

2.1 作業支援分野における拡張現実感

拡張現実感技術を用いたマニュアル作業の支援の研究は多くの研究者によって行われている。拡張現実感による作業支援の最大の特徴は、作業情報を実世界上の作業対象に関連付けて提示できる点である。従来のマニュアルを用いた作業では、マニュアル上の情報と実世界上の作業対象を対応付けるプロセスが必要となるが、拡張現実感を用いることで、作業情報と実世界上の作業対象の関係性を直感的に示すことが可能である。Henderson ら [4] は拡張現実感を用いて、機械のメンテナンス作業の支援を行った。図 2.1 では、メンテナンス対象に対して工具の CG モデル重畳することで、作業対象の位置を明らかにし、ユーザがどの工具をどのように使えばよいかを直感的に理解できるようになっている。Goto[10] らの研究では、ビデオインストラクションを用いてレゴブロックの組み立ての支援を行った。図 2.2 では事前に撮影されたビデオに画像処理を行い、実世界上の作業空間に重畳している。こちらの作業支援システムでは実際の作業対象であるブロック一つ一つのトラッキングは行っていないが、ユーザは重畳されたビデオインストラクションに重なるようにブロックを配置するだけで組み立てを行うことが可能である。



図 2.1 拡張現実感による CG モデルの提示 [4]

拡張現実感を用いた作業支援の他の特徴として、ヒトの目には見えない情報や遮蔽物によって隠されている情報の可視化がある。Ishii ら [11] の研究は、原子力発電所のメンテナンスの支援を行うもので、作業内容や作業対象等の情報に加え、温

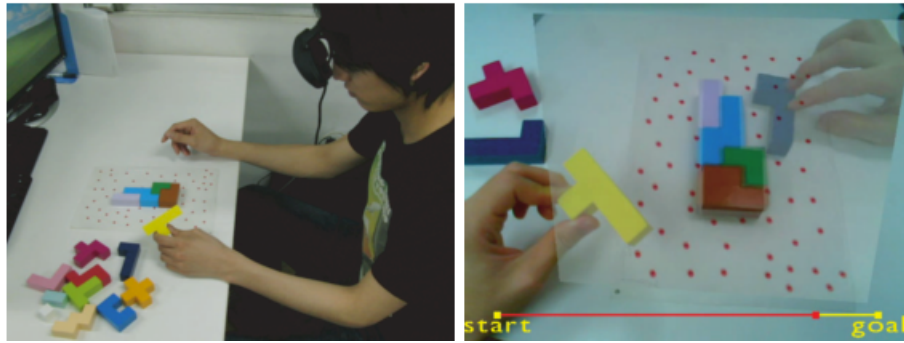


図 2.2 拡張現実感によるビデオインストラクションの提示 [10]

度や圧力等のセンサ情報を可視化することで、ユーザに危険な場所を提示する。

このように、様々な研究により拡張現実感の有効性が検証されている。しかし、これらの研究は拡張現実感を実現するための要素技術であるトラッキングが常に利用できるものと仮定したものがほとんどである。近年盛んに研究が行われている Visual-SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)[12] 技術によって、AR マーカを環境に配置せずに位置合わせを行えるようになったが、Visual-SLAM 技術を搭載したヘッドマウンテッドディスプレイは依然として高価であり、また、特徴点が少ない環境や十分な明かりを確保できない環境では正しく動作しないという技術的課題も残されており、実際の作業現場で使用できないこともある。同様に作業に用いるオブジェクトに対する情報の重畳表示のためのトラッキングについても多くの技術的課題がある。一般的に空間に固定されていないオブジェクトに対する重畳表示には、オブジェクトの位置姿勢を認識するためのマーカの設置 [5] や予めオブジェクトの 3D モデルを用意しておく必要がある [13]。マーカの設置については、AR ライブラリとして有名な Vuforia[7] のガイドラインによると、マーカの物理サイズは 1 辺 3-10cm が推奨されており、これより小さなオブジェクトに対してマーカを設置することは困難である。また、作業に用いるオブジェクトの 3D モデルを予め用意しておく方法も、コストが掛かるため常に利用できるものではない。

以上のことから、実際の作業現場で効果的に動作する作業支援コンテンツを考える時、ユーザの位置姿勢やオブジェクトの状態が常にトラッキングされている場合の可視化手法だけでなく、オブジェクトのトラッキングが不可能な場合や、ユーザ

トラッキング及びオブジェクトトラッキングが一切できない場合の可視化手法と併用して支援方法を考える必要がある．

2.2 拡張現実感を用いた作業支援システムの設計指針

先程挙げたようなマニュアル作業を支援する研究の多くは特定の設計ルールには従わず，研究者自身の知識やノウハウによってコンテンツの提示方法を決定している．研究開発から実社会への展開にフェーズを進めるためには，これまでの研究で得た知見を体系的に整理した設計指針が必要となる．拡張現実感を用いたアプリケーションや作業支援システムのための設計指針は，拡張現実感や心理学分野の研究者，フレームワークやライブラリを開発している企業等によって提供されている．設計指針の内容は，コンテンツ自体に関するものから，その表示方法，システムに組み込む機能に関するもの，コンピュータによって生成された情報とユーザとのインタラクションに関するものからエラー発生時のユーザへの支援に関するもの等多岐にわたる．これらの設計指針を大きく表示コンテンツに関するものとインタラクションに関するものの2つのカテゴリに分類し概観する．

2.2.1 表示コンテンツに関する設計指針

Neumann ら [15] は組み立て作業やメンテナンス作業において，作業に掛かった時間のうち約半分が情報の検索や理解などの認知的なプロセスに費やされていることに着目し，拡張現実感はこのプロセスに費やす時間や発生するエラーを改善できることを示した．さらに，拡張現実感を用いた支援システムを作る際のルールを定め，実際にルールに沿った航空機のメンテナンス作業を支援するアプリケーションを作成し，作業者の行動分析を行った．Kalkofen ら [16] は拡張現実感を用いた情報の効果的な可視化を行うために対処すべき問題を整理し，問題ごとにその解決手法とその実装方法についてまとめた．Furmanski ら [24] は拡張現実感を障害物によって隠された情報の可視化に用いる研究に焦点を当てた．一般的に隠れた情報を可視化するには，目標物の位置や目標物までの距離が正しく伝えるために手がかりを提供する必要がある．彼らは知覚心理学と認知科学の知見に基づいた奥行き手

がかりに関するガイドラインの作成と、ガイドラインの項目を満たす具体的な可視化手法の提案、及び定量的な評価を行った。Gimeno ら [17] は実世界上のオブジェクトを操作する際のインストラクションを実際の産業分野への適応を行った。また、プログラミング経験のないユーザであっても、オクルージョンを考慮した高品質の拡張現実感コンテンツを作成できるようなオーサリングツールの開発し評価を行った。Rolim ら [18] は実世界上のオブジェクトの操作に加え、ユーザの身体の動きを支持する際に発生する問題についても整理し、これらの問題を解決する可視化手法を示すガイドラインの開発を行った。

これまで挙げた研究はソフトウェアに関するコンテンツの提示方法について述べたものだが、ハードウェアに関する研究も存在する。Kruijff ら [9] は、拡張現実感技術によって提示された情報を知覚・解釈する時に発生する奥行き情報の曖昧さや可視性の問題に焦点をあてている。これらの問題をソフトウェア、ハードウェア、ユーザの認知機能、拡張現実感を体験する実際の環境に起因するものに分類し、それぞれについての改善方法と今後の研究の方向性について示した。また、拡張現実感のライブラリを提供している企業による設計指針としては、Microsoft 社の App quality criteria[19] がある。この設計指針では、自社製品である Microsoft Hololens を用いたアプリケーションを設計する際の品質基準を定めている。ユーザとコンテンツの距離は情報を表示する上で考慮しなければならない重要な要素の一つで、距離が不適切な場合、ユーザに不快感を与え疲労の原因となる。Microsoft Hololens の場合、ユーザから 2m の位置にコンテンツを設置することを推奨している。

2.2.2 インタラクションに関する設計指針

拡張現実感アプリケーションを用いた作業支援において、様々な目的でユーザと提示コンテンツとの間でインタラクションが発生する。拡張現実感コンテンツは現実世界上に提示されるため、周囲の環境の状態によってはその視認性が損なわれる場合がある。そのような場合においては、ユーザ自身でコンテンツの色やテクスチャ、明度等の外観を変更する必要がある。また、支援対象となる作業が複数の手順で構成される場合は、作業の進捗に合わせて情報を更新する必要がある。さら

に、必要以上の情報提示はユーザの作業効率を低下させてしまうため、一度に提示する情報は最小限に抑える必要がある。そこで情報を階層化し、必要に応じてより詳細な情報へアクセスできるようにしなければならない。

これらのインタラクションは通常の作業を中断して行われるため、極力避けるべきである。解決策として、進捗ごとの作業環境の 3D モデルを予め作成しておき、作業中に取得した作業環境の RGBD 情報とマッチングを行うことで、進捗状況を推定し自動で拡張現実感コンテンツを更新する研究も行われている [20]。しかし、2.1 節で述べたように、実際の作業環境は常に拡張現実感を実現するための要素技術が全て使えるとは限らないため、支援システムの設計時にはユーザとコンテンツとの間で発生するインタラクションについても考慮しなければならない。

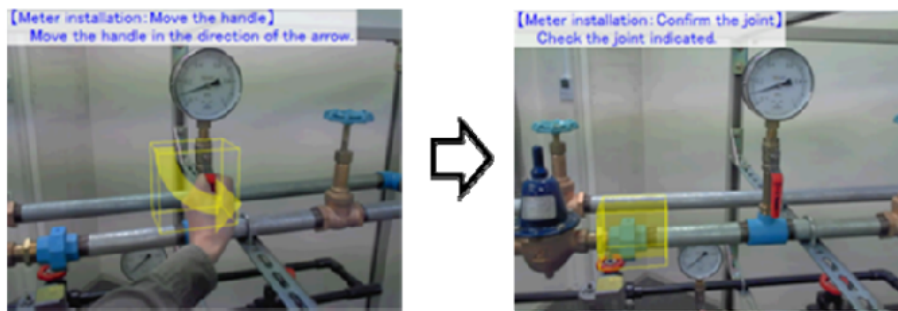


図 2.3 作業完了に伴うインストラクションの自動更新 [20]

iOS 向けの AR アプリケーションフレームワークである ARKit を提供している Apple 社は iOS デバイスを介したコンテンツとのインタラクションについてのガイドラインを公開している [22]。拡張現実感アプリケーションは一般的な Web アプリケーションと異なり、コンテンツの位置について 3 自由度、姿勢について 3 自由度の計 6 自由度の操作が可能である。しかし、実際に操作するデバイスは二次元平面のため一度に全ての情報を操作することは困難である。そこで、図 2.4 のように一度に操作できる位置情報を 2 自由度、姿勢情報を 1 自由度と制限することで直感的なインタラクションを設計している。他にもエラーが発生したときは、エラー内容ではなくどうすれば解決できるかを表示するなどのエラー発生時のユーザ体験についても言及している。同様に Hololens を提供している Microsoft 社も Hololens を介したコンテンツとのインタラクションについてのガイドラインを公開している

[23]．作業支援を行う際に，全ての拡張現実感コンテンツに対してインタラクション機能を搭載する必要は無いが，ユーザがあるコンテンツを見た時，それがインタラクション可能であるかどうかは識別可能でなければならない．インタラクション機能を有しているオブジェクトは視覚や聴覚情報の手がかりをユーザに与え，インタラクション可能であることを認識させるような設計が必要であると定めた．



図 2.4 仮想オブジェクトの移動と回転の制限 [22]

2.3 本研究の位置付け

拡張現実感を用いた作業支援システムはマニュアル作業を遂行する上で有効である．そして，作業支援コンテンツの作成を支援する設計指針も多くの研究者や企業によって公開されている．しかし，実際の作業現場での拡張現実感の利用は十分に普及していない．その原因の一つは，これらの設計指針が研究者に向けたものであるか，拡張現実感の実現のための要素技術を使える環境を想定したものだからである．2.1 節で述べたとおり，実際の作業現場では常にトラッキング技術を利用できるとは限らない．そこで本研究では，従来のトラッキングが利用できる環境に加え，これらの要素技術が使えない環境も想定したガイドラインの構築を目指す．

また，マニュアル作業を支援する際に，同じ可視化手法であっても，作業内容によってコンテンツの持つ役割が異なることも，作業支援アプリケーションの設計を困難にしている．例を挙げると，Neumann ら [15] が作成した拡張現実感アプリケーションでは主に，ラベルと 3D モデルを用いてメンテナンス作業の支援を行っているが，作業が進むに連れて，ユーザに作業対象を注視させるもの，作業内容を教示するもの，作業完了を知らせるものと役割が変化している．作業内容によっ

て、どのメディアを用いてどのように提示するかは設計者のノウハウに依存している。よって本研究では、作業内容ごとに必要な情報とその提示方法を整理することで、拡張現実感の初心者であっても支援対象に対して適切な提示手法を選択できるような設計指針を提案する。

第 3 章 作業内容と技術レベルに応じた支援システムの設計指針

本章では，提案するヘッドマウンテッドディスプレイ型拡張現実感を用いた作業支援システムの設計指針について，その概要と設計指針を構成する各要素及び実際に使用する際の手順を詳述する．

3.1 設計指針の概要

本設計指針は，前章で挙げた以下の 2 つの課題を解決するために開発されたものである．

- 具体的な作業内容に対してどのような支援が必要かは設計者の知識やノウハウに依存しており，初心者による設計が困難である．
- 拡張現実感を実現するための要素技術が使えない作業環境では利用できない．

まず一つ目の課題だが，一般的にマニュアル作業はいくつかの細かなサブタスクによって構成されている．そして，各サブタスクによって実行に必要な情報や情報提示に用いる可視化手法の役割も異なる．この複雑さが初心者による作業支援システムの設計を困難にしている．そこで，本設計指針では設計対象を明確にするためのサブタスク表を提供する．サブタスク表にはメンテナンスや組立作業等の実際の作業で発生するサブタスクとそのサブタスクの実行に必要な情報を対応付けてまとめたものである．設計者はサブタスク表を参照しながら，支援対象であるマニュアル作業をサブタスクに分解し，それぞれのサブタスクに対して必要な支援情報を決定する．

二つ目の課題は，従来のガイドラインが実際の作業現場での利用を目的としたものではなく，拡張現実感の研究者や開発者に向けたものであることが原因である．そのため，トラッキング技術が利用できないような環境は考慮されていない．そこで本設計指針では，トラッキング技術が完全に利用可能な場合に加え，トラッキング技術が部分的に利用可能な場合や一切利用できない場合も想定した，ユーザの三

次元位置姿勢を追跡するユーザトラッキングと作業に使用するオブジェクトの三次元位置姿勢を追跡するオブジェクトトラッキングの利用可能度合いごとに情報の可視化手法を分類した技術別可視化手法選択表を提供する．具体的には，ユーザとオブジェクトのトラッキングそれぞれに対して，三次元位置姿勢の両方のトラッキングが可能，三次元位置のみトラッキング可能，三次元姿勢のみトラッキング可能，位置姿勢ともにトラッキング不可能の4パターンで可視化手法を分類しまとめたもので，図3.1のようなものである．表の各セルにはそれぞれ，行と列のトラッキング条件で利用可能な可視化手法がまとめられている．設計者は支援を行うサブタスクの内容と作業環境を確認した上で，適した支援情報の見せ方を技術別可視化手法選択表から選ぶことが出来る．この選択表はそれぞれのサブタスクごとに用意されている．

		オブジェクトトラッキング			
		位置・姿勢	姿勢	位置	無し
ユーザトラッキング	位置・姿勢				
	姿勢				
	位置				
	無し				

図 3.1 技術別可視化手法選択表

3.2 作業のサブタスクへの細分化

一般的なマニュアル作業は複数の細かな作業（サブタスク）で構成されている．作業対象の状態を S_i ，特に作業開始時の状態を S_i ，作業の目標状態を S_g とした時，サブタスク A_i は図 3.2 のように表現できる．

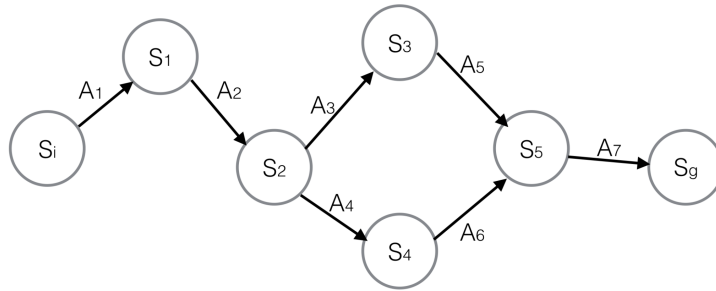


図 3.2 マニュアル作業の流れ

作業開始時に A_1 というサブタスクを行うことで，作業対象の状態は S_1 に変化する．作業者はサブタスクを順番に実行していき目標状態 S_g を目指す． S_i から S_g までのサブタスクは常に一意に定まるのではなく，作業内容によっては作業状態 S_2 のように複数の手順が考えられる．具体的な例を挙げると，移動が伴う組み立て作業の場合，組み立て作業を行ってから移動する方法と，移動した先で組み立て作業を行う方法の 2 パターンが考えられる．

サブタスク A_i の内容はそれぞれ異なるため，異なる支援方法が必要となってくる．従来の設計指針では，サブタスクに対する支援情報の見せ方やコンテンツの設計方法についてはまとめられていたが，実際に作業支援を考えた時，いつそのサブタスクが発生するかについてはほとんど言及されていない．

そこで，本設計指針では作業が与えられた時，それをサブタスクに分割するためのツールとして表 3.1 を提供する．

表 3.1 サブタスク一覧表

サブタスク	提示すべき支援内容
1. オブジェクトの配置	設置位置・姿勢（方法）
2. オブジェクトの特定（選択）	オブジェクトの色・形，場所
3. 作業空間の移動（観察）	注視する場所，作業者の位置
4. オブジェクトのサイズ調整	必要となる物理量（長さ・大きさ・重さ等）
5. オブジェクトの変形	変形後の形，変形方法

表 3.1 は拡張現実感を用いた組み立て作業の支援研究を分析し，そこで発生するサブタスクの分析し一般化したものである．提示すべき支援内容とは，それぞれのサブタスクを実行する上でユーザに対して提供すべき情報をまとめたものです．この時，作業者をユーザ，机や床，壁などの実際に作業を行う場所を作業空間，サブタスクを実行する際に必要となる部品をオブジェクトと呼ぶ．また，「オブジェクト A をオブジェクト B に対して配置する」のように，1 つのサブタスクで 2 種類のオブジェクトが登場する場合は，作業者が利き手で持ち動かすようなオブジェクトをパーツオブジェクト，パーツオブジェクトを設置する対象をベースオブジェクトと呼ぶ．

それぞれのサブタスクの説明と発生するタイミングは以下の通りである．

1. オブジェクトの配置

パーツオブジェクトを作業空間またはベースオブジェクトの決められた位置に適切な向きで配置する行為で，2つのオブジェクトを組み合わせる際に発生する．

2. オブジェクトの特定（選択）

次のサブタスクで必要となるオブジェクトを見つけ出す行為で，新たなオブジェクトが登場する際に発生する．

3. 作業空間の移動（観察）

現在の作業空間から別の作業空間に移動する行為で，作業空間が変化するタイミングで発生する．

4. オブジェクトのサイズ調整

次のサブタスクで必要となるオブジェクトを必要量用意する行為で，サブタスクを実行する際に物理量（長さ，大きさ，重さ）を指定された際に発生する

5. オブジェクトの変形

オブジェクトに対して，折る・曲げる・結ぶ・切る等の操作を加える行為で，弾性体に対して力を加える際に発生する．

設計者は従来の紙のマニュアルと表 3.1 を参照しながら，初期状態 S_i から目標状態 S_g の間で発生するサブタスクを記述し，それぞれのサブタスクでユーザに対して提供する支援情報をまとめる．ブロックの組み立て作業に対して，本設計指針を適用した場合，図 3.3，表 3.2 のように作業を分解することが出来る．

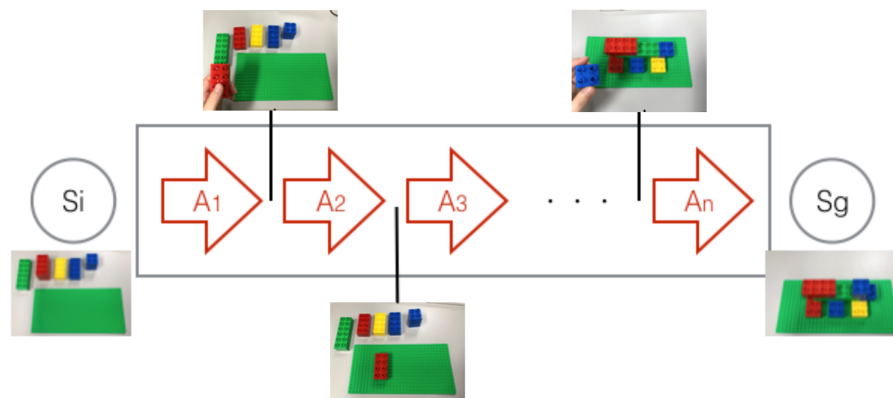


図 3.3 作業のサブタスクへの分解

表 3.2 作業のサブタスクへの分解

サブタスク	提示すべき支援内容
A_1 (赤色の 2×4 の長方形の) ブロックの特定	ブロックの場所
A_2 (A_1 で特定した) ブロックの土台への配置	ブロックの配置位置・姿勢
$\vdots$	$\vdots$
A_{n-1} (赤色の 2×2 の正方形の) ブロックの特定	ブロックの場所
A_n (A_{n-1} で特定した) ブロックの土台への配置	ブロックの配置位置・姿勢

3.3 技術レベルに基づいた提示手法の決定

3.3.1 拡張現実感コンテンツとトラッキング技術の関係

図 3.4 は拡張現実感を用いた作業支援アプリケーションの例である．左は戦車のメンテナンスの支援を，右はエンジンの組み立て作業の支援を目的としたものである．これらの作業支援コンテンツは実現するために必要なトラッキング技術が異なる．

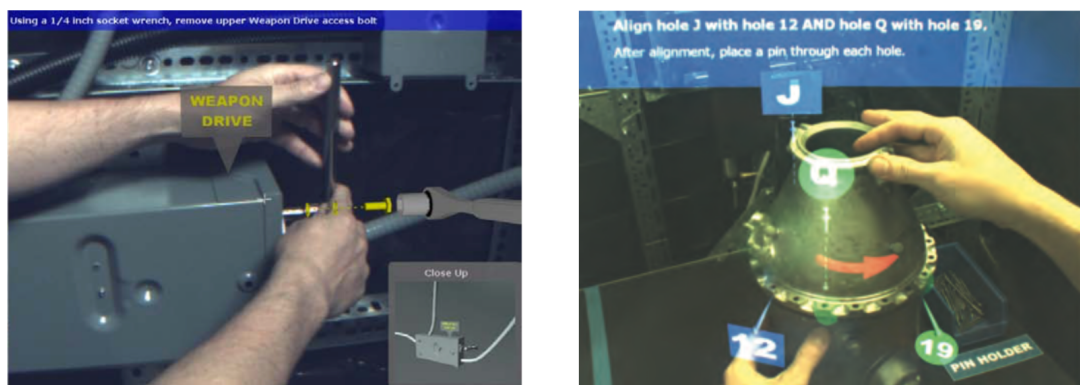


図 3.4 拡張現実感を用いた作業支援システム (左: [4] , 右: [5])

左の戦車のメンテナンスの例では，レンチを用いて Weapon Drive のボルトを取り除くというサブタスクに対して，Weapon Drive の位置を示すラベルと，実際に行う作業の 3D アニメーションを用いて支援を行っている．これらの拡張現実感コンテンツは作業空間に固定された Weapon Drive に対して重畳されている．固定された物体に対して常に同じ位置に情報を重畳するためにユーザの位置姿勢を常にトラッキングする必要がある．しかし，固定された物体の位置は常に一定のため，オブジェクトトラッキングは必ずしも必要ではない．つまり，このコンテンツはユーザトラッキング: 位置・姿勢，オブジェクトトラッキング: 無しで実現可能である．

右のエンジンの組み立ての例では，2 つのエンジンパーツをピン穴が重なるように設置するというサブタスクに対して，ピン穴の位置を示すラベルと，どのくらいオブジェクトを回転される必要があるかを示す 3DCG の矢印を用いて支援を行っている．これらの拡張現実感コンテンツは先程と異なり，空間に固定されていない

オブジェクトに対して重畳されている．つまり，ユーザの位置姿勢のトラッキングに加え，オブジェクトの位置姿勢についてもトラッキングを行う必要がある．つまり，このコンテンツはユーザトラッキング：位置・姿勢，オブジェクトトラッキング：位置・姿勢の作業環境でのみ実現可能である．

既存の設計指針は上記のような拡張現実感コンテンツが実現可能な環境のみを想定しているが，本研究では図 3.5 のような提示手法も取り扱う．図 3.5 はブロックを土台に対して設置するサブタスクに対して，ヘッドマウンテッドディスプレイを装着したユーザの視界の右上部にビデオインストラクションを表示することで支援を行っている．先程の例とは異なり，ビデオインストラクションはヘッドマウンテッドディスプレイの座標系に対して固定表示されている．従って，このコンテンツはユーザトラッキングとオブジェクトトラッキングがともに利用不可であっても利用可能である．

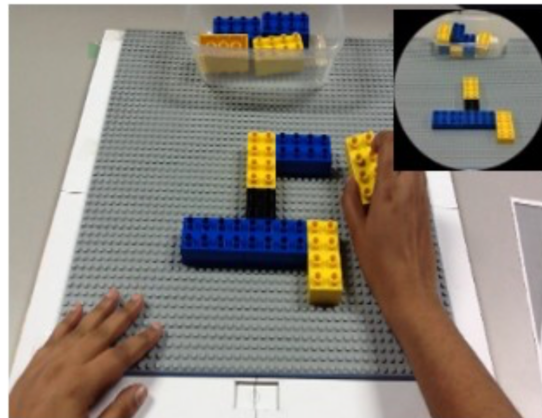


図 3.5 Picture in Picture を用いた組み立て作業の支援 [25]

3.3.2 技術別可視化手法選択表

図 3.1 に示した技術別可視化手法選択表は表 3.1 にまとめたサブタスク一つ一つに対して用意されている．これらの選択表を以下にまとめる．

オブジェクトの配置

オブジェクトの配置のみ，可視化手法選択表が 4 種類存在する．オブジェクトの配置のみそのサブタスク内で 2 種類のオブジェクトが登場する．利き手に持って動かすオブジェクトをパーツオブジェクトと呼び，パーツオブジェクトをくっつける対象をベースオブジェクトと呼ぶ．本設計指針ではユーザトラッキングとオブジェクトトラッキングの利用できる度合いに応じて，可視化手法が決定されるが，オブジェクトが 2 種類登場する場合は現在の選択表では表現が難しい．その対応策として，ベースオブジェクトが固定されているかされていないかの 2 種類の選択表を用意した．また，配置作業によっては，作業中道具を用いる場合もある．その場合オブジェクトの目標状態だけでなくその道具の使い方についても情報を提示する必要がある．この場合は別の可視化手法が必要となるため，設置位置と姿勢情報のみを提示する選択表と，それに加えて設置方法も提示する選択表を分けて用意した．

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザトラッキング	6DoF	・オブジェクトの目標状態の3DCGを設置対象（ベースオブジェクト）に重畳表示[1]			
	3D Pos	・オブジェクトと設置対象（ベースオブジェクト）の目標状態を示す画像または映像を視野内に表示[3]（※注）			
	3D Ori	・オブジェクトと設置対象（ベースオブジェクト）の目標状態を示す3DCGを視野内に表示[2]（※注）			
	N/A	・オブジェクトと設置対象（ベースオブジェクト）の目標状態を示す画像または映像を視野内に表示[3]			

図 3.6 設置位置と姿勢（ベースオブジェクトが作業空間に固定）

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザ トラッ キング	6DoF	・オブジェクトの目標状態を示す3Dモデルを設置対象（ベースオブジェクト）に重畳表示 ^[1]	・オブジェクトと設置対象（ベースオブジェクト）の目標状態を示す3Dモデルまたは画像を視野内に表示 ^[2]		
	3D Pos	・オブジェクトと設置対象（ベースオブジェクト）の目標状態を示す画像または映像を視野内に表示 ^[3]			
	3D Ori				
	N/A				

図 3.7 設置位置と姿勢（ベースオブジェクトが作業空間に非固定）

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザ トラッ キング	6DoF	・設置対象（ベースオブジェクト）とオブジェクトの対応する箇所を重畳表示[4] ・オブジェクトの現在の状態から目標状態までの動作をアニメーションで重畳表示[5] ・オブジェクトへの操作方法を矢印などを用いて重畳表示[6]	・設置対象（ベースオブジェクト）に作業の3DCGアニメーションや動画を重畳表示[1] ・設置対象（ベースオブジェクト）の付近に作業の3DCGアニメーション、動画、分解組立図などを視野内に表示[2]（※注意）		
	3D Pos	・視野内に作業のCGアニメーション、作業動画、分解組立図などを重畳表示[3]。（※注）			
	3D Ori	・視野内に作業のCGアニメーション、動画、分解組立図を表示[3]			
	N/A				

図 3.8 設置位置と姿勢及び設置方法（ベースオブジェクトが作業空間に固定）

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザ トラッ キング	6DoF	・ 設置対象（ベースオブジェクト）とオブジェクトの対応する箇所を重畳表示[4] ・ オブジェクトの現在の状態から目標状態までの動きのアニメーションを重畳表示[5] ・ オブジェクトの動かし方を示す矢印などを重畳表示[6] ・ 設置対象（ベースオブジェクト）に作業の3DCGアニメーション、作業動画、分解組立図などを重畳表示[1]	・ オブジェクトの目標状態を示す3DCGアニメーション、作業動画、分解組立図を視野内に表示[2]（※注）		
	3D Pos	・ 視野内に作業の3DCGアニメーション、動画、分解組立図などを表示[3]			
	3D Ori				
	N/A				

図 3.9 設置位置と姿勢及び設置方法（ベースオブジェクトが作業空間に非固定）

オブジェクトの特定

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザトラッキング	6DoF	・オブジェクトの場所を示す矢印の重量表示、対象となるオブジェクトをハイライト[7]		・オブジェクトの画像、3Dモデル、名前を視野内に表示[9]	
	3D Pos	・作業空間を表すマップ（3DCG、俯瞰画像など）上にオブジェクトの位置を視野内に表示[8]（※注）			
	3D Ori	・視野内に部品がある方向を示す矢印を表示（ユーザが椅子に座っているなどユーザ位置が固定される場合）[20]			
	N/A	・作業空間を表すマップ（3DCG、俯瞰画像など）上にオブジェクトの位置を視野内に表示[8]			

図 3.10 オブジェクトの特定

オブジェクトの観察

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザトラッキング	6DoF	・ 作業対象の適切な観察対象位置、方向を示す矢印やアバターを重量表示 [10] ・ 作業対象を適切に観察できる位置、方向の範囲を重量表示 [11]			
	3D Pos	・ 適切な観察視点から視認した際の一人称画像を視野内に表示 [12] ・ 現在のユーザ位置、観察視点位置、観察対象位置を示す作業空間の俯瞰画像、3DCGなどを視野内に表示 [13]（※注）			
	3D Ori	・ 適切な観察位置から視認した際の一人称画像を視野内に表示 [12] ・ 観察視点位置と観察対象位置を示す作業空間の俯瞰画像、3DCGなどを視野内に表示 [13]			
	N/A				

図 3.11 オブジェクトの移動・観察

オブジェクトのサイズ調整

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザトラッキング	6DoF	・必要なサイズをオブジェクトに重畳表示 ^[17]	・定規などサイズ調節のための基準となる情報を重畳表示 ^[18]		
	3D Pos	・ユーザから一定の距離に定規などのサイズ調節の基準となる情報を表示 ^[21]			
	3D Ori				
	N/A				

図 3.12 オブジェクトのサイズ調整

オブジェクトの変形

		オブジェクトトラッキング			
		6DoF	3D Pos	3D Ori	N/A
ユーザトラッキング	6DoF	・変形前の状態から変形後の状態への変化を3DCGアニメーションで重畳表示[19]	・変形方法を示す写真、動画、3DCGアニメーションを作業空間に重畳表示[2]		
	3D Pos	・現在のオブジェクトの状態と変形後の状態を3DCGアニメーションで視野内に表示[15]	・変形前の状態から変形後の状態への写真、動画、3DCGアニメーションを視野内に表示[3]		
	3D Ori				
	N/A				

図 3.13 オブジェクトの変形

本設計指針は wordpress により構築されており、選択表内に書かれている可視化手法の末尾にはそれぞれリンクが付いてる、これらをクリックすることで実際に提示した時のユーザの見え方を確認することが出来る。

第 4 章 設計指針の堅牢性に対する評価実験

本章では、本設計指針がヘッドマウンテッドディスプレイ型拡張現実感を用いた作業支援システムの設計に対して実用的なものであるかの評価実験について述べる。

4.1 目的

設計指針はシステムの開発者が設計作業を行う際に参照するもので、支援したい作業に対して有用な支援システムを構築できるようにするためのものである。また、作業支援システムの設計の初心者であっても適切なコンテンツ設計を行えることを目的としている。そのため、設計者のバックグラウンドや知識によって設計指針の解釈が変化しない堅牢性を確保する必要がある。評価実験では、複数の被験者に本設計指針を参照し作業支援システムの設計を行ってもらい、設計者間で仕様が一致するかどうかの確認を行う。

4.2 実験方法

被験者には、幾つかの作業に用いる紙のマニュアルとその作業を行う上で利用できるトラッキング技術等の作業環境の情報を提示し、本設計指針を参照しながら、以下の条件を満たす作業支援コンテンツの設計を依頼した。

- 作業者はヘッドマウンテッドディスプレイを装着した状態で作業を行う。
- 作業支援コンテンツは実際の作業環境で利用可能な可視化手法のみで構築される。

実験は図 4.1 の流れに従う。まず最初に、支援対象となる作業内容が記されたマニュアルとその作業環境で利用できるトラッキング技術に関する情報が与えられる。次に、与えられた情報と本設計指針のサブタスク一覧表を参照しながら、初期状態 S_i から目標状態 S_g までに発生するサブタスクを列挙する。そして、それぞれのサブタスクの実行のためにユーザに提供する情報を決定する。最後に、技術別可

視化手法選択表を参照しながら，各サブタスクを支援する拡張現実感コンテンツの仕様を決定する．

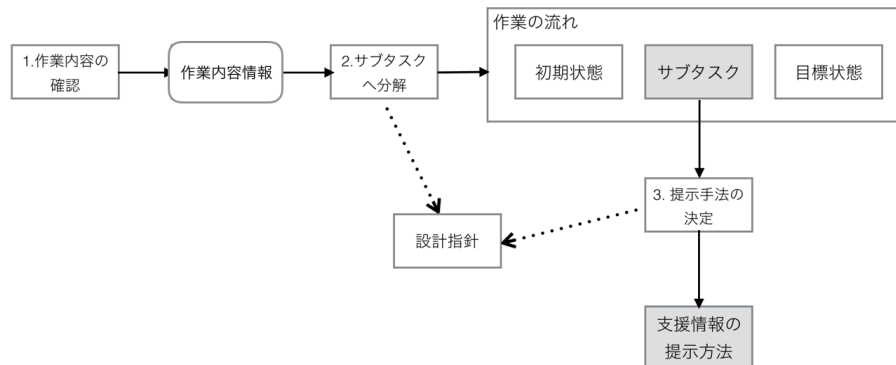


図 4.1 作業支援コンテンツの設計の流れ

4.2.1 被験者

実験の被験者は奈良先端科学技術大学院大学に在籍する 22 歳から 28 歳（平均 24 歳）の学生 15 名であり，内 12 名が男性，3 名が女性である．被験者はいずれも Microsoft Hololens, Oculus, Moverio BT200 等の用いたヘッドマウンテッドディスプレイ型の拡張現実感コンテンツを体験したことがあり，内 5 名はアプリ開発の経験を有している．詳細な開発年数は図 4.2 に示す．

4.2.2 作業内容

被験者には，以下の 4 つの作業が与えられる

- タスク 1 ブロックの土台に対する配置作業
- タスク 2 ブロック同士の接続作業
- タスク 3 柱に対するロープの結びつけ作業
- タスク 4 ロープ同士の接続作業

また，各作業において表 4.1 に示すような 2 種類のトラッキング条件を用意した．

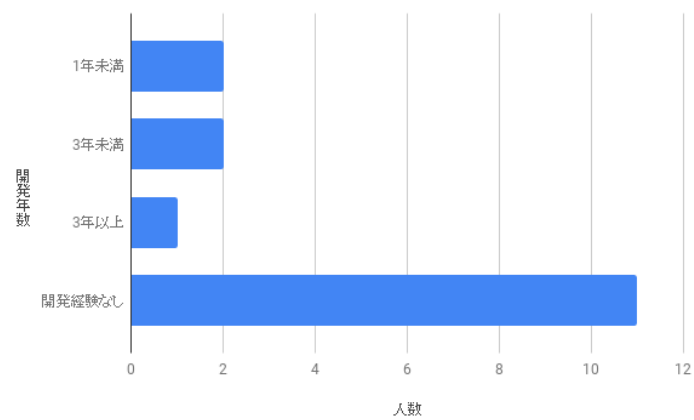


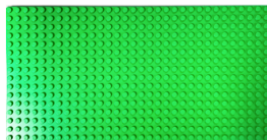
図 4.2 拡張現実感アプリケーションの開発経験について

表 4.1 各作業におけるトラッキングの条件

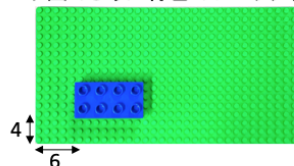
作業	条件 1	条件 2
タスク 1	マーカトラッキング (土台に対してマーカの設置が可能)	トラッキング技術の使用不可
タスク 2	マーカトラッキング (ブロックに対してマーカの設置が可能)	トラッキング技術の使用不可
タスク 3	SLAM 技術によるトラッキングが可能	トラッキング技術の使用不可
タスク 4	SLAM 技術によるトラッキングが可能	トラッキング技術の使用不可

各作業で用いられたマニュアルを図 4.3 から図 4.6 に示す。

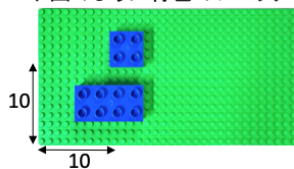
1. 土台を準備



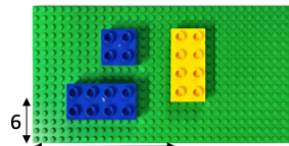
2. 下図のように青色のブロック(2x4)を設置



3. 下図のように青色のブロック(2x2)を設置



4. 下図のように黄色のブロック(2x4)を設置



5. 下図のように赤色のブロック(2x4)を設置

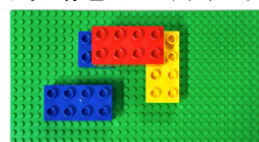
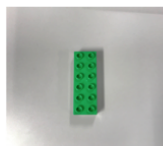
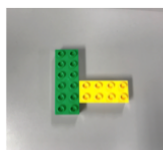


図 4.3 タスク 1 のマニュアル

1. 緑色のブロック(2x6)を準備



2. 下図のように黄色のブロック(2x4)を配置



3. 下図のように青色のブロック(2x2)を配置



4. 下図のように赤色のブロック(2x4)を設置



5. 下図のように青色のブロック(2x2)を設置



図 4.4 タスク 2 のマニュアル

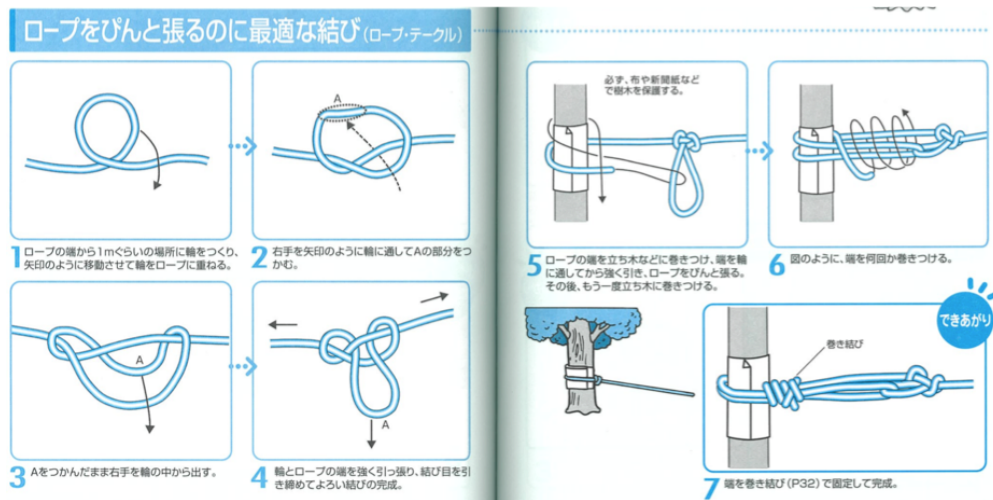


図 4.5 タスク 3 のマニュアル

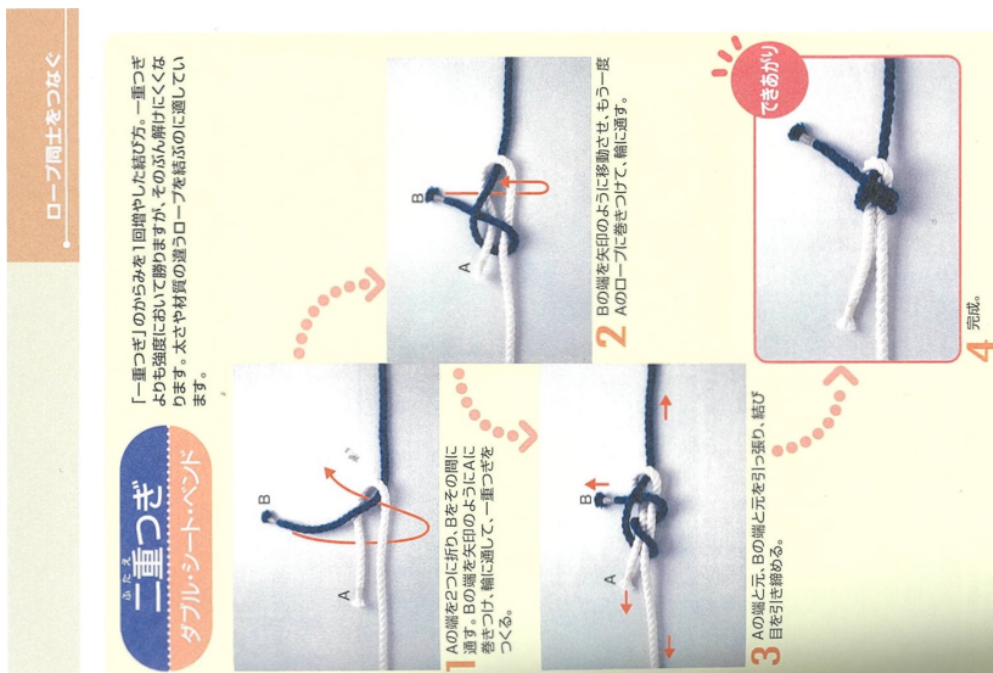


図 4.6 タスク 4 のマニュアル

4.2.3 実験結果

実験結果を表 4.2 に示す．それぞれ，被験者が行った作業，サブタスクへの分割結果，支援情報，可視化手法の被験者間の一致度を表している．各作業名の横の数字はそのタスクを行った人数を示す．条件 1,2 は表 4.1 で示した条件を意味する．サブタスクへの分割作業には，利用できるトラッキング技術は影響しないため条件 1,2 の結果を一つにまとめている．

表 4.2 堅牢性評価実験の結果 [%]

作業	サブタスク 分割	支援情報		可視化手法	
		条件 1	条件 2	条件 1	条件 2
タスク1(14)	100	100	100	66.7	100
タスク2(14)	100	100	100	83.3	100
タスク3(14)	50	100	85.7	83.3	71.4
タスク4(14)	57.1	100	100	100	85.7

また，各タスクの各条件について，最も一致度の高かった設計結果を表 4.3 から表 4.10 に示す．

ブロックの土台に対する配置作業

- ・条件 1 (ユーザトラッキング：位置姿勢，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.3 タスク 1 (条件 1) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す 3DCG を土台に対して重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す 3DCG を土台に対して重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す 3DCG を土台に対して重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す 3DCG を土台に対して重畳

- ・条件 2 (ユーザトラッキング：無し，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.4 タスク 1 (条件 2) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像を視野内に表示

ブロック同士の接続作業

- ・条件 1(ユーザトラッキング：位置姿勢，オブジェクトトラッキング：位置姿勢)

表 4.5 タスク 2 (条件 1) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ブロックの選択	ブロックの特徴，場所	ブロックの場所を示す矢印を表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す CG を設置対象に重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴，場所	ブロックの場所を示す矢印を表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す CG を設置対象に重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴，場所	ブロックの場所を示す矢印を表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す CG を設置対象に重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴，場所	ブロックの場所を示す矢印を表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す CG を設置対象に重畳
2. ブロックの選択	ブロックの特徴，場所	ブロックの場所を示す矢印を表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す CG を設置対象に重畳

- ・条件 2 (ユーザトラッキング：無し，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.6 タスク 2 (条件 2) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像 (映像) を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像 (映像) を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像 (映像) を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像 (映像) を視野内に表示
2. ブロックの選択	ブロックの特徴	ブロックの画像を視野内に表示
1. ブロックの配置	ブロックの設置位置姿勢	ブロックの目標状態を示す画像 (映像) を視野内に表示

柱に対するロープの結びつけ作業

- ・条件 1 (ユーザトラッキング：位置姿勢，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.7 タスク 3 (条件 1) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ロープの選択	ロープの特徴	ロープの画像を視野内に表示
4. ロープのサイズ調整	必要な長さ	長さを表すオブジェクトを作業空間上に表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を作業空間に表示
3. 作業空間の移動	柱の場所	適切な位置を示す矢印を作業空間に重畳表示
1. ロープの設置	設置位置，方法	柱に作業の 3DCG を重畳
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を作業空間に表示

- ・条件 2 (ユーザトラッキング：無し，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.8 タスク 3 (条件 2) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ロープの選択	ロープの特徴	ロープの画像を視野内に表示
4. ロープのサイズ調整	必要な長さ	長さの基準となる情報を表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を視野内に表示
3. 作業空間の移動	柱の場所	適切な位置から観察した時の一人称映像を表示
1. ロープの設置	設置位置，方法	設置後の状態を示す映像を視野内に表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を視野内に表示

ロープ同士の接続作業

- ・条件 1 (ユーザトラッキング：位置姿勢，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.9 タスク 4 (条件 1) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ロープの選択	ロープの特徴	ロープの画像を視野内に表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を作業空間に表示
2. ロープの選択	ロープの特徴	ロープの画像を視野内に表示
1. ロープの設置	設置位置，方法	作業アニメーションを作業空間に表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を作業空間に表示

- ・条件 2 (ユーザトラッキング：無し，オブジェクトトラッキング：無し)

表 4.10 タスク 4 (条件 2) の設計結果

サブタスク	支援情報	可視化手法
2. ロープの選択	ロープの特徴	ロープの画像を視野内に表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を視野内に表示
2. ロープの選択	ロープの特徴	ロープの画像を視野内に表示
1. ロープの設置	設置位置，方法	作業動画を視野内に表示
5. ロープの変形	変形後の形と変形方法	変形方法を示す動画や 3DCG を視野内に表示

4.2.4 考察

まずブロックの組み立て作業であるタスク 1，タスク 2 について考察する．これらのタスクは特定と配置の 2 種類のサブタスクのみで構成されるため，サブタスクへの分割については被験者全員の結果が一致した．またサブタスクが求まれば，その実行に必要な情報についても定まるため支援情報についても被験者間で全て一致した．しかし可視化手法については条件 1 の場合，一致度が 66.7[%] という結果になった．設計結果のばらつきはブロックの配置で発生しており，ヒアリングの結果，支援対象の作業が簡単な作業であったため，土台に拡張現実感コンテンツを重ねせずに視野内に設置後の状態を示す映像を表示するだけで十分と判断したことがわかった．内容が単純且つ容易な作業に対しては拡張現実感技術を用いない支援方法の方が効果的な場合がある．

次にロープの結びつけ作業について考察を行う．これらは，タスク 3 及びタスク 4 のサブタスク分割の被験者間の一致度は 50.0[%] と 57.1[%] となった．考えられる原因として，発生するサブタスクの種類数の多さが挙げられる．タスク 3 では 3.1 に記述されている 5 種類，全てのサブタスクが発生する作業である．また，考えられる別の要因として，設計指針で用いられている用語が抽象的であることが挙げられる．本設計指針はブロックの組み立てから，実際の工業製品の組み立て，ロープなどの非剛体を用いる組み立て作業など幅広い組み立て作業の支援を目的としている．そのため，サブタスク表ではオブジェクトと記述されている部分を設計者が実際の作業内容を理解して，そこで使用する部品や用具の名前に置き換えてサブタスクを考える必要がある．しかし，検証実験ではオブジェクトをロープに置き換えずに設計方法を考えてしまい，重要なサブタスクをうまく抜き出せない場面が多く見られた．本設計指針は wordpress を用いて構築されている．そこで，設計開始前に使用する部品一覧を入力する工程を作り，設計指針内部でオブジェクトを実際のサブタスクで利用する製品名に置き換える機能を追加することでこの問題は緩和され则认为している．可視化手法についても同様で，発生するサブタスクが多く，何度も可視化手法選択表を行き来するため，その設計途中でミスが発生することを確認した．あらゆる作業に対して対応できるように網羅性を高めるとその分表示される情報を増えていき，情報のアクセス性が損なわれてしまう．本実験は堅牢性評価を目標にしたものであるが，今後は情報のアクセス性等のユーザビリティ評価も行

う必要があると考えている。

第 5 章 まとめ

本研究では、実際の作業現場におけるヘッドマウンテッドディスプレイ型拡張現実感を用いた有用な作業支援コンテンツの設計を目的とした設計指針の開発及び有用性について評価を行った。数多くの研究者によって、拡張現実感とは作業支援分野で有効な技術であることが証明されてきたが、有用な作業支援コンテンツを作成するためには専門的な知識が必要となるため、実際の作業現場での拡張現実感の普及が進んでいないという問題があった。この問題を解決するために研究者や企業は多くのオーサリングツールやライブラリ、ガイドラインの開発を行ってきたが、未だに非専門家による有用な作業支援コンテンツの作成は困難であった。そこで本研究では、今まで触れられていなかった、拡張現実感技術の部分的な利用、もしくはトラッキング技術を利用しない可視化手法についても調査を行い、実際の作業内容と対応付けて分類することにより、非専門家でも従来の研究では困難だったトラッキング技術を利用できない環境下での有用な作業支援コンテンツを作成できる設計指針を開発した。今回の堅牢性の評価により、少ない種類数のサブタスクで構成されるような作業の支援コンテンツの設計には本設計指針が有用であることを確認した。しかし、サブタスクの種類数が増加していくに連れ、ユーザの頭の中で設計指針に記述されている項目を実際の作業内容に置き換える心的負担も増加してしまうため、Web アプリケーション側でこれらの置き換え作業を行うような仕組みが今後は必要となってくる。また、実際の作業環境では、被験者間での設計仕様の一致については確認できたが、設計された作業支援コンテンツが実際の作業現場で有効に働くかどうかの検証実験は未だ行っていないため、今後は今回の被験者実験で得られた仕様書通りに作業支援アプリケーションを開発し、そのアプリケーションを用いて実際に作業を行うことで有用性評価を行う。

謝辞

本研究に際して、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は多大なる御指導，ご鞭撻を賜りました。加藤博一教授には本研究の構想段階から検証実験，そして修士論文を書き上げるに至るまでに多くの助言をいただきました。未熟な私が一定の結果を残せたのは，加藤博一教授の御指導によるものです。心より御礼申し上げます。

学内発表の場において，本研究について丁寧な御教示を頂き，本論文の審査を引き受けてくださったサイバネティクス・リアリティ工学研究室の清川清教授に深く御礼申し上げます。

研究室内発表の場での数々の助言及び，研究以外のあらゆる面で支援していただきました Alexander Plopski 助教授に深く感謝致します。

研究の進め方，実験の行い方，研究を進める上で必要なあらゆることをご指導ご鞭撻いただいた武富貴史客員准教授に深く感謝致します。

日頃より研究活動を様々な形でご支援，ご協力いただきました上野真紀子秘書に深く感謝致します。研究における被験者実験への参加や日々の研究生活において多くのご協力をいただきました同研究室の学生の皆様に深く感謝致します。皆様のおかげでとても充実した大学院生活を過ごすことができました。

最後に，一人暮らしそして大学院での研究活動を行うにあたって，多大なご支援をいただきました両親を始めとする家族に深く感謝をいたします。

参考文献

- [1] Santos, Marc Ericson C, Takafumi Taketomi, Goshiro Yamamoto, Mercedes T Rodrigo, Christian Sandor and Hirokazu Kato. "Augmented reality as multimedia: The case for situated vocabulary learning". *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-4, 2016.
- [2] Wayne Piekarski and Bruce Thomas. "ARQuake: The Outdoor Augmented Reality Gaming System." *Communications of the ACM*, Vol. 45, No. 1, pp. 36-38, 2002.
- [3] FUJITSU. FUJITSU Software Interstage AR Processing Server. <http://www.fujitsu.com/jp/group/fmw/products/arprocessserver/>
- [4] Steven J Henderson and Steven Feiner. "Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret". In *Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'09)*, pp. 135-144, 2009
- [5] Steven J Henderson and Steven Feiner. "Augmented Reality in the Psychomotor Phase of a Procedural Task". In *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'11)*, pp. 191-200, 2011
- [6] Arthur Tang, Charles Owen, Frank Biocca and Weimin Mou. "Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly". In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 73-80, 2003
- [7] Vuforia. Vuforia. <https://www.vuforia.com> [accessed 2019-1-23]
- [8] Microsoft. MixedRealityToolkit-Unity. <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>, [accessed 2019-1-21]
- [9] Ernst Kruijff, J. Edward Swan and Steven Feiner. "Perceptual Issues in Augmented Reality Revisited". In *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'10)*, pp. 3-12, 2010

- [10] Michihiko Goto, Yuko Uematsu, Hideo Saito, Shuji Senda and Akihiko Iketani. "Task support system by displaying instructional video onto AR workspace". In *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'10)*, pp. 83-90, 2010
- [11] Hirotake Ishii, Zhiqiang Bian, Hidenori Fujino, Tomoki Sekiyama, Toshi-nori Nakai, Akihisa Okamoto, Hiroshi Shimoda, Masanori Izumi, Yoshi-nori Kanehira, and Yoshitsugu Morishita. "Augmented reality applications for nuclear power plant maintenance work". In *Proceedings of the International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for 21st Century*, pp. 262–268, Tsuruga, Japan, 2007.
- [12] Raúl Mur-Artal, J.M.M. Montiel and Juan D. Tardós ,“ ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System". *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1147-1163, 2015.
- [13] Changhyun Choi, Henrik I. Christensen, “ Real-time 3D model-based tracking using edge and keypoint features for robotic manipulation, "in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4048–4055. 2010.
- [14] 米村俊一, 小川克彦. "HI 設計ガイドラインデータベース: ブックメタファの可視化とその効果". *情報処理学会論文誌*, Vol. 35, No. 10, pp. 2159-2169, 1994
- [15] Ulrich Neumann and Anthony Majoros. "Cognitive , Performance , and Systems Issues for Augmented Reality Applications in Manufacturing and Maintenance". In *Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'98)*, pp. 4-11, 1998
- [16] Denis Kalkofen, Christian Sandor, Sean White, and Dieter Schmalstieg, "Visualization techniques for Augmented Reality", In *Handbook of Augmented Reality*, B. Furht, Ed. New York, NY: Springer New York, 2011, pp. 65–98.
- [17] Jesús Gimeno Sancho, Pedro Morillo, Juan M. Orduña, and Marcos Fernandez, “ A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures, ” *Comput. Ind.*, vol. 64, no. 9, pp. 1263–1271, Dec. 2013.
- [18] Rolim Cledja, Schmalstieg Dieter, Kalkofen Denis and Teichrieb Veronica.

- "[POSTER] Design guidelines for generating augmented reality instructions". In *Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'15)*, pp. 120-123, 2015
- [19] Microsoft, App quality criteria. <https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows/mixed-reality/app-quality-criteria>, [accessed 2019-1-26]
- [20] Hirohiko Sagawa, Hiroto Nagayoshi, Harumi Kiyomizu and Tsuneya Kurihara. "[POSTER] Hands-free AR work support system monitoring work progress with point-cloud data processing". In *Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'15)*, pp. 172-173, 2015
- [21] Mengu Sukan, Carmine Elvezio, Steven Feiner and Barbara Tversky. "Providing Assistance for Orienting 3D Objects Using Monocular Eyewear". In *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction - SUI '16*, pp. 89-98, 2016
- [22] Apple, Human Interface Guidelines Augmented Reality. <https://developer.apple.com/ios/human-interface-guidelines/technologies/augmented-reality/>, [accessed 2019-1-26]
- [23] Microsoft, Windows Dev Center Interaction fundamentals. https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/interaction_fundamentals, [accessed 2019-1-26]
- [24] Furmanski Chris, Ronald Azuma and Mike Daily. Augmented-reality visualizations guided by cognition: Perceptual heuristics for combining visible and obscured information. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, pp. 215-224, 2002
- [25] 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, 2016