

複合現実(MR)技術とKolbの経験学習モデルにもとづくネットワーク学習パッケージの開発と評価

深町 賢一^A豊崎 駿佑^B上野 春毅^A小松川 浩^A

要 旨：本研究の目的は、MR技術を用いたコンピュータネットワークの学習パッケージを設計・構築し、その教育的効果を明らかにすることである。情報Ⅰの単元「情報通信ネットワークの仕組みと役割」での利用を想定し、ネットワークの知識がまだ十分でない生徒が「家庭内LANの構築」を学ぶ教材とした。本教材は、MR技術を用いて、現実の教室空間内に家庭内LANでよく用いられるネットワーク機器の3Dモデルを配置し、それらを配線する実習となっている。単なる体験ではなく、Kolbの経験学習モデルにより、生徒の主體的な試行錯誤を通じて、具体的な経験から抽象的な概念を習得する深い学びを誘導することを目指す。学生および生徒を対象とした複数の検証を行い、紙教材と比較しての優位性や実機と仮想機器の操作性の同等性、プレテスト、本実習、ポストテスト順による検証にて理解度と関心度が向上する傾向が示唆された。

キーワード：情報Ⅰ、ネットワーク実習、複合現実(MR)、経験学習、家庭内LAN

Development and Evaluation of a Mixed Reality-Based Computer Network Learning Package According to Kolb's Experiential Learning Model

Ken'ichi FUKAMACHI^AShunsuke TOYOSAKI^BHaruki UENO^AHiroshi KOMATSUGAWA^A

Abstract: While the high school “Information I” curriculum emphasizes practical networking skills, implementing hands-on exercises with real equipment is difficult due to high costs and technical burdens on teachers. Conventional simulators frequently lack the physical and spatial interaction necessary for novices to form concrete mental models. To address this gap, we have developed a computer network learning package utilizing mixed reality technology to facilitate the understanding of home LAN construction. This package is designed for the “Mechanism and Role of Information Communication Networks” unit in the high school “Information I” curriculum, specifically targeting students with limited prior network knowledge. By superimposing 3D models of network equipment onto a physical classroom, our learning package enables trainees to engage in practical wiring exercises. Our goal is to induce “deep learning” (facilitating the transition from concrete experiences to abstract conceptualizations) through proactive trial and error guided by Kolb's experiential learning model instead of providing a mere experience. In late 2024, to assess the package's effectiveness and usability, we conducted multiple evaluations involving 20 students from three high schools with diverse academic backgrounds. To supplement the small sample size, we employed a mixed-methods approach, combining quantitative pre- and post-test scores with a qualitative analysis of students' dialogue logs and reflection notes. Findings suggest the package may be more useful compared to traditional paper-based materials and has comparable operability between real and virtual equipment. Furthermore, there was a tendency for improvement in both students' understanding and subject matter interest. Qualitative evidence suggests that the experiential learning cycle assists students in transitioning from random trial-and-error to systematic conceptual understanding of network structures. This study illustrates the potential of mixed reality technology to provide effective, low-burden, practical learning environments in secondary education.

Keywords: Information I, Network Practice, Mixed Reality, Experiential Learning, Home LAN

1 はじめに

コンピュータネットワークの基礎を習得することは現代社会において不可欠である。高等学校の共通教科情報科において共通必修科目「情報Ⅰ」が新設され、全ての生徒がプログラミングやネットワーク、データベースの基礎について学習することが定められたことで、その重要性が示されている(文部科学省, 2022)。情報Ⅰでは知識の習得だけでなく技能の習得も重要とされる(文部科学省, 2018, 2022)。たとえば、情報編の解説には「コンピュータなどを使ってデータをやり取りするためにコンピュータ同士を接続する仕組みや情報通信ネットワークを構成するクライアントやサーバ、ハブ、ルータなどの構成要素の役割について理解する」と書かれている(文部科学省, 2018)。それらの習得のためには、実習をともなうネットワークの授業に、生徒も主体性を持って参加することが望ましい。

ネットワークを扱う単位「情報通信ネットワークの仕組みと役割」は抽象度が高く、教員にも生徒にも困難であることが指摘されている。情報Ⅰの指導に関して高校教員へ行われたアンケート(坂本他, 2022)によると、「教材の入手や教材開発の難しさ」「生徒が内容を理解する難しさ」は両項目とも3位であり、教員が「指導に必要な教材の準備」「生徒の理解度」に課題を感じている。また、そのアンケートの自由記述では、難しい理由として「具体的なイメージを持ちにくく、指導が難しい」と報告されている。段階を経ずに抽象的な概念を習得することは困難であり、視覚情報を中心とした具体的な経験を通じて段階的に理解を進めるプロセスが不可欠である。

具体的な経験という観点では、実機を用いる実習が理想であるが、現実には困難である。現代の生徒はスマートフォンなどの普及により、有線のケーブルやネットワーク機器を意識することなくインターネットを利用する傾向にある。そのため、ITインフラストラクチャ(以下、ITインフラ)の構築・運用に関する実体験が不足している。具体的なイメージを持つためには、実習における臨場感のある体験が重要である。実際、学習指導要領の解説でも「コンピュータや情報通信ネットワークなどを活用した実習を積極的に取り入れる」「必要な情報機器やネットワーク環境を整える」とされている(文部科学省, 2018, p66)。しかしながら、実機には調達のコストや収納の問題もあり、非専門家の教員にとっては負担も大きいいため、実機による実習の導入は困難である。

実機の対極にあたる仮想現実(VR: Virtual Reality)を利用した訓練は、機器の低価格化および高性能化にともなうリアリティの向上にともない利用が拡大している。VRは、危険をともなわずに実践的な訓練の機会を提供でき、時間や空間の制約もなく、繰り返し訓練できる。そのため、実地訓練が困難なもの(例: 手術)や高価な機器が必要な医療や工学分野の訓練でも、安価かつ安全に効果的な訓練ができることはVRの長所である。メタ分析(Castillo-Castro et al., 2021; Daling & Schlittmeier, 2024; Kaplan et

al., 2021)によれば、VRを利用した訓練は従来の訓練と同等もしくは有意に効果が認められると報告されている。ただし、VRが現実の物理的な操作感覚を完全には再現できないため、触覚フィードバックを必要とするものなど、学習テーマによっては適さないものがある。

複合現実(MR: Mixed Reality)技術は、現実空間と仮想空間を融合し、リアルタイムで相互に影響を与える技術の総称である。ユーザは、現実空間の上に重ね合わせて表示された仮想オブジェクトの操作を、実物と同様に体験できる。

MRを活用することで、上述の情報Ⅰ実習における諸問題の解決が期待できる。臨場感の追求は仮想現実関連技術の主要目標の一つであり、MRの没入感により学習者の関心の高まりが期待できる。また、仮想とはいえ、ネットワーク機器を実際に見て、接続する実習を行うことで、ネットワークの現実感のある体験が可能となる。実機を用いる場合と比較して、教員への負担も軽減される。そして、機器のさらなる低廉化と、機器の性能向上を想定すると、今後は初等中等教育のような大規模な教育現場での利用も視野に入れた事例研究が求められる。

本研究の目的は、MR技術を用いたコンピュータネットワークの学習パッケージを設計・構築し、その教育的効果を明らかにすることである。情報Ⅰの単位「情報通信ネットワークの仕組みと役割」での利用を想定し、ネットワークの知識がまだ十分でない生徒が「家庭内LANの構築」を学ぶ教材とした(文部科学省, 2018)。本教材は、MR技術を用いて、現実の教室空間内に家庭内LANでよく用いられるネットワーク機器の3Dモデルを配置し、それらを配線する実習となっている。単なる体験ではなく、Kolbの経験学習モデルにより、生徒の主体的な試行錯誤を通じて、具体的な経験から抽象的な概念を習得する深い学びを誘導することを目指す。学生および生徒を対象とした複数の検証を行い、紙教材と比較しての優位性や実機と仮想機器の操作性の同等性、プレテスト、本実習、ポストテスト順による検証で理解度と関心度の向上を確認する。

2 関連研究

上述のように、2022年度より高校の「情報Ⅰ」は共通必修教科科目となり、ネットワークについては知識だけでなく技能の習得も重要とされている。生徒の習熟度は、さまざまであるから、ネットワークの知識が十分でない生徒が具体的なイメージを持つことができる実習が望ましいが、現実には困難であると推察される。

2.1 高校の現状

実機による実習が理想であるが、高校の実際の運用では容易ではない。実機には調達のコストや収納の問題、校内の運用ネットワークに影響を与えずに実習を行う必要もあり、高度なITインフラの専門知識を有する教員以外では対応が困難である。さらに、教員不足が深刻な現状において(中山他, 2017)、特に情報科を教えられる教員がいない

学校現場にとっては大きな負担となりうる。これらの理由により、実機ベースの実習は一般には困難なため、紙の作図などの実習に留まっているのが現状と考えられる。実際、教科書（例：日本文教出版の『情報Ⅰ』教科書）には、図解や紙上でのネットワーク構築実習の例が載っており、それらの利用が高校における事実上の標準である蓋然性が高い。

実機（無線LANルータやWWWサーバ）を活用したネットワーク構築授業の実践事例（小松, 2024）によれば、実機による実習には十分な価値があるが、その一方で、時間的制約の困難や機器の調達コスト、校内ネットワーク設定の調整など、さまざまな課題がある。この事例もITインフラに通じた教員のため実践可能であった例と考えられ、汎用的な授業方法としては確立されていない。

次善の策としてはシミュレータの利用が考えられる。シミュレータのソフトウェアは多岐にわたり、オープンソース（例：GNS3）やネットワーク機器ベンダー提供のもの（例：Cisco Packet Tracer）、独自に作成された（多くは大学などで開発され、高校で運用されている）ものがある。

Cisco Packet Tracerを活用している高校の事例（前田, 2022; 文部科学省, 2024, p29）では、シミュレータ上とはいえ、実際にネットワーク機器を操作する実習は生徒の学習意欲と理解度の向上をもたらすと報告されている。短所は、PCやコマンド操作への習熟度が低い学習者にとって、シミュレータの操作自体が負担となる点にある。さらに、ネットワーク機器特有のテキストベースのコマンド操作訓練も必要となる。基本的な操作に慣れない生徒では、学習が単なる作業に終始してしまう。これらの予備操作の訓練も必要なため、本格的な実習には多くの時間が必要となる。教員や生徒のIT習熟度によっては運用可能であるが、これも一般には困難であると考えられる。

ProtoSim（北村他, 2024）は独自作成の一例で、TCP/IPの仕組みを体験的に学ぶシミュレータ教材である。スマートフォンでWebページを閲覧する場面が想定されており、TCP/IP各層に沿った情報の流れが可視化される。北村他（2024）は、身近な事例でのデータの可視化や反転学習を組み合わせた授業設計などにより、ProtoSimは初学者に効果があると主張している。その一方、ProtoSimは抽象的な概念理解（TCP/IPプロトコルの知識）に特化したシミュレータであり、ケーブルの接続や機器の物理的な取り扱いはない。そういった物理的操作がともなわないため、技能習得には限界があると考えられる。

2.2 技能習得における仮想現実の活用

シースルー（see through）型ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着すれば、（ディスプレイ越しに透けて見える）現実空間の上に重ね合わせて表示された仮想オブジェクトを、あたかも実物のように操作する訓練が可能となる。技能習得におけるVRの活用は、仮想的な実機の再現という観点で、訓練効果が期待される。

2010年代半ばに消費者向けの高機能なHMD製品が多

数登場したことにより、それ以降HMDを活用した没入感のある研究が多くなったが、VRが主流でありMRの事例は少ない（Castillo-Castro et al., 2021; Daling & Schlittmeier, 2024; Kaplan et al., 2021）。仮想現実と称されるものの、実際には視覚の利用が主流であり、その他の聴覚・触覚・振動などのフィードバックの利用は限定的である。また活用事例の分野には偏りがあり、ネットワークの初心者向け訓練の事例は少ない。

HMDは、民生品でも高価な機材であり、この費用面の問題に起因して、医療分野や工場での技能訓練など、実地訓練が困難なもの（例：手術）や高価な機器が必要な分野での訓練事例が多い。

PC上でのシミュレータは広義のVRに含まれるため、ネットワーク分野のVR活用の歴史は長い。しかしながら、そういったシミュレータは、本来、一定程度的実務経験を有する新入社員向けのツールである。当然ルータなどのネットワーク機器に実際に触れたことがあるユーザ用と考えられる。上述のように、高校での活用事例（北村他, 2024; 前田, 2022; 文部科学省, 2024, p29）もあるが、運用可能性は教員や生徒のIT習熟度次第であり、一般には容易ではない。そして、現実のネットワーク機器を見たことがない生徒にとって、画面だけのシミュレータによる具体的なイメージの形成は困難であると推察される。

MRの活用事例は、さらに少ない。データセンターなどの実務環境を想定した事例（後安・井口, 2019）は、MRを活用したネットワークの演習である。MRであれば、実機よりも安価かつ安全に実務環境を再現できることを利用している。ただし、実務の訓練が想定されており、やはり初心者向けではない。異分野であるが、MRを活用した電気回路の実習（程・長谷川, 2017）は、現実世界を映した画面の上に文字や図が重ねて表示（スーパーインポーズ）される好適な事例である。学習者は、現実世界に投影された回路の構成要素を表現するマーカーを動かして電気回路を構築する。自分で組み立てた電気回路の上で動く電気現象を見ることで、実際に手で触れることが難しい抽象的な電気について学習することができる。ただし、この実習のMRでは、視覚情報による支援のみである。

2.3 関連研究のまとめと本研究の位置づけ

高校の情報Ⅰでは、紙上での実習が事実上の標準と考えられる。教員や生徒の習熟度によっては実機やシミュレータが利用でき、効果をあげている。ネットワーク分野におけるVRおよびMRの事例もシミュレータが中心である。どの事例においても、体験の重要性が主張されているが、ネットワークの知識が十分でない生徒が具体的なイメージを形成できる実習とは言い難い。そこで、本研究では、より現実に近い構築体験をMR技術により提供することと、具体的体験を抽象的概念へ昇華させる体系的学習モデルを提案するという2点に主眼を置いた学習パッケージを提案し、実際に高校での授業実践を通して、その効果を検証する。

なお、本稿では、次のように用語を使い分ける。MRを提供するハードウェアを「(MR) デバイス」、デバイスにロードするアプリケーション(アプリ)を含めた総体を「システム」、さらに実習手順まで含めた全体構成を「パッケージ」と定義する。

3 学習パッケージの授業設計と実習方法

本学習パッケージは、家庭内LAN(以下、単にLAN)の構築実習を提供する。実習の進め方はKolbの経験学習モデル(Kolb, 1984)を参考に設計した。本実習を通して、具体的な経験から抽象的な概念的知識が形成されることを目指している。

Kolbの経験学習モデルでは、

- (1)「具体的経験」をする段階
- (2)その内容を「内省する(振り返る)」段階
- (3)そこから「教訓」を引き出す段階
- (4)その教訓を「新しい状況に適用する」段階

これらの段階を経ることで人は学ぶと想定している(松尾, 2011)。この4つの段階(図1)を循環的に進める(経験学習サイクルを回す)ことで、人は徐々に知識と技能を習得していく。本サイクルには複数の訳語が存在するが、本稿では、学術用語でよく使用される「具体的経験をする段階」「内省する段階」「(抽象的に)概念化する段階」「(能動的に)実践(試行)する段階」を用いる(図1)。企業の人材育成や組織開発の分野では、より平易な訳語として「経験する段階」「振り返りの段階」「概念化する段階」「実践(実行)する段階」なども使われている。

実習は、2コマ連続100分で、次のように進める。

- (a) 最低限の知識の講義
- (b) プレテスト
- (c) グループの編成と役割分担
- (d) 構築(経験学習のサイクルを複数回まわす)
- (e) ポストテストとアンケート

生徒の習熟度は多岐にわたるため、実習の冒頭(a)では実習の進め方を説明後、基本用語(例:WAN, LAN, IPアドレス)や機器の役割などを紹介する。実習の冒頭10分程度を使い、スライド資料により基本用語の解説を行う。解説は、解答にならないよう注意して、最低限の知識の講義にしている。一部の生徒にとっては復習になるが、情報Iを未履修の生徒も想定しているため、この講義部分(a)は不可欠である。プレテスト(b)後に、グループを編成し役割分担を決める(c)。これは、サイクルの中で、経験を内省し、教訓を引き出す際には、グループワークが有益だからである。グループ内での役割は2種類、MR操作者1名とPC観覧者(1-3名)である。その後、LAN構築作業に入る(d)。この構築段階では、上述のKolbのサイクルを順に進める。LAN構築ができるまで何回でもサイクルを繰り返すことが理想だが、100分間の実習時間では最大3サイクル程度の実施が限度であった。構築後には、評価のため、ポストテストとアンケートを行う(e)。

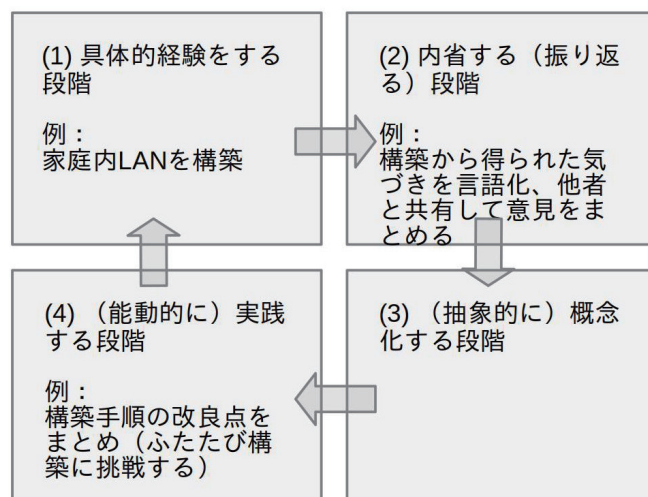


図1 経験学習モデルのサイクル



図2 LAN構築の様子(中央のMR操作者が被っているHMDがHololens2である)

LAN構築作業の経験学習サイクル(d)の詳細は次のとおりである(図1)。サイクルは具体的経験(1)としてのLAN構築から始まる。サイクルを循環させるため、この構築には時間制限(数分)を設定した。(2)次に、学習者たちは、構築(具体的経験)から得られた知見を言語化し、グループ内の他者と知見を共有して意見をまとめる(内省する)。(3)この過程で、学びが抽象化され、理解が進んでいく(概念化する)。(4)一度では浅い理解しか得られないため、改良点をまとめ、ふたたび構築を行う(実践する)。このサイクルを何度か回すことで、より深い理解(概念化)につながる事が期待される。

LAN構築(d)時、HMDを装着した学習者(MR操作者)は、現実空間内にスーパーインポーズされた機器を直感的に操作できる(図2)。操作者には、ネットワーク機器としてQRコード付の紙が渡される。この機器つまり紙を現実空間内に配置すると、MRデバイスがQRコードを認識し、その紙の位置に仮想ネットワーク機器が表示される(図3)。配置場所は任意である。これらの機器間を結線すると、正誤判定が行われ、操作者に判定結果がフィードバックされる。一方、PC観覧者は、大型ディスプレイなどに表示されている「MR操作者が見ている画面」を見ながら、MR操作者と同じ画面を見、共に考え、助言を与える役である(図2)。MRデバイスの台数制限から、各グループでMR操作

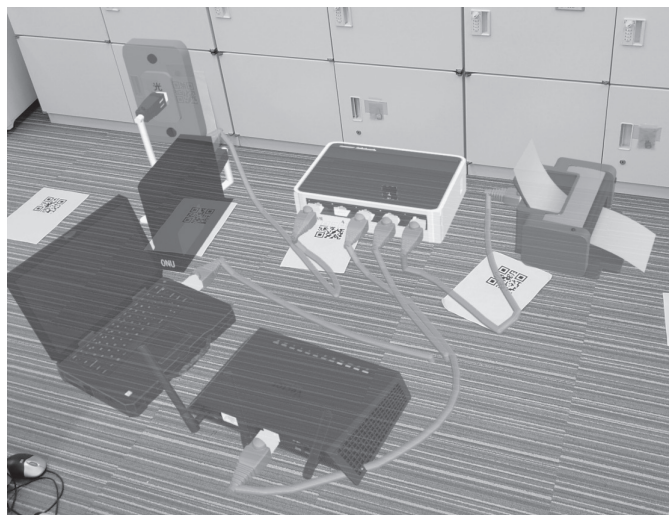


図3 LAN構築の様子

者は1名としたが、Kolbの経験学習サイクルにおいて内省の際にはグループ内で、構築（具体的経験）から得られた知見を言語化し、他者と共有して意見をまとめる（内省する）ことが重要であるため(Kolb & Plovnick, 1974), 結果として、本フレームワーク（1人の操作者と複数の閲覧者）は有効と考えられる。

LAN構築(d)時には、ケーブルが二種類（光ファイバーとLANケーブル）用意されている。そして、現実世界と異なり、異なる結線を許容している。たとえば、光ファイバーの場所にLANケーブルを挿すことができ、その逆も可能である。本システムは、教育的効果を考慮し、あえて誤接続を許容する設計にしている。失敗から学ぶ仕組みは経験学習の一環として重要だからである。

4 HMDの実装

本節では、本検証用のバージョン3(V3)システムについて記述する。予備検証ではV3以前のプロトタイプが使われているため、一部の機能に差がある（各バージョンの機能比較は表1に示す）。

4.1 MRデバイス

学習者が装着するMRデバイス(HMD)はマイクロソフ

ト社のHololens2を用いた(図2)。Hololens2は、HMD方式のスタンドアロン型コンピュータである。シースルー型のディスプレイを装備し、現実世界の上にホログラムを重ね合わせる（スーパーインポーズする）ことで、装着者は複合現実を体験できる。なお、本デバイスはMilgramらが提唱した現実空間と仮想空間の比率にもとづいた分類のクラス3（仮想性が高い状態）(Milgram & Kishino, 1994)に相当し、高い没入感を提供できる。

4.2 MRアプリ(1)家庭内LANの構築

Hololens2上にロードするMRアプリの開発は、マイクロソフト社が提供するオープンソースライブラリMixed Reality Toolkit (MRTK)を用い、Unity上で行った。MRTKはUnity上でMRアプリを作成するツールキットである。スーパーインポーズされるネットワーク機器の3D図形は、オープンソースの3DモデリングソフトウェアBlenderを用いて作成した。実装の詳細は豊崎(2023)および豊崎(2025)で参照可能である。

LAN構築作業は、上述のように、QRコード付の紙を現実空間内に配置するところから始まる。Hololens2が、空間マッピングおよびMicrosoft.MixedReality.QRライブラリを用いたQRコード認識機能により、このQRコードを読み取り、該当するネットワーク機器をスーパーインポーズしている。

本実習では、ケーブルを接続する体験は重要な要素であることから、現実のケーブルの抜き差し（挿抜）における操作感を擬似的に再現している。たとえば、Unityでロープやケーブルを作成するRope Toolkitを利用した柔軟に曲がるケーブル（豊崎他, 2024）（図4、詳細は5.2節に示す）、ケーブルのプラグを挿入・引き抜く動作の疑似体験、ケーブル挿抜時の音が実装されている。また、実際に家庭内LANにありうる機器類として、光コンセント、ONU、ルータ、ノートパソコン、プリンタ、Wi-Fi AP（アクセスポイント）が用意されている（豊崎,2025）。一部の機器（ルータ、ノートパソコン、プリンタ）は高校教諭からの要望に応じてV3システムで追加された。各機材に単一の機能を割りあててことで、機器の役割が明瞭になった（家庭内LANと

表1 システムごとの機能差一覧

設計項目	V1	V2	V3
機器	光コンセント, ONU, 光ファイバー, LANケーブル, Wi-Fi AP付ルータ	V1と同じ	光コンセント, ONU, 光ファイバー, LANケーブル, ルータ, Wi-Fi AP, ノートパソコン, プリンタ
ケーブルの操作性	90度固定	柔軟に曲がる（フレキシブル化）	ケーブルの掴みやすさの向上
ケーブルの解除機能	ボタン操作による一括解除	プラグ部分を持って引き抜ける	V2と同じ
正解判定	単一の正解パターンのみ	V1と同じ	正解テーブルにもとづき判定, 複数の正解パターンにも対応
ユーザへのメッセージ機能	不正解時にメッセージを表示	V1と同じ	アドバイス機能を実装
IPアドレス演習	なし	なし	あり

比較して、より実務用ネットワークの構成に近づいたとも考えられる)。後述のように、この機器構成では複数の正解がありうるため、アプリの正解判定ロジックを抜本的に書き直している。

触覚フィードバックは実装していないが、ケーブルの抜き差しは、ケーブルをつかむ動作と音による擬似体験を可能とした。操作者が手で拳を握る形を作ると、ケーブルを掴んだと判定する(豊崎他, 2024)。ケーブルを結線すると、物理的な接続を模した音声フィードバックがなされる。V3システムではケーブル操作の安定性向上や意図しない回転を抑制するため、Unity内のオブジェクト構造を改良し、カスタムスクリプトによりLastUpdateメソッド内で更新処理をするよう改良された(豊崎, 2025)。具体的には、オブジェクト間の座標処理を改良することで、ケーブル操作の安定性を向上させている。さらに、ケーブルのプラグ部の当たり判定を大きくすることで、つかみやすさを改善した。この設計変更により、操作者は手を拳状にして直感的にケーブルをつかんで移動できるようになり、操作性が向上した。

実習時には、動的なフィードバック機能により、機器の姿勢に応じた適切な位置にアドバイス用のボタンが表示される(豊崎他, 2024)。ボタンを押すと、誤接続箇所と次に取りべき具体的な行動に関するアドバイスメッセージが提示される。これは、V2システムまでは接続誤り時のメッセージが文字情報のみであったこと(フィードバック不足)への対応である。V3システムでは、LAN構築時に、誤接続箇所を即座に特定してアドバイスを表示するボタンを実装した。この機能は経験学習サイクルにおける内省支援を想定したものである。

正誤判定は、特定の接続口に正しい種類のケーブルが挿入されたか否かを、アプリが持つ正解テーブルと比較して行う。初期のV1システムでは、ネットワーク機器群の4つの特定の接続口(光コンセントの接続口、ONUの光ファイバー接続口、ONUのUNI接続口、Wi-Fi AP機能付ルータのWAN接続口)にケーブルが挿入されているか否か、その挿入が正しい組み合わせか否かを判定していた。本検証で用いたV3システムでは正解が複数ありうる拡張がなされたため、複数解答にも対応した(豊崎, 2025)。

判定の結果、正解の場合、次のような視覚的フィードバックがなされる。第一に、Wi-Fi機能のある機器では、機器の上に電波マークが表示される。第二に、ONUやルータではLEDを点灯させる。また、第三に、パケットが流れている様子が示される。

なお、上述のように、あえてケーブルの誤接続を許容する(プラグ形状の差は無視する)設計としている。現実のケーブル(光ファイバーとLANケーブル)はプラグの形が異なるため、正しい組み合わせでのみ挿することができる。そのためケーブルの利用意図などを理解せずとも試行錯誤するうちに結線に成功することがある。そこで、適切なつながり方を考え、意識した結線を促すため、あえてケーブル

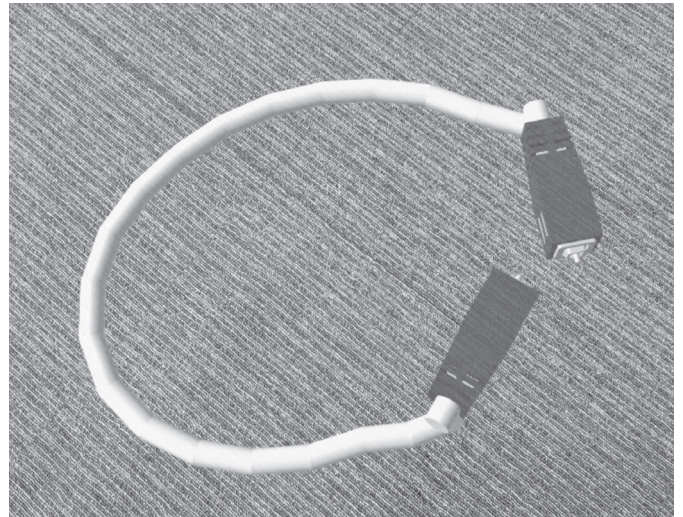


図4 フレキシブル(柔軟に曲がる)ケーブル

の誤接続を許容する設計とした。これは経験学習サイクルを回す上でも重要な工夫である。これには、具体的な失敗の経験、失敗の理由を考える「内省」や「概念化」、そして結線を修正する「実践」を行うよう誘導する意図が込められている。

4.3 MRアプリ(2) IPアドレスの割当

V3システムはIPアドレス演習も実装している(豊崎, 2025)。これは、ルータやPCなどにIPアドレスを割り当てる訓練で、具体的には「グローバルIPとプライベートIPアドレスの違いや正しい割り振り手順を習得する」演習である。学習指導要領の解説にある「IPアドレスについては適切に配置する実習を行う」(文部科学省, 2018)に相当する。実習の進捗が良い場合、この演習も行う想定とした。

5 予備検証と改良

本検証の前に予備検証を3回おこなった。検証の目的は、MRによる視覚的・空間的支援および経験学習モデルによる段階的理解支援の有効性の確認である。紙媒体や実機との比較および学習パッケージを通して行う3段階の検証となっている。検証の結果をふまえて本パッケージを改良した。

プレ・ポストテストは紙で配布・回収・採点した。プレテストとポストテストで同じ設問を解き、差を評価した。アンケートはGoogle Formで行った。予備検証のテストとアンケートは、それぞれの検証目的に応じて作成したため、各検証で異なる。詳細は豊崎(2023)と豊崎(2025)で参照できる。

5.1 予備検証1: 紙媒体との比較によるMRの視覚的支援と具体的経験の有用性

従来の紙ベースの実習と本学習パッケージを比較した(豊崎他, 2023)。本学習パッケージに、従来の紙ベースの実習と同等もしくはそれ以上の有用性があるか否かを検証する検証である。

検証は、理工系の大学Xにて、2022年末に行った。被験者は、学生14名(学部1-4年生)である。2人1組、計7ペアに分け、最初は紙で、次に本パッケージのV1システムを用いてLAN構築を2回おこなう手順とした。

具体的な手順は次のとおりである。(1)教科書とワークシートを紙で配布する。ペアで話し合いながら、それらに取り組み、新たな知見を記録する。(2)次に、本システムを用いた構築に入る。構築の際は、ペアの中で役割を分担する。1人(MR操作者)はHMDを装着して構築を体験する。もう1人(観覧者)はWindowsデバイスポータルという機能を用いてHMDと同じ画面を見る。ペアで話し合いながら構築を進める。観覧者は知見を記録する。(3)役割を交代して(2)と同じ手順で構築を進める。両構築後には、本パッケージの使用感や感想を問う事後アンケートに回答してもらった。

この手順は経験学習モデルの一種とも考えられる。(2)で構築という「具体的」な「経験」をし、その後、ペア同士での話し合いという「内省」と「概念化」を行う。(3)は「(能動的)実践」に相当する。ただし、この検証では経験学習サイクルは1回転だけであった。

結果をまとめると、新たな知見の個数は、紙の場合には各ペア平均で1.85個、本学習パッケージでは6.28個であり、3.38倍に達した。この結果は、本パッケージの具体的経験の提供からくる有効性を示唆している。本パッケージを利用した場合、仮想の立体的なネットワーク機器が見えるため、従来の方式では得られない具体的経験からの理解や内省の材料を与えることができたと推察される。これらの結果から、本学習パッケージには、従来の紙と同等もしくはそれ以上の有用性があることが示唆された。

その一方、アンケートの自由記述では、さまざまな課題が指摘された。これは本検証で用いたV1システムがプロトタイプであったためである。それらの指摘を元にシステムを改良した。

5.2 V2システムの開発：操作時のリアリティ向上と内省支援環境の改善

予備検証1のアンケート結果を踏まえて、改良版V2システムの開発を行った。アンケート結果の自由記述では、大きく分けて(1)操作性およびリアリティと(2)環境設計および共同作業、この2つの課題が指摘されていた。

課題(1)をふまえて、ケーブルの柔軟性と抜き差しの自然さを改良した(豊崎他, 2023; 豊崎, 2025, p24-34)。(1)の操作性およびリアリティの課題とは、ケーブルの動きの不自然さ、操作性の違和感である。V1システムのLANケーブルや光ファイバーは90度固定で曲げられた形をしており、柔軟性も無かった。ケーブルが硬直しているため、ケーブルの挿入は機器を動かす方が操作しやすかった。また、ケーブルを抜く動作は未実装で、ケーブルを抜く際にはケーブル解除ボタンを押す方式であった。これらの操作性は現実のケーブルとは大きく異なり、具体的経験を損なう

ものであった。そこで、V2システムでは、ケーブルの柔軟性とケーブルの抜き差しの自然さを改良した(図4)。以下、この柔軟に曲がるケーブルを「フレキシブル(化)ケーブル」と呼称する。

(2)の環境設計および共同作業の課題とは、作業の様子を複数人で共有することができない点である。上述のように、経験学習サイクルにおいては、構築(具体的経験)から得られた新たな知見を言語化し、他者と共有して意見をまとめる(内省する)ことが重要である。そのため、グループワークを含む標準フローを実施する予備検証3以降では、HMDで見えている画面を、隣接する大型ディスプレイにも表示(ミラーリング)してグループで議論できる運用とした(注：この機能はデバッグモードとしてV1から実装されていたが、今までは実習に組み込まれていなかった)。

5.3 予備検証2：実機との比較によるMR操作時のリアリティの検証

実機を利用した実習と本学習パッケージ(V2)を比較した(豊崎他, 2024; 豊崎, 2025, p.24-34)。実機を利用した実習が最もリアリティレベルが高く理想であるが、上述のように実際の運用は容易ではないと考えられる。MRを用いる方式が実機方式と同等と感じられるかは重要で、検討を要する課題である。この検証では、リアリティの検証に相当する、ケーブルを持つ・移動する・接続する、といったケーブルの操作性の評価を主目的とした。そのため、この検証では経験学習サイクルは実施しなかった(つまり0回転であった)。

検証は、大学Yにて、2023年5月30日および2023年6月1日の計2日間にわたり行われた。被験者は、理工系大学Yの学生(4年生)および大学院生(M1とM2)の合計10名(情報専門の学生8名、非専門の学生2名)である。作業は各被験者1人で行ってもらった。被験者は、まず実機による構築をおこない、その後、V2システムを用いたLAN構築を行った。全作業後にアンケートをとり評価した。

アンケートは大きく分けて2つの観点から評価した(豊崎, 2025, p27)。一つはフレキシブルケーブルの操作性、もう一つはMR環境と実機環境の相違である。

フレキシブルケーブルの操作性については、90%以上の被験者がMRと実機の間に大きな相違はないと回答した。フレキシブルケーブルは、実機の操作感に極めて近いと推察される。自由記述からは、ケーブル接続時に音が鳴る点が評価されていることが判明した。ケーブルに重さや触覚フィードバックがないのは本システムの弱点だが、音による支援が擬似的なケーブル操作感を十分に再現していると考えられる。

MR環境と実機環境の違いについても、顕著な差異は認められなかった。「実機とMRで学べる内容に差があるか」という設問に対しては、70%の被験者がないと回答した。また、構築体験についての設問で、50%の被験者が実機と同等と回答する一方、残り50%の否定派の大多数はケーブ

ルを挿し間違える点を問題視していた。しかしながら、これは経験学習モデルにもとづき、あえて誤接続を許容した意図的な実習設計である。よって、このケーブル形状の修正は実施しなかった。

これらの検証結果により、実機とMRの実習には、違いがあるにしても、わずかであり、LAN構築については十分同一の体験が可能であることが示唆された。

5.4 予備検証3：学習パッケージ全体の実習フローおよびMR操作感の確認

予備検証3を、本検証前の最終リハーサルとして実施した。高校Zにて、2024年6月28日の放課後、情報I未履修の高校1年生4名が対象であった（豊崎, 2025, p.34-40）。これは生徒を対象に本パッケージ（V2）全体を通して実行し、その学習効果と操作性について再確認する機会と位置づけられる。実習は標準フローで実施した（詳細は第3節に示されている）。

プレ・ポストテストではLAN構築に関する理解度を、実習後のアンケートでは本パッケージの評価や操作性・改善点について調査した。

プレテストとポストテストを比較すると、全体の正答率が約31%向上した。特に、ネットワーク機器の位置づけや機能（構成図作成、ONUの役割）を正しく把握する問題で大きな向上が確認された。

アンケートによれば、仮想ネットワーク機器の見た目（外観）の自然さについて高い評価を得た一方、「操作方法の直感性」や「機器の動作が期待どおりか」についての評価は中立的であった。MRデバイスや仮想空間内での各種操作への適応には個人差があり、操作にすぐ適応できる人もいれば、そうでない人もいる。ケーブルのつかみ方やメニュー操作、機器操作の切り替え方は独特であり、それらの操作には習熟を要することが推察された。

アンケートの自由記述では「何度も試せる」「怪我や機器損傷のリスクがない」といった仮想教材ならではの利点に関する言及が多く、予想どおりであった。

本検証は、生徒に一定の理解度向上と高い学習意欲を喚起させる本パッケージの有効性を示唆している。その一方、操作性には改善の余地があることも明らかになった。

5.5 V3システムの開発：操作性の向上と教育現場の要請にもとづいた機能拡張

予備検証2および3をふまえ、さらなる操作性の向上に取り組んだ（詳細は4.2節で述べられている）。また、予備検証3の高校Zの教諭からは「ルータなど授業で扱う機器の追加」「IPアドレスに関する練習を取り入れたい」という要望を受けた。その対応としてV3システムではネットワーク機器の追加（4.2節）とIPアドレス演習の追加（4.3節）を行った。

表2 検証参加者の属性

	高校A	高校B	高校C
学年	1-2年生	2-3年生	2-3年生
人数	8	6	6
所属	コンピュータ部	写真・文化部	物理専攻
情報Iの履修状況	履修済	未履修	未履修
学校の特色	進学校	幅広い学力層	幅広い学力層
コマ割り	連続2コマ	不連続2コマ	連続2コマ
グループ内の対話方法	LINE OpenChat	簡易チャットサービス	付箋

6 本検証

生徒を対象に、本パッケージ（V3）を用いる検証（本検証）を3回おこなった。参加者の属性（表2）は多岐にわたり、総じてパッケージ全体は高評価だが、コマ割りと生徒の属性に由来すると思われる差が見られる。

6.1 検証方法

各高校で、授業2コマ分（100分）の時間を確保してもらい、本パッケージの標準フロー（第3節）を実施した。経験学習サイクルを適用する実習内容は、家庭内LAN構築とIPアドレス演習の二つとした。授業の進捗次第では、家庭内LAN構築後とポストテストの間に、IPアドレス演習を行う想定である。結果として、高校Aでは設計どおりのIPアドレス演習が実施できたが、高校BとCでは設計どおりの演習が実施できなかった。

プレ・ポストテストとアンケート（表3）は本検証にむけて再設計した。プレ・ポストテストは紙で配布・回収・採点した。プレテストとポストテストで同じ設問を解き、差を評価する。アンケートはGoogle Formで行った。本検証の3回で利用したテストとアンケートは同一である。

テストは4問で、問1「（インターネットに接続できるように）家庭内LAN構成図を作成する」、問2「機器の役割を選ぶ（選択問題）」、問3「WANを説明する（穴埋め問題）」、問4「適切なプライベートIPアドレスを選ぶ（選択問題）」とした。問2と問3は、実習を通じて習得もしくは拡張可能な知識問題である。テストの配点は、問1が5点、問2が3点、問3が2点、問4が2点、合計12点となっている。

テストの最後には、関心度を6段階のリッカート尺度で尋ねる設問を追加した。尺度は1から6で、数字の大きい側がポジティブな回答である。

アンケート（表3）は、A4サイズの紙面4ページに収まるように（Doernyei, 2002）、合計13問とした。内訳は、MR教材の操作性と没入感の評価に5問、経験学習モデルの評価に2問、紙の実習とMRの実習を比較するために4問、学習成果と自己効力感の評価に2問である。以下、アンケートを参照する際は、問1をQ01などと略す。

アンケートの回答方式は、Q01-Q10は6段階のリッカート尺度（Doernyei, 2002）、Q11-Q13は自由記述とした。尺

表3 本調査のアンケート（原文のママ）

設問	項目	質問内容
MR教材の操作性と没入感		
Q01	視覚的自然さ	見た目（外観）の自然さは、どれぐらいに感じられましたか
Q02	動作の自然さ	オブジェクトを動かす操作の自然さは、どれぐらいに感じられましたか
Q03	持ち方の自然さ	オブジェクトを持つ操作の自然さは、どれぐらいに感じられましたか
Q04	接続操作の自然さ	オブジェクトに挿す・外す操作の自然さは、どれぐらいに感じられましたか
Q05	音の自然さ	オブジェクトに挿したときの音の自然さは、どれぐらいに感じられましたか
Kolbの経験学習モデルのサイクル		
Q06	学習の進展	演習のサイクルを回すことで（例えば2回目より3回目の方が）正解に近づいていると感じられましたか、感じられませんでしたか
Q07	アドバイス機能有用性	アドバイス機能は次のサイクルでの構築の助けになりましたか、なりませんでしたか
MRと紙での構築の比較		
Q08	現実感の比較	演習はどれくらい現実のように感じられますか、紙とMRでそれぞれ答えてください
Q09	自信の比較	家に帰って家庭内LANを構築する状況に置かれたとき1人でやり遂げる自信はどれぐらいありますか、プレテスト（問1）とMRでそれぞれ答えてください
Q10	推奨度	紙とMRでの演習を同じクラスの人に勧めるとしたらどの程度ですか、紙とMRでそれぞれ答えてください
Q11	学びと気付き	MR演習をやる直前とやった直後を比較して、新たに学んだことや気付きなどをできる限り記述してください
学習成果と自己効力感		
Q12	良かった点	MR教材を使用して分かりやすかった・ここが良かった点を教えてください（複数個回答可）
Q13	感想・改善点	感じたことをご自由に書いてください（感想・改善して欲しいところなど何でもOKです）

度は1から6で、数字の大きい側がポジティブな回答となっている。なお、Q08-Q10は一つの設問で紙とMRの両ケースについて質問しているため、回答が2つずつある。この紙とはプレ・ポストテストの問1「家庭内LAN構成図を作成する」を指している。Q11では、回答の自由記述文から筆者らが知見を抽出し、その個数を数え上げた。Q11の回答も2つ（LAN構築とIPアドレス演習）ある。表6-8では紙面の節約のためLANおよびIPと省略している。

経験学習モデルの効果は、アンケート（Q06-Q07）による参加者の主観評価と、筆者らが観察した構築時の参加者の様子およびグループワークの対話履歴を元にした客観評価の両面から推定した。

次節以降、Q01-Q10については平均値と標準偏差を用いてまとめる。本研究では、データの全体傾向を把握するため、順序尺度であるリッカート尺度に対して便宜的に平均値を算出した。詳細な分布は豊崎（2025）に示す。

本検証の参加者は20名と限定的であり、統計的な有意差検定による一般化は困難である。そのため、平均値は傾向を把握するにとどめ、内省時の履歴やアンケートの自由記述にもとづく質的分析により、学習効果の多角的な示唆を試みる。

なお、テストとアンケートのワーディング（問題文の言い回し）は、調査票設計の文献（Doernyei, 2002; 大谷他, 2005）を参考に、注意深く設計した。直接的な言い回しも避けた。たとえば、パッケージ全体の評価は「良いか悪いか選んでください」ではなく「同じクラスの人に勧めるとしたらどの程度ですか」という設問になっている（大谷他, 2005）。

表4 プレ・ポストテストのスコア

	プレ・ポストテスト	平均値	標準偏差
高校A	プレ	8	2.93
高校A	ポスト	11.13	0.64
高校B	プレ	2.67	1.21
高校B	ポスト	5	2.68
高校C	プレ	3.33	1.75
高校C	ポスト	8.5	1.52

6.2 高校A

高校Aにて、2024年11月25日に、連続2コマで本パッケージのフルセットの実習を実施した。検証への参加者はコンピュータ部所属の高校1-2年生、合計8名、全員が情報Iを履修済であった（属性のまとめは表2に示されている）。1グループ4名、計2グループに分けて実習の標準フローを実施した。高校Aではスマートフォンの利用が生徒に許可されていたため、内省時の履歴収集にはLINEのOpenChatを利用した。プレ・ポストテストの結果は、総合点が表4、関心度が表5にまとめられている。アンケート結果が表6である（より詳細なデータは豊崎（2025）で参照できる）。

高校Aでは本パッケージをフルセットで実施した。経験学習サイクルは、グループ1ではLAN構築およびIPアドレス演習を2回ずつ、グループ2では、LANを5回、IPを4回、サイクルを回すことができた。

プレ・ポストテストのテスト結果（表4）を見ると、スコアの平均点は8.00から11.13へと大きく向上し、スコアのバラツキも小さくなったことで、本パッケージが知識の

表5 プレ・ポストテストの関心度

	プレ・ポストテスト	平均値	標準偏差
高校A	プレ	4.25	0.83
高校A	ポスト	4.75	0.66
高校B	プレ	3	1.15
高校B	ポスト	3.67	1.6
高校C	プレ	4.17	0.37
高校C	ポスト	4.83	0.69

表6 高校Aのアンケート結果

設問		平均値	中央値	標準偏差
Q01		4.63	5	0.92
Q02		4	3	1.41
Q03		4.13	4.5	1.36
Q04		4.5	5	1.31
Q05		5	5	0.76
Q06		5.5	6	0.76
Q07		5.5	6	0.77
Q08	紙	3.75	4	1.17
Q08	MR	5.13	5	0.64
Q09	紙	2.88	2	1.55
Q09	MR	4.75	5	0.89
Q10	紙	3.88	3.5	1.46
Q10	MR	5.75	6	0.46
Q11	LAN	2.88	2.5	1.05
Q11	IP	2.12	2	1.27

獲得と理解促進に大きく寄与したことが推察される。その内訳を見ると（豊崎, 2025）、プレ・ポストテストで、問1の平均点が3.13から5.00、問2は2.13から2.50、問3は1.88から1.75、問4は0.88から1.88へと変化した。問1と問4といった空間的もしくは視覚的な設問の向上が大きい。MRシステムが視覚的・空間的な理解の助けになったと考えられる。一方、WANの説明を求める問3は実習後のほうが悪い結果となっている。WANという用語を知ってはいても、家庭内LAN構築ではWANを具体的にイメージできないためと考えられる。

プレ・ポストテストの関心度の結果（表5）は、平均値が少し向上かつバラツキも減少した。つまり、参加者のネットワークについての関心が全般的に高まり、かつ全員が一定以上の関心を持つようになったことが伺える。

アンケート（表6）のMR教材の操作性と没入感（Q01-Q05）の数値は高く、MRシステムの視覚的・空間的支援が高く評価されている。現実感・自信度・推奨度（Q08-Q10）も高い評価を得た。また、経験学習のサイクル（Q06-Q07）は有効に機能しており、サイクルを経る（構築を繰り返す）ごとに正解に近づいていると感じていたことが垣間みえる。サイクルが有効に回っている様子は履歴の観測からも伺える（7.1節にて後述する）。

新たな知見の個数（Q11）は、LAN構築で平均2.88個、IPアドレスでは平均2.12個であり、本パッケージにより全

員が何らかの新しいことに気づいていた。家庭内LANの構築に関しては「ルータにはWANポートとLANポートがある」といった物理ポートの役割や「接続方法は一通りではなく、複数の方法が存在することを知った」という接続方法の多様性への気づきが散見された。単なる結線作業からネットワーク構造の把握へ抽象化が進んだ様子が伺える。IPアドレス演習においても「末尾は0と255は特別なので使えない」といった具体的制約への言及が見られ、グループワークの対話履歴で見られた「255という数字が怪しい」といった気づきから能動的な推論を経てIPアドレスの概念理解へと進んだ可能性が示唆される。

自由記述（Q12）では「実際に構築しているように感じられる」といった具体的経験や「データの流れが可視化されていてわかりやすかった」「紙や口頭の説明ではわからない、実際にどのように繋ぐのかがわかりやすかった」といった視覚的支援の有用性を示唆するコメントが見られた。また「MRを使うことでより楽しく学習ができ生徒の学習意欲がたかまりよりLANやIPについての理解を深める効果があるとも感じた」（原文ママ）という肯定的な意見も得られた。

これらの個別の記述は、少人数ゆえの一般化の限界はあるものの、本パッケージが提供する学習体験が一部の生徒にとって深い洞察や学習意欲の向上を促した可能性を示唆している。

以上の結果により、高校Aでは、MRの視覚的・空間的支援および本パッケージによるネットワーク学習の理解促進と学習意欲向上の効果が示されたと考える。

6.3 高校B

高校Bにて、2024年12月6および9日に、不連続の合計2コマで、本パッケージのフルセットの実習を実施した。検証への参加者は2-3年生、合計6名、全員が情報Iを未履修であった（属性のまとめは表2に示す）。1グループ3名ずつ、計2グループに分けて、実習の標準フローを実施した。高校Bでは、内省時の履歴収集には、生徒所有のChromebookを使い、簡易チャットサービスを利用した。プレ・ポストテストの結果は、総合点が表4、関心度が表5にまとめられている。アンケートのまとめは表7である（より詳細なデータは豊崎（2025）で参照できる）。LAN構築では両グループとも経験学習サイクルを4回実施できた。しかしながら、LAN構築に時間を取られたため、IPアドレス演習は簡素化して行わざるを得なかった。具体的には、筆者らがMR操作を行い、生徒は、それを観察する形態とした。ただし、筆者らはMR操作の代行という補助役であり、IPアドレス演習における試行錯誤や具体的な操作の指示は生徒によるものである。

他校との大きな違いとして、不連続な2コマで、かつ土日を跨いでの開講となったことが挙げられる。このため、経験学習サイクルが十分に機能しない可能性が予想された。実際、実習結果の傾向は高校Aと似ているが、全般的に高

表 7 高校Bのアンケート結果

設問		平均値	中央値	標準偏差
Q01		3.83	4	1.17
Q02		3.17	3	1.17
Q03		3.17	3	1.17
Q04		4	4.5	1.79
Q05		4.83	5.5	1.6
Q06		3.5	3	1.38
Q07		4.33	4.5	1.37
Q08	紙	3.5	3.5	0.55
Q08	MR	4	3.5	1.67
Q09	紙	2.5	2	1.64
Q09	MR	3	3	1.55
Q10	紙	3.67	4	0.52
Q10	MR	4.83	4.5	0.98
Q11	LAN	1.17	1	0.69
Q11	IP	0.83	1	0.37

表 8 高校Cのアンケート結果

設問		平均値	中央値	標準偏差
Q01		4	4	0.63
Q02		3.67	3.5	1.21
Q03		3.5	4	0.84
Q04		4.17	4	0.75
Q05		5	5	0.63
Q06		5.17	5.5	0.98
Q07		5.33	5	0.52
Q08	紙	4.5	4.5	1.05
Q08	MR	4.5	4.5	1.05
Q09	紙	3.33	3.5	1.68
Q09	MR	3.83	3.5	1.47
Q10	紙	4.68	5	1.37
Q10	MR	5.33	5	0.52
Q11	LAN	1.67	2	1.25
Q11	IP	1	1	0.58

校Aおよび後述の高校Cよりも学習効果が低い傾向にある。

プレ・ポストテストの総合点(表4)は、平均点が2.67から5.00へと向上した。平均点向上の差は、高校A-Cの中で最も小さい。その一方、スコアのバラツキは大きくなった。内訳は、問1が0.50から2.33、問2が0.83から0.67、問3が1.17から1.50、問4が0.17から0.50へ変化した。高校Bでも問1(LAN構築)の向上が著しい。一方、問4(IPアドレス)の伸びは少なく、問2-3は実習後のほうが悪い。

関心度(表5)の平均値も少し向上したが、バラツキも大きくなった。表4も表5も実習後にバラツキが大きい。テスト結果もアンケート結果も他校より分散傾向にある。これは、本パッケージの効果には個人差があり、学習効果の高い層と低い層に二極化した可能性が考えられる。

アンケート(表7)のMRの没入感(Q01-Q05)は、おおむね中立的な水準をわずかに超える結果となった。これは視覚・聴覚的側面(Q01, Q04, Q05)が比較的ポジティブな一方、直接操作の自然さを問う項目(Q02, Q03)の低迷さが要因である。MRの視覚・聴覚的側面については、自由記述でも「立体で分かりやすい」「実物に近くて紙よりわかりやすい」という回答を得た。MRによる空間的・視覚的支援の有効性を示唆している。一方、MR操作(Q02-Q03)の評価は低めであり、自由記述でも「見ている側がラグくてあまりわからない」「原文ママ」といった操作性の困難が指摘されていた。

アンケートの経験学習の項目(Q06-Q07)が、高校AおよびCに比べると低い値である。グループワークの対話履歴から、学習者は実習時の知見を記録する対話的活動をしており、経験学習が一定程度は機能していたと推察される。

高校Bの特徴はバラツキが大きいことである。実際、アンケートの自由記述(Q12-Q13)において「紙より何倍もわかりやすい」(Q12)「最高でした」(Q13)と評する生徒がいる一方で「見ている側がラグくてあまりわからない」(原文ママ)と正反対の指摘をする生徒も見られた。不連続な

実習のために経験学習サイクルがうまく回転しなかった可能性もあるが、生徒が情報Iを未履修であったことや、技術的な支障(Q02-Q03)、生徒のIT習熟度・個人差に起因するとも推察される。ただし、この点については、さらなる検証が必要である。

6.4 高校C

高校Cにて、2024年12月18日に、連続2コマで本パッケージのフルセットの実習を実施した。検証への参加者は物理専攻の高校2-3年生、合計6名、全員が情報Iを未履修であった(属性のまとめは表2に示されている)。1グループ3名、計2グループに分けて実習の標準フローを実施した。内省の履歴収集には付箋を用いた。プレ・ポストテストの結果は、総合点が表4、関心度が表5にまとめられている。アンケートのまとめが表8である(より詳細なデータは豊崎(2025)で参照できる)。LAN構築時には、経験学習サイクルをグループ1では4回、グループ2は3回まわすことができた。IPアドレス演習は、グループ1は2回サイクルを実施できたが、グループ2は時間が足りず、高校Bと同様に、筆者らがMR操作を代行し、生徒たちが試行錯誤しつつ操作の指示を出す形で行った。

プレ・ポストテストの結果の差分(表4)を見ると、スコアの平均点は3.33から8.50へと大きく向上し、スコアのバラツキも小さくなった。内訳は、問1が0.50から4.67、問2が1.17から0.83、問3が1.17から1.17(同一)、問4が0.50から1.83へと変化した。問1の向上は著しい。MRシステムによる視覚的・空間的支援の有効性が伺える。

関心度(表5)は平均値もバラツキも少し増加した。これは、実習前には、ほぼ全員が尺度4だったが、実習後には尺度4-6に分散した結果なので、この結果を危惧する必要はないと考える。

アンケート(表8)は、現実感(Q08-09)以外は高校Aと似た傾向である。MRの没入感(Q01-Q05)は、おおむね良

好で、経験学習サイクル(Q06-Q07)は有効に動作したことを示唆している。

現実感(Q08)が紙とMRで差がない。高校AとBではMRの現実感が高く評価されたが、高校Cでは現実感に違いがないという回答結果である。これは生徒の物理専攻という属性で説明できるという印象を受ける。物理の場合、日常的に物体の軌道やバネの動作といった抽象的なものを数式で扱う練習をしている。それゆえ、紙の実習でも、一定のイメージを構成できる生徒たちのため、差が生じなかったと推測している。

新たな気づき(Q11)では『「光コンセント→ONU→ルータ(WAN)→ルータの数字から各機器」というのをしっかり理解すれば構築ができることを学んだ」(原文ママ)というMRでの体験をフローチャートのような論理モデルとして概念化できている様子が伺える。自由記述(Q12)では「光回線やファイバーケーブルなど普段見るようなことが少ないものでもよりリアル的に表現してくれる」といった視覚的支援の有用性を示唆するコメントが散見される。また、感想(Q13)では「普段の授業よりも楽しかったし何より興味を出すことができました」という声もあり、本学習パッケージが生徒の好奇心を刺激し能動的学習を促したことが推察される。高校Cの記述は、個別の事例ではあるものの、情報I未履修の生徒であっても、本パッケージのMRシステムを通じてネットワークを体系的に理解しうることを示唆している。

6.5 本検証のまとめ

高校Aは、ほぼ全ての項目で高い学習効果を示した。高校Bは他の2校に比べ、全般的に低調で、アンケートの中で、経験学習サイクルの項目(Q06)の評価が顕著に低い。高校Cは高校Aに似た傾向を示すが、アンケートの「現実感の比較」(Q08)で紙とMRの差がないという特色を示した。高校AとCは情報I履修・未履修という点で対比をなしているが、両校とも本パッケージは有効に動作していたことが伺える。すべての高校で、アンケート「自信の比較」(Q09)と「推奨度」(Q10)は紙よりもMRが高い評価を得ており、本パッケージの有効性を示唆している。ただし、高校Cの自信度(Q09)においては、紙とMRの差が小さい。高校Aでは、生徒が高い自信を持てているが、高校Cでは本パッケージの効果が限定的である。高校AとCの相違点として、高校Aでは情報Iを履修済みだが、高校Cでは未履修という生徒の属性差がある。高校Aの生徒は既存の知識をよりよく統合することで高い自信につながったと推察される。

どの高校でも、プレ・ポストテストでは(視覚的な要素が強い)LAN構築(問1)やIPアドレス演習(問4)の正答率が大きく伸びた。ただし問4の解釈には検討の余地がある。上述のように、高校Aは本パッケージを設計どおりに実施できたが、高校BおよびCのIPアドレス演習は筆者らが補助した。しかしながら、筆者らはMR操作の代行に

徹しており、生徒たちはディスプレイに表示される仮想空間を見ながら、試行錯誤しつつMR操作の指示を出しIPアドレス演習を行った。よって、MRシステムによる視覚的・空間的支援には一定程度の寄与があると考えられる。

7 議論

7.1 本学習パッケージの有用性

上述の本検証により、次の3つの有用性を確認できたと考えている。第一に、MRによる実体験は学習者の視覚的・空間的な理解を助ける。第二に、経験学習が学習者の段階的な理解を助ける。第三に、これらの相乗効果により、学習者のネットワークに対する理解を促し、関心を高めることが可能となる。

プレ・ポストテストを比較すると、実習体験後には、空間的な理解を問う設問(問1)の正解率が伸びている。問1(配点は5点)の平均点の変化は、高校Aが3.13から5.00、高校Bが0.50から2.33、高校Cでは0.50から4.67であった。その一方、非空間的な設問も、おおむね正解率は上昇するが、その伸びは空間的な設問ほどではない。全高校で、アンケートの「MR教材の操作性と没入感」(Q01-Q05)における「視覚的自然さ」「接続操作の自然さ」「音の自然さ」(Q01, Q04, Q05)はポジティブな評価となった。アンケートの自由記述でも、紙の実習とは異なり「実際に・立体的に表示され、わかりやすい」といった視覚・空間に関連した言及が多い。これらは学習者の視覚的・空間的な理解を支援するMRシステムの有効性を示唆している。

経験学習サイクルによる学習者の段階的理解の様子は、実習時の観察とグループワークの履歴(表9)から推察できる。生徒は、初期段階では無作為な試行をしているが、サイクルが循環するうちに、機器の役割や接続の仕方を理解してケーブルを接続するようになる。学習者も、経験学習サイクルを回すごとに理解が深まると感じている(Q06)。また、V3システムで追加されたアドバイス機能は、学習者の内省を支援する。実際、学習者はアドバイス機能が有用と感じている(Q07)。本機能が生徒の内省を助ける様子も観察できている。

本学習パッケージは、MRシステムと経験学習モデルにもとづく実習を統合したものである。この二つの要素が互いを補完しあい、その相乗効果が学習者の理解・関心を高めると考えている。

学習者はITインフラの経験がない生徒である。ケーブルやルータなどのネットワーク機器の知識を持っていたとしても、それらの具体的なイメージは無く、知識が互いに結びついていない。

抽象的で学習が困難とされるネットワーク分野では、具体的なイメージを持つことが出発点である。MRの視覚的支援は学習者におおむね良好に評価されており(Q01, Q04, Q05)、経験学習サイクルの出発点である具体的経験として有益である。アンケートの自由記述でも、MRによる立体機器の表示や疑似的なケーブルの抜き差し体験に対して

表 9 経験学習サイクルの各段階に対応するグループワークの対話履歴 (原文ママ)

経験学習のサイクル	高校A	高校B	高校C
(1) 具体的経験	分かんないけど1番に刺す, LAN ケーブルをとにかくルーターに繋ぐ	とりあえず刺してみる, 右の方に接続口をずらしてみる, ONUを入れ替えた	WANのポートにLANをつなぐ, ルーターからLANケーブルをつなぐ
(2) 内省 (気づき)	255という数字が怪しい, ネットワーク機器をルータとつなぐ, プリンタにLANケーブルを繋いでいない	不正解, ワイファイのラン接続が違う, LAN WANの違いからケーブルを変えた	ルーターの接続口を間違えるとLANとWANにつなげない, ルーターとONUを繋げると良い
(3) 抽象的概念化	ONUにルータ機能ない⇒ルータに繋ぐ, ONUで光⇒電気, ルーターから各機器にネットを分配している	WANと書いている方に光ファイバーを刺す	光コンセント⇒ONU⇒ルーターのWAN⇒LANから各機器へ

好意的な反応が得られている。MRシステムは本パッケージの有用性を高めていると考えられる。

経験学習サイクルが進むにつれ, 学習者は内省し, 少しずつ概念化を進める。内省を支援するために, 本パッケージではグループワークによる対話を促している。それだけでなく, MRシステムには適切なアドバイスを出す機能もあり, 学習者は, その機能を有益と感じている (Q07)。また, ケーブルの誤接続など試行錯誤させる工夫もある。経験学習サイクルが回転するにつれ, グループ内では対話が行われ, あらたな知見が得られ, 無作為な試行が意味のある作業に変わっていく。その様子はグループワークの対話履歴 (表9) や実習の観察から推察できる。

経験学習サイクルの各段階と対応するグループワークの対話履歴の例を表9に示す。表9からサイクルに沿った段階的理解の様子が伺える。とりあえずLANケーブルを刺してみるといった無作為な試行 (具体的経験) が, ポートの間違いといったエラーの気づき (内省) を経て, 抽象的概念の獲得に至る兆候が認められる。特に, 高校Aの「ONUにルータ機能ない⇒ルータに繋ぐ」 (原文ママ) や, 高校Cの光コンセントから各機器への接続をフローチャートのように構造的に把握した履歴は, 実習中の試行錯誤が単なる操作の習得に留まらず, ネットワークの論理構造といった抽象的な概念の獲得に至ったことを示唆する事例といえる。

本パッケージの活用は, 主体的・対話的で深い学び (文部科学省, 2018) を実現するための有効なアプローチとなり得る。深い学びとは, 科目特有の見方を働かせ, 知識を相互に関連させ, 考えを形成 (概念化) していくこととされる。抽象度の高いネットワーク分野特有の見方は具体性と考えられる。MRシステムは学習者がネットワーク機器やケーブルの具体的なイメージを持つことを支援し, 本パッケージの経験学習サイクルが主体的で対話的な進行を促す。そして, 経験学習サイクルが循環するにつれ, 単なる知識が相互に関連しあい概念が形成されていく。その結果, プレ・ポストテストの正解率の向上 (表4) や知見数の向上 (Q11), 関心度の向上 (表5) が一定の水準に達したと推察される。

以上の結果から, MRの提供する視覚的・空間的なリアリティと失敗を恐れず試行錯誤できる環境そして経験学習の相乗効果により, 本パッケージが学習者の興味と理解の向上に大きく寄与したと考えられる。

8 おわりに

本研究では, 高校のネットワーク教育において, MR技術とKolbの経験学習モデルを組み合わせたアプローチが以下の教育効果を持つことを示唆する結果が得られた。(1) MR体験は視覚的・空間的理解を促進する。(2) 経験学習サイクルは生徒の知識と技能の関連付けを段階的に支援する。(3) そして(1)(2)の相乗効果が生徒のネットワークに対する理解と関心の向上をもたらす。

引用資料

- Castillo-Castro, C., Angel-Urdinola, D.F. & Hoyos, A. (2021), “Meta-Analysis Assessing the Effects of Virtual Reality Training on Student Learning and Skills Development”, Policy Research Working Paper; No.9587
- Daling, L.M. & Schlittmeier, S.J. (2024), “Effects of Augmented Reality-, Virtual Reality-, and Mixed Reality-Based Training on Objective Performance Measures and Subjective Evaluations in Manual Assembly Tasks: A Scoping Review”, Hum Factors. 2024, 66(2), p.589–626. doi:10.1177/00187208221105135
- Doernyei, Z. (2002), “Questionnaires in Second Language Research: Construction, Administration, and Processing”, Routledge; 邦訳: ゴルタン・ドルニエイ (著), 八島智子 (翻訳), 竹内理 (翻訳), “外国語教育学のための質問紙調査入門: 作成・実施・データ処理”, 松柏社 (2006)
- 後安謙吾・井口信和 (2019), “MR環境を用いたネットワーク演習システムにおけるLANケーブルに起因する障害対応シナリオ”, 情報処理学会 第81回全国大会, p.607–608
- Kaplan, A.D., Cruick, J., Endsley, M., Beers, S.M., Sawyer, B.D. & Hancock, P.A. (2021), “The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis”, Hum Factors. 2021, 63(4), p.706–726.
- 北村祐稀・長瀧寛之・井手広康・兼宗進・白井詩沙香 (2024), “TCP/IPの仕組みを体験的に学ぶシミュレータ教材を活用した授業の提案”, 情報処理学会 情報教育シンポジウム論文集 2024, p.124–131
- Kolb, D.A. & Plovnick, M.S. (1974), “The experiential learning theory of career development”, M.I.T. Working Paper 705-74.

- Kolb, D.A. (1984), "Experiential learning: Experience as the source of learning and development", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- 小松一智 (2024), "情報 I で行ったネットワーク構築の授業実践", 第17回全国高等学校情報教育研究会全国大会
- 前田健太郎 (2022), "問題解決型・協働で「情報 I」を学ぶ BYOD 端末に保証手厚く＜北海道札幌北高等学校 教諭 前田健太郎氏＞", 教育家庭新聞, https://www.kknews.co.jp/post_ict/20221205_6d (閲覧日: 2025年10月20日)
- 松尾睦 (2011), "職場が生きる 人が育つ「経験学習」入門", ダイアモンド社
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994), "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays", IEICE Trans. Information Systems, vol. E77-D, no.12. p.1321-1329
- 文部科学省 (2018), 高等学校学習指導要領 (平成30年告示) 解説 情報編
- 文部科学省 (2022), 高等学校学習指導要領 (平成30年告示)
- 文部科学省 (2024), 令和6年度「専修学校による地域産業中核の人材養成事業」「電気通信工事業界のための高等学校及び専門学校連携による人材育成モデル構築事業」成果報告書
- 中山泰一・中野由章・角田博保・久野靖・鈴木貢・和田勉・萩谷昌己・笥捷彦 (2017), "高等学校情報科における教科担任の現状", 情報処理学会論文誌, TCE 3 (2), 41-51.
- 大谷信介・木下栄二・後藤範章・小松洋・永野武 (2005), "社会調査へのアプローチ 第2版: 論理と方法", ミネルヴァ書房
- 坂本泰伸・稲垣忠・沼田織花 (2022), "高等学校教科「情報 I」における指導上の課題に関する調査結果の報告", 東北学院大学教養学部論集, No.189, p.39-52
- 程秋涛・長谷川忍 (2017), "電気現象を可視化するMR電気回路実験システムの提案", 人工知能学会 先進的学習科学と工学研究会, 2017, 81巻, 81回 (2017/11), p.30-33. https://doi.org/10.11517/jsaialst.81.0_06
- 豊崎駿佑 (2023), "MRを用いたネットワーク学習教材の開発", 公立千歳科学技術大学 卒業論文
- 豊崎駿佑・上野春毅・山川広人・深町賢一・小松川浩 (2023), "MRを用いたネットワーク学習教材の開発", 第48回教育システム情報学会全国大会
- 豊崎駿佑・上野春毅・深町賢一・小松川浩 (2024), "MRを用いたネットワーク学習教材の評価", 第49回教育システム情報学会全国大会
- 豊崎駿佑 (2025), "MRを用いた高校情報 I 向けのネットワーク学習教材に関する研究", 公立千歳科学技術大学大学院 修士論文

受付日 2026年1月1日, 受理日 2026年3月19日

J-STAGE 早期公開日: 2026年5月1日