

機械工学分野における次世代 VR 教材の開発： 学生との協働による実践的課題解決の試み

木村 祐人* 久保 柁護** 加藤 大輝** 高谷 秀明*

Collaborative Development of Next-Generation VR Education Tools for Mechanical Engineering: A Practical Approach to Problem-Solving with Students

Yuto KIMURA, Togo KUBO, Daiki KATO, and Hideaki TAKATANI

Abstract

Intuitive understanding of spatial relationships and invisible physical phenomena, such as vector fields, remains a significant challenge in mechanical engineering education. To address this issue, we developed next-generation educational tools using Virtual Reality (VR) and pseudo-haptics technologies. This project was conducted as a collaborative effort between a faculty member and fifth-year students at a National Institute of Technology (KOSEN), aiming to solve practical educational challenges. First, a VR application for learning third-angle projection was developed and iteratively improved based on user feedback. A preliminary experiment demonstrated its effectiveness in enhancing learners' self-efficacy. Second, a novel pseudo-haptics system was prototyped to represent vector fields. By dynamically manipulating the Control/Display (C/D) ratio, this system induces the illusion of physical resistance without requiring expensive haptic devices. Furthermore, this collaborative development process significantly promoted students' self-directed learning. It allowed them to acquire new IT skills and shift their mindset from simple developers to user-centric system designers. This report highlights both the technical potential of these immersive tools and the substantial educational value of incorporating practical, student-faculty collaborative projects into the engineering curriculum.

Keywords : Virtual Reality, Pseudo-Haptics, Engineering Education, Spatial Visualization, Project-Based Learning

1. 緒言

工学教育において、数学で学ぶ普遍的な概念と図形・立体などの空間イメージとを結びつけて理解することは、学習者がより深い理解に到達し、高度な専門科目を学習する上で重要である。例えば、機械工学においては、図形を頭の中でイメージする空間認識能力は、正しく部品の形状を把握して図面におこす能力や、自

身が着想した機械部品を実際に加工・組み立て可能な形に落とし込む能力に直結する。また、ベクトルやベクトル場、テンソルなどは、材料力学や流体力学などの専門科目の基礎言語となっている。このように、工学において数学は現象を記述するための「言語」としての側面を持っており、専門教育を受ける上で数式と図形的なイメージの結びつきは必須の素養である。

高等専門学校においては、低学年から専門科目が段階的に配置される「くさび形教育」が実践されている。しかし、普通高校から大学に進学した学生に比べ、短

* 香川高等専門学校機械工学科

** 香川高等専門学校機械工学科 第5学年

い期間で専門教育への準備を終える必要があるため、数学や理科の授業進度は自ずと早く、学生の負担は非常に大きい。空間イメージの構築には個人差があり、一度講義についていけなくなると、問題の解き方のみを暗記する形式的な学習に留まってしまう懸念がある。これを防ぐためには個別のフォローアップ体制が必要であるが、教員の人的リソースには限界がある。この状況に対する打開策として、「オンデマンドで反復学習が可能」かつ「2次元的な表現にとどまらない豊かな表現力を備え、数式と普遍的な概念との結び付きを直感的に想像できる」デジタル教材の開発が求められている。

この要件を満たす強力な手段として、仮想現実 (Virtual Reality, 以下 VR) 技術が挙げられる²⁾。近年の安価なスタンドアロン型 VR ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の普及により、教育現場への導入ハードルは大きく下がった。VR は、使用者の身体操作 (頭の回転や移動) に追従して 3 次元空間を提示できるため、一般的な二次元ディスプレイに比べて極めて没入感が高く、立体の自由な観察や直感的な操作が可能である。先行研究においても、室伏らが中学校の展開図学習に VR を導入し、学習者の興味関心が明らかに向上したことを報告している³⁾。この「学習者の動機付けを高める」という特性は、高専教育におけるフォローアップ教材として極めて重要な利点である^{3),4)}。

上述の教育的課題は本校の機械工学教育においても顕著であり、直感的学習ツールの導入は喫緊の課題であった。著者自身は VR コンテンツ開発の専門家ではなかったが、VR 技術の教育的ポテンシャルと、未知の技術に対する高専生の高い学習意欲および適応力に着目した。そして、2024 年度より卒業研究の枠組みの中で、教員と学生が協働し、実践的な課題解決プロセスとして VR 教材の開発とその検証を段階的に進めてきた。

本報では、2 年間の取り組みを通じて得られた試作教材 (第三角法および擬似触知覚^{5) 6)} を利用したベクトル場提示) の概要と、それをを用いて実施した小規模実験の結果を報告する。さらに、これら一連のシステム構築プロセスを通じた学生指導の教育的効果と今後の展望について述べる。

2. 第三角法学習用 VR 教材の開発と試行

2.1 第三角法学習における課題と教材の要件定義

第三角法は、JIS (日本産業規格) の機械製図において原則として用いられる投影法である。これは平行

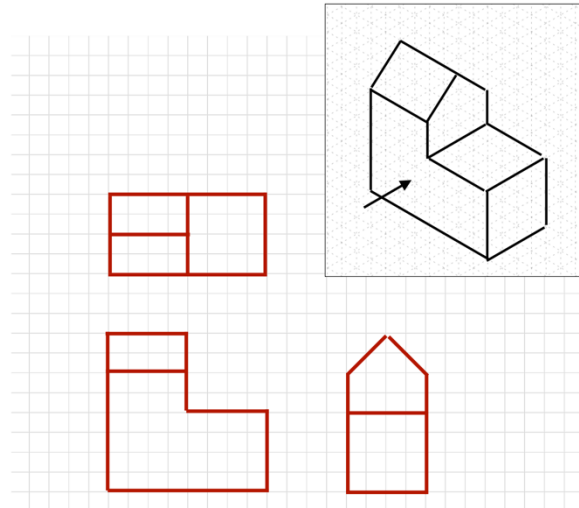


図 1 第三角法を学習する際の典型的な練習問題の一例。等角投影法を用いて立体の形状が提示され、学習者は三方向から見た立体の形状を頭の中でイメージし、投影図を回答する。

投影法 (正投影法) に分類され、視点から対象物までの距離に関わらず、実際の寸法や形状を正確に図面上へ表現できる特徴を持つ。一般的には、対象物の形状を最もよく表す正面図を基準とし、上側から見た平面図を正面図の上側に、右側から見た右側面図を正面図の右側に配置する「三面図」として立体を表現する。

基礎的な製図の学習において、与えられた等角図等から三面図を作成する課題 (図 1) が頻出する。この際、学習者は「頭の中で立体を任意の角度に回転させる」操作と、「それを特定の 2 次元平面に投影する」という二重の認知的変換を行う必要がある。この過程は空間認識能力に依存するため難易度が高く、機械工学を学び始めた高専低学年の学生がつまづきやすい主要な要因の一つとなっている。

このような課題を解決する VR 教材を開発するにあたり、本研究では教員と学生の協議のもと、以下の要件を設定した。

第一に、提示された立体を「単に観察する」だけでなく、「学習者自身の手 (コントローラー) で直接回転操作できる」ことである。これにより、立体を任意の角度から連続的に眺める身体的体験が得られ、メンタルローテーション (頭の中での立体回転) 能力の醸成が期待できる。

第二に、特定の視点から見た際の「2 次元投影図の変化をリアルタイムに確認できる」ことである。ここで、VR 空間内での立体提示は人間の視覚に近い「透視投影」で行われるため、HMD 上に表示される立体の見え方と、実際の製図における「平行投影」の図形には幾何

学的な差異が生じる。この問題を解決するため、教材内の仮想空間に平行投影を描画する擬似的な図面ボードを配置する。学習者が手元の立体を直感的に回転させると、それと連動して図面上の三面図がリアルタイムに更新される仕組みを実装することで、第三角法の投影ルールと三面図の対応関係をより深く理解させることができると考えられる。

以上の要件とコンセプトに基づき、2024年度よりプロトタイプ教材の開発に着手した。

2.2 システム構成とプロトタイプの実装

2024年度に着手したプロトタイプ教材の開発環境およびシステム構成について概説する。ハードウェアとしてスタンドアロン型HMDであるMeta Quest 3を使用し、ソフトウェアの開発プラットフォームにはゲームエンジンであるUnityを採用した。また、教材内で課題として提示する3DCGモデル(対象物の立体形状)のモデリングには、統合3DCGソフトウェアであるBlenderを用いた。

学生の主体的な技術習得と継続的な開発作業により、初年度末となる2025年2月に初期プロトタイプ教材が完成した。図2(a)に実行画面のスクリーンショットおよび使用風景を示す⁷⁾。学習者はHMDを装着し、専用コントローラーを介して仮想空間内のオブジェクトとインタラクションを行う。空間内には「正しい投影図を選べ」という設問テキストと共に複数の選択肢(三面図)が提示される。設問の傍らには課題となる立体モデルが配置されており、学習者はコントローラーを用いて直感的に立体を把持(Grab)し、任意の軸回りに自由に回転させることができる。この身体的な操作を通じて立体形状の空間的な理解を深めた後、パネル上のボタンをポインティングして解答を選択する。選択結果に対しては、正答時に「○」、誤答時に「×」の視覚的なフィードバックと簡潔な解説が即座に提示され、正解するまで再挑戦が可能な反復学習システムとした。

VR開発のノウハウが全くない状態からのスタートであったが、担当学生の熱心な試行錯誤に支えられ、前述の要件を満たす基本システムを構築することができた。一方で、初年度はUnity等のアプリケーション開発における基礎技術の習得や環境構築に多くの時間を要したため、実際の授業環境を想定した評価実験を実施するには至らなかった。また、UI(ユーザーインターフェース)の観点においても、初めてVRを体験する学習者に対する操作説明(チュートリアル)が不足している等、コンテンツ設計上の課題も浮き彫りとなった。しかしながら、研究室所属の学生を対象とした予備的

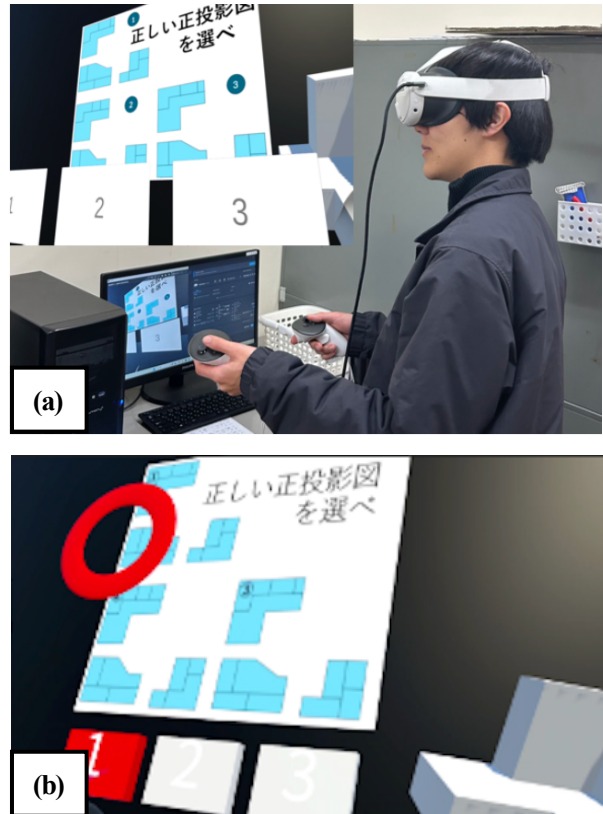


図2 2024年度に作成したプロトタイプ教材⁷⁾。(a)教材を使用している様子。学習者はコントローラーを用いて立体を回転し、立体の各方向からの形状を確認した後に回答を選択できる。(b)回答を選択すると、正解が確認できる。

な試用テストにおいては、「立体を直接操作できるため図面との対応がイメージしやすい」といった好意的な感触が得られており、次年度の本格的な教材化に向けた十分な手応えを確認した⁷⁾。

2.3 教材のブラッシュアップと授業計画の立案

2025年度は、前年度に抽出された課題の解決と、実際の教育現場への導入を見据えた教材のブラッシュアップを実施した。開発を担当した学生の継続的なスキル向上のもと、2025年8月に開催された本校のオープンキャンパスにおいて、来場した中学生を対象に試作版の体験会を実施した。この体験会で得られた外部ユーザーからのフィードバックに基づき、教材のUI(ユーザーインターフェース)の大幅な改修を行った。具体的には、初めてVRを体験する学習者がスムーズに没入できるよう、導入部のチュートリアル(VR機器の操作説明)を従来の文字中心のテキスト形式から、図解や視覚的な矢印を用いた直感的な形式へと変更した⁸⁾。

さらに、仮想空間内での立体操作におけるユーザビ

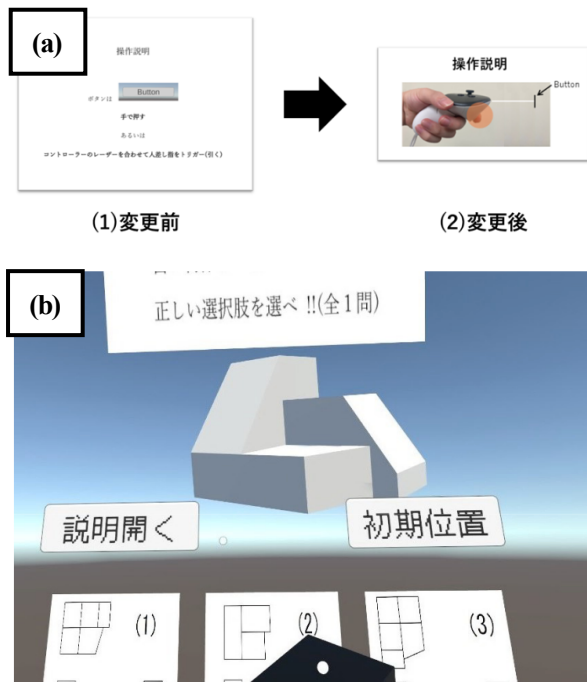


図3 2025年度に作成した教材の概要⁸⁾。(a)教材導入部で提示される操作説明。画像を多用し、直感的に理解しやすくなるよう工夫を行なった。(b)問題出題シーンのスクリーンショット。手元の立方体で立体を回転したり、補足説明の表示や立体の位置の初期化ボタンを配置したりするなど、UIを改善した。

リテリ向上のため、操作体系を再設計した。前年度は対象となる立体を直接把持する形式であったが、本バージョンでは課題となる立体を問題パネルの奥側に提示し、学習者の手元には操作用の「立方体(プロキシオブジェクト)」を配置する構成とした。学習者が手元の立方体をGrabして回転させると、奥側の課題立体が同期して回転する仕組みである。これにより、学習者は解答の選択肢と課題立体を同一視野に収めながら、手元の直感的な操作で立体を様々な角度から観察することが可能となった⁸⁾。

教材の開発と並行して、本教材を実際の授業に導入し教育的効果を測定するための学習シナリオ(授業計画)を立案した⁸⁾。対象を高専1年生とし、機械工学科の導入教育(オリエンテーション等)における授業0.5コマ(45分間)を活用する実践的な運用形態を想定した。1クラス42名の学生を6~7名ずつの6班に分割し、ローテーション形式でVR体験を実施する計画である。具体的な学習フローとしては、まず5分間のペーパーテスト形式による事前課題に取り組み、続いて5分間VR教材を用いて同様の空間認識課題に取り組みせる。実施中は、教員1名と補助学生(TA)1名が操作サポートおよびトラブルシューティングのために

待機する体制を敷く。両方の課題を終えた後にアンケート調査を実施し、従来の紙媒体のみの学習と比較した際のVR教材の学習効果や、操作性に関する検証を行う計画とした。

2.4 小規模実験の実施と評価

開発した教材の有用性および操作系の妥当性を検証するため、本校の機械工学科5年生5名を対象とした小規模なプレ実験を実施した。被験者には、まず従来の紙媒体による第三角法の課題(等角図から正しい三面図を選択する問題)に取り組みせ、その後、VR教材を用いて同等レベルの課題に取り組みさせた。課題終了後、解答に要した時間および正誤の記録に加え、学習効果やUI(ユーザーインターフェース)の比較に関するアンケート調査を実施した。

表1 紙媒体・VR教材における課題所要時間(N=5)⁸⁾

測定項目	平均時間(秒)	最小値-最大値(秒)
紙媒体解答時間	42.2	33-53
VR導入時間	40.0	16-60
VR教材解答時間	54.2	34-82

実験の結果、紙媒体での解答所要時間は平均42.2秒(最短33秒, 最長53秒)であったのに対し、VR教材での解答所要時間は平均54.2秒(最短34秒, 最長82秒)であった。VR教材の方が解答にやや時間を要する傾向が見られたが、これは操作の手間ではなく、学習者が立体を任意の角度からじっくりと観察し、メンタルローテーション(頭の中での立体回転)のプロセスを視覚的に確認・反復するVR特有の体験に時間を費やしたためと推察される。

特筆すべき点として、教材導入部におけるVR操作方法(チュートリアル)の理解に要した時間は平均40.0秒(最短16秒, 最長60秒)と極めて短時間であった。これは、前節で述べた中学生向けの体験会でのフィードバックを経て、学生が文字中心から図・矢印を用いた直感的な解説へとUIを改修した結果が明確に表れた結果であり、本教材が実際の授業(45分間)の限られた時間内でも十分に運用可能であることを示している。

課題の正誤については、対象がすでに空間認識能力を十分に培っている5年生であったため、紙・VRともに全員が正解(正答率100%)となり、成績面での有意な差は生じなかった(天井効果)。しかしながら、「紙とVRのどちらの解答に自信があるか」という設問に対し

ては、被験者 5 名全員が「VR」と回答し、「分かりやすい」という回答も VR が多数 (4 名) を占めた。紙媒体では「おそらく合っている」という推測が含まれるのに対し、VR 教材では「自身の操作と視覚で確認したから確実に合っている」という確信へと変化していることが伺える。この「自己効力感の向上」は、図学や空間認識に苦手意識を持つ低学年学生のフォローアップ教材として極めて強力な利点となる。

さらに、VR 教材における立体の提示方法に関して、興味深い知見が得られた。被験者に提示方法①：立体を問題パネルの奥に提示し、手元の代替キューブ (プロキシ) で回転させる方式と提示方法②：対象立体を手元に提示し、直接グラフして回転・拡大縮小させる方式を比較させた。「プレイしやすさ (操作の楽しさ)」の観点では、直接操作である方法②が支持された (3 名、同程度 1 名、① 1 名) が、「学習教材としての形式の良さ」の観点では、操作と表示を分離した方法①が支持された (3 名、同程度 0 名、② 2 名)。この結果は、エンターテインメントとしての「ゲーム性」と、学習ツールとしての「教材性」にトレードオフが存在することを示唆している。直感的な直接操作 (方法②) は手元への視線移動が生じたり、自身のコントローラーが問題の視界を遮ったりする欠点がある。学生が教育的観点から考案し実装した方法① (プロキシ操作) は、解答群と課題立体を同一視野に収めながら落ち着いて比較検討できるため、学習用 UI としてより妥当であったことが被験者の評価からも裏付けられた。

以上の結果から、学生との協働によって開発・改良された本 VR 教材は、直感的な操作性と学習への高い動機付け (自信の付与) を両立しており、低学年の機械工学基礎教育におけるフォローアップツールとして十分な有用性と発展性を有していることが確認された。

2.5 授業導入に向けた課題と他教科展開への展望

本章で開発した第三角法 VR 教材は、直感的な操作性と学習への高い動機付けを両立しており、低学年のフォローアップツールとして十分な有用性が確認された。今後の実際の製図授業への導入に向けた技術的課題として、2.1 節の要件で掲げた「透視投影と平行投影の差異を埋める、リアルタイムな 2 次元投影図の連動表示ボード」の実装が挙げられる。次年度は本機能をシステムに統合し、仮想空間での立体操作を実際の機械製図スキルへと直接的に結びつける教育ツールとしての完成度を高めていく。

さらに、空間認識能力の育成という共通課題に対し、図学のみならず他教科との分野横断的な連携も模索し

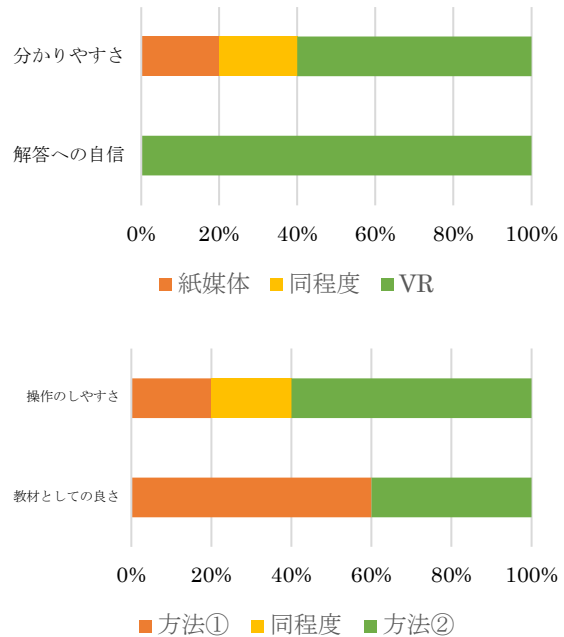


図 4 高専機械工学科 5 年生を対象に実施した小規模実験の結果⁸⁾。(a) 紙媒体教材と VR 教材を用いた課題解答における主観評価の比較(N=5)。(b) VR 空間内における立体の提示・操作方法の評価比較(N=5)。

ている。例えば、力学や数学では、3 次元空間における力やモーメント、ベクトルが重要な学習概念であるが、従来の黒板やスライドによる授業方式では、学生が空間的イメージを直感的に掴みにくい場面が多い。これを解決するためのアプローチとして、VR を活用した授業支援ツールの開発が進められている⁹⁾。本ツールは、教員がヘッドマウントディスプレイを装着して VR 空間内の 3 次元オブジェクトを操作 (回転・拡大縮小・ペンによる書き込み) しながら、その様子をリアルタイムにスクリーンへ投影して学生へ提示するものである。これにより、数式と幾何的な空間イメージを結びつけた可視化授業の実現に向けた基礎的な検討が進められている。

このように、図学教育における直感的な立体把握 (本章) や、数学教育における数式の空間的な可視化 (基礎検討) など、低学年段階から VR を用いた空間学習を体系的に導入していくことは、学生の工学的な基礎力を底上げする上で極めて有効なアプローチであると考えられる。そして、これらの基礎教育で培われた空間的なイメージ能力は、次章で述べる「ベクトル場」のような、より高度で見えない物理現象を理解するための重要な土台になると期待される。

3. 擬似触知覚を用いたベクトル場提示の基礎検討

3.1 ベクトル場理解における課題と擬似触知覚(Pseudo-Haptics)の導入

機械工学の専門教育において、低学年で培った数学的・図学的な基礎は、高学年における流体力学の速度場や、材料力学・弾性力学における応力場といった「ベクトル場」の学習へと接続される。しかしながら、これらの物理現象は目に見えないため、学生は偏微分方程式などの数式表現と、実際の空間的な力の分布(現象)を頭の中で結びつけることに苦労することが多い。

この課題に対し、視覚的な情報(カラーマップや矢印等による可視化)だけでなく、学習者自身の身体的な感覚(力覚・触覚)を通じてベクトル場を体感させるアプローチが極めて有効である。従来、このような体験を提供するためには、モーター等を備えた物理的な力覚提示装置(ハプティックデバイス)が必要であった。しかし、これらの専用機器は高価かつ大型であり、高専の教室や実習室において多人数を対象とした教育環境に導入することは現実的ではない。

そこで本研究では、特別なハードウェアを追加することなく、標準的なVR機器(HMDとコントローラー)のみで力覚を提示する手法として、「擬似触知覚(Pseudo-Haptics)」の技術に着目した。擬似触知覚とは、人間の脳が複数の感覚情報(視覚と体性感覚など)を統合する際、視覚情報が優位に働きやすいという認知科学的な特性を利用し、物理的な力が発生していないにもかかわらず、視覚的な錯覚によって「重さ」や「抵抗感」を感じさせる技術である。この手法を工学教材に導入することで、安価かつ展開容易な次世代の体感型学習システムが構築できると考え、プロトタイプ開発に着手した。

開発においては、担当学生の熱心かつ主体的な取り組みにより、2025年7月には基礎的なC/D比操作によって重量感や抵抗感を提示する初期プロトタイプが完成した。続く8月に開催された本校のオープンキャンパスにおいては、来場した中学生らに本システムを体験してもらい、次世代教材としての初期的な手応えを得ることができた。

3.2 C/D比操作を用いた抵抗感提示モデルの設計

擬似触知覚をVR空間内で実現するためのアルゴリズムとして、本教材ではC/D比(Control/Display Ratio)の動的制御を採用した。C/D比とは、現実世界における学習者の手(コントローラー)の移動量(Control)と、仮想空間内に描画されるオブジェクトの移動量

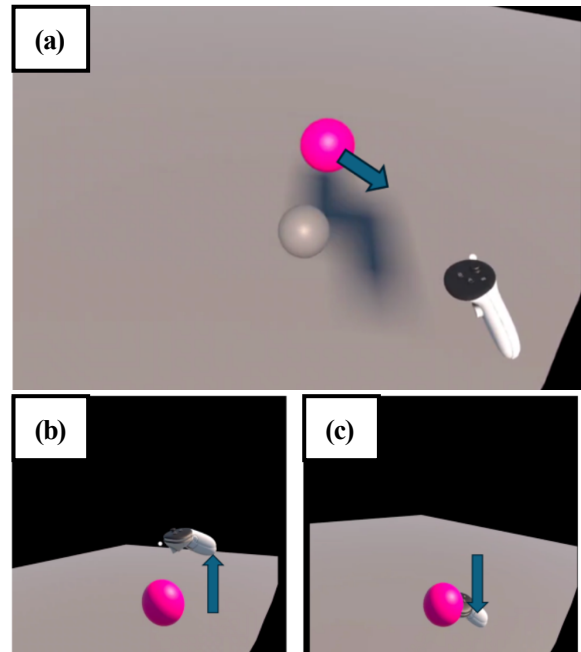


図5 擬似触知覚技術を活用したベクトル場に関するプロトタイプ教材のスクリーンショット¹⁰⁾。(a) 灰色球を重力源とするベクトル場の影響を受けピンク色の対象物体が移動する様子。(b) 把持物体の移動方向(矢印)に対し、ベクトル場が逆行する場合の移動の様子。(c) 把持物体の移動方向(矢印)に対し、ベクトル場が順行する場合の移動の様子。

(Display) の比率を指す。

本プロトタイプにおける擬似触知覚の提示手法として、学習者の身体感覚(固有受容覚)を阻害しないよう、仮想空間内の「アバターの手」の座標は現実のコントローラーと常に一定(1:1)で同期させる設計とした。その上で、学習者が仮想空間内で「物体を把持して移動させる」際の、「把持した物体」の移動量に対してのみC/D比の動的制御を適用した。

具体的には、仮想空間内に目に見えない「ベクトル場(仮想的な流体や力の場)」を定義する。学習者が物体を把持して動かした際、その操作方向とベクトル場の向きとの関係性(内積)をリアルタイムに計算し、把持物体の移動量(Display)を決定する。例えば、学習者がベクトル場(流れ)に逆らう方向へ物体を動かそうとした場合、物体の移動量が手の移動量よりも小さくなる(C/D比が大きくなる)よう制御する。このとき視覚的には、手は通常通り動いているにもかかわらず、把持した物体が手のひらから遅れて追従してくる(あるいは手から押し戻されるような)状態となる。

人間の脳は、この「自身の手の動き」と「把持物体の視覚的な位置ズレ」を統合する際、視覚情報を優先し

て「物体が重い」あるいは「見えない力場から強い抵抗力を受けている」と解釈する。逆に、ベクトル場に沿って動かす場合は、物体の動きを手の動きと一致させることで抵抗感の消失を表現できる。本研究では、この視覚と運動の乖離（錯覚現象）を利用し、物理的な反力提示装置を用いずに、三次元空間上のベクトル場の方向や強弱を「把持物を介した身体的な抵抗感」として直感的に提示する基礎モデルを構築した。

3.3 プロトタイプ教材の開発と基礎検討

3.2節で述べたコンセプトをもとに、空間内のベクトル場を直感的に知覚できるプロトタイプ教材を開発した¹⁰⁾。本プロトタイプでは、ベクトル場の具体的な例題として、次式で表される「2つの固定された質点から受ける重力場」を採用した。

$$F(\mathbf{r}) = -mg \left(M_1 \frac{\mathbf{r} - \mathbf{R}_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_1|^3} + M_2 \frac{\mathbf{r} - \mathbf{R}_2}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_2|^3} \right)$$

ここで、 $F(\mathbf{r})$ は位置 \mathbf{r} にある物体が受ける外力であり、 m, M_1, M_2 はそれぞれ把持物体および重力場を形成する2つの固定質点の質量、 G は万有引力定数、 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ はそれぞれ2つの固定質点の位置ベクトルである。

今回は基礎的な錯覚効果の検証を目的とした簡易的な実装とし、ベクトル場 $F(\mathbf{r})$ の向きと把持物体の運動方向(内積の正負)を判定基準とした。ベクトル場と運動方向が逆行する場合はC/D比の値を $k = 0.05$ と小さく設定して強い抵抗感(視覚的遅延)を生じさせ、順行する場合は $k = 1.0$ (遅延なし)として作成した。図5にプロトタイプ教材の動作の様子を示す¹⁰⁾。学習者が物体を把持して空間内を動かすと、見えない重力場の方向に応じて擬似的な力覚が提示される仕組みである。

2025年度は多人数を対象とした学習効果の実験には至らなかったが、開発の中で担当学生が自発的な工夫を凝らし、学習者がコントローラーのトリガーを放して物体の把持を解除した際には、重力場に従って様々な運動する機能を実装した。これにより物理現象としてのリアリティが向上し、本プロトタイプを体験した学生からは「抵抗感を感じられて面白い」「物理や力学の学習にも使えそう」といった好意的な感想が得られた。今後の課題としては、ベクトル場の大きさ(ノルム)に応じたC/D比の連続的な調整アルゴリズムの構築や、授業導入を見据えた教材としての有用性の検証が挙げられる。

3.4 次世代CAE教材に向けた課題と展望

本研究で試作したプロトタイプは、擬似触知覚がベクトル場の直感的な理解に寄与する可能性を示した。

今後は、この基礎フレームワークを機械工学の専門科目におけるより複雑かつ多様な物理現象へと拡張し、従来の視覚的なカラーマップ表示を凌駕する次世代の体感型教材「感じるCAE教材」へと発展させることが目標となる。

具体的な適用領域として、流体力学における円柱周りの後流や翼型に生じる渦の流速場、あるいは材料力学における構造物の内部応力場(主応力線の方向や応力集中)などが挙げられる。見えない力学的な場に仮想的なプローブを挿入し、「どこに強い抵抗が生じているか」を身体的に探索できる教材は、学生の現象理解を飛躍的に深化させると期待される。

一方で、教育現場での運用に向けてはいくつかの技術的課題が残されている。第一に、C/D比制御アルゴリズムの高度化である。本稿のプロトタイプでは運動方向に応じた2値的なC/D比切り替え($k = 0.05$ または 1.0)を採用したが、今後はベクトル場の大きさ(ノルム)と方向の双方に応じた連続的なC/D比の関数化が不可欠である。さらに、C/D比を過度に小さく設定すると、学習者は抵抗感ではなく「システムの遅延(ラグ)」として認知してしまい、錯覚が破綻することが知られている。最適な錯覚を生み出すための認知科学的・精神物理学的な閾値の検証が求められる。

さらに、より長期的な展望として、動的な物理現象とのリアルタイムな連携が挙げられる。現在のプロトタイプは予め数式で定義された静的な場を対象としているが、実践的な工学教材としては、学習者がVR空間内で対象物の形状や境界条件を変更した際に、その結果を即座に「手応え」として感じられることが理想である。しかし、VRの高い描画レートを維持しながら従来の計算負荷の高いCAE解析をリアルタイムに実行することは極めて困難である。将来的には、AI技術を用いた高速な推論(サロゲートモデル等)などの新たな計算手法の適用も視野に入れつつ、低遅延で物理演算とVRを連動させる次世代システムの構築を目指していきたい。

4. VR研究を通じた教育的効果と学生の成長

先に述べた通り、本研究課題に着手する前に著者はVRアプリケーションの開発経験が無く、このテーマで卒業研究を進めることが出来るか未知数であった。いささか主観的な記述になることは否めないが、ここでは本研究課題が持つ教育的効果と、それに伴う学生の成長、および本報の総括について述べる。

第一に、「VRアプリケーションの制作」という明確

かつ魅力的な目標の設定により、未知の技術に対する学生の自己主導型学習が強く促進された点である。学生らは Unity 等の開発環境やプログラミング言語のみならず、3DCG を空間で制御するための数学的知識(座標変換やベクトル演算など)を自発的に習得していった。単なる座学ではなく、「自分の手で仮想空間を構築する」という実践的な目的があったからこそ、高いモチベーションを維持して技術的ハードルを乗り越えることができたと考えられる。

第二に、教員と学生の役割分担が協働プロセスとしてうまく機能した点である。本研究において、著者は機械工学の教員として「教材として満たすべき要件(第三角法の投影ルールや、ベクトル場・物理法則の正確性)」を定義し、学生はそれを「VR という新しい媒体でいかに表現・実装するか」を担当した。教員からの一方的な技術指導ではなく、教員の専門知識と学生の高い IT 適応力を持ち寄る「フラットな共同研究者」としての関係性が構築できたことは、高専の卒業研究における指導の一形態として非常に有意義であった。

第三に、開発を通じた学生の視点の変化である。初期段階では「システムをバグなく動かすこと」に終始していた学生が、オープンキャンパスでの中学生へのデモや、1 クラス 42 名規模の低学年向け基礎教育への導入計画を練る過程で、UI/UX (ユーザー体験) の重要性に気づき始めた。自らチュートリアルを図解に改修し、直感的な代替操作を考案するなど、「開発者」の視点から「学習者 (ユーザー)」の視点へと視野を広げ、柔軟にシステムを改善していくエンジニアとしての著しい成長が見られた。

5. 結言

本報では、専門外の領域からスタートした VR・疑似触知覚を用いた機械工学教材の開発プロセスと、プレ実験を通じたその有用性について報告した。結果として、これらの挑戦は新しい直感的学習ツールのプロトタイプを生み出しただけでなく、学生の主体性と実践的な課題解決能力を大きく引き出す教育的成果をもたらした。今後は、本稿で確立した開発の基盤を次年度の配属学生へと引き継ぎ、「感じる CAE 教材」の更なる高度化や、低学年の基礎教育カリキュラムへの本格的な組み込みを目指して研究・実践を発展させていく。

謝辞

本研究における教材開発の一部は、2024 年度の卒業研究として平田晴己氏 (本校機械工学科令和 6 年度卒業生) が取り組んだ初期プロトタイプの構築を基礎として発展したものである。VR 開発のノウハウが皆無であった段階から、熱心な技術習得により本システムの土台を作り上げた同氏の多大な貢献に対し、ここに深く感謝の意を表す。また、本教材の小規模実験に快く協力してくれた機械工学科第 5 学年の学生諸君に心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) S. A. Sorby, "Developing 3-D spatial visualization skills", *Engineering Design Graphics Journal*, Vol. 63, No. 2, pp. 21-32, 1999.
- 2) 舘 暉, 佐藤 誠, 廣瀬 通孝 (監修), 日本バーチャルリアリティ学会 (編), *バーチャルリアリティ学*, コロナ社, 2010.
- 3) 室伏美佑, 寺田裕樹, 猿田和樹, 陳国躍, 空間図形学習における MR 教材の構築と有用性の評価, 第 29 回バーチャルリアリティ学会大会論文集(2B1-04), 2024.
- 4) Z. Merchant et al., "Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis", *Computers & Education*, Vol. 70, pp. 29-40, 2014.
- 5) A. Lécuyer et al., "Boundary of illusion: an experiment of visual-haptic interaction with a pseudo-haptic system", *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 115-122, 2001.
- 6) A. Lécuyer, "Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-53, 2009.
- 7) 平田晴己, 第三角法に関する VR 教材の開発と評価, 香川高等専門学校 卒業論文, 2025.
- 8) 久保佟護, 第三角法に関する VR 教材の有用性の検討, 香川高等専門学校 卒業論文, 2026.
- 9) 藤本陸都, 直感的な数学的図示を可能にする教材用 VR アプリ開発, 香川高等専門学校 卒業論文, 2026.
- 10) 加藤大輝, Pseudo-Haptics を活用したベクトル場提示方法の基礎検討, 香川高等専門学校 卒業論文, 2026.