

認知症予防を目的とした VR 技術と IoT による新しいコグニサイズシステムの開発

研究代表者 石 田 智 行 福岡工業大学 情報工学部 教授

1 はじめに

近年、仮想現実技術が認知機能低下を解決する技術として注目を集めている。仮想現実技術は高没入感の環境下で、記憶・注意・判断といった認知機能を自然に刺激できる点が特長である。さらに、近年の VR ヘッドセットには高精度な視線追跡センサが標準搭載され、バーチャル空間内での注視をリアルタイムに取得し解析することにより、客観的な認知機能を評価することができる。これにより、VR 環境内で認知機能を測定し、測定結果により提示課題の種類や難易度を変化させることができる。評価とトレーニングをシームレスに結びつけることにより、継続的かつ自律的認知機能支援システムが望まれている。

本研究調査では、視線追跡により認知機能を簡便・客観的に評価し、認知機能低下の予防を目的としたトレーニングを提供可能な VR 統合システムを第 1 システムとして開発する。本システムでは、VR の特性とリアルタイムな視線解析を融合させることで、自律的で継続的な認知機能評価の支援環境を構築し、認知機能の低下を早期に把握することで、その予防に寄与することを目指す。

また、デュアルタスク型（身体運動と認知課題の同時実施）の認知症予防支援システムを第 2 システムとして開発し、複数のセンサデバイス及び、VR (Virtual Reality) 技術を組み合わせた統合型認知課題・エクササイズシステム (Integrated Cognitive Task and Exercise System: InCTES) を構築する。提案する InCTES は 3 つのサブシステム (SmartStride マルチタスクシステム, BrainBike マルチタスクシステム, MotionCalc マルチタスクシステム) から構成される。これらサブシステムは、歩行・サイクリング・全身運動といった異なる身体活動をベースに、それぞれ異なる認知課題を組み合わせたデュアルタスク体験を提供することで、ユーザは自由に選択・体験できるシステム構成とする。これらのサブシステムを通して、ユーザが楽しく一人でも継続可能な認知症予防 VR 環境の実現を目指す。

2 システム構成

2-1 第 1 システムの構成

第 1 システムは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の視線入力により認知機能評価と予防トレーニングを一体的に行う (図 1)。タスク提示、視線計測、スコア算出、データ管理、特性モデル更新の各モジュールが連携し、ユーザの記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知を評価する。取得結果により個人特性を分析したうえで、次回の課題内容と難易度を自動で調整することにより、評価とトレーニングを同時に実施できるスタンドアロン型システムである。

- タスク提示モジュール

タスク提示モジュールは、記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知の各認知課題を制御し、ユーザに対して提示を行う。課題の順序、提示時間、選択肢配置などを自動的に管理する。また、課題開始・終了イベントを視線計測モジュールへ送信し、計測の同期を確保する。

- 視線計測モジュール

視線計測モジュールは、HMD に内蔵されたアイトラッキング機能から、両眼の視線ベクトルをリアルタイムに取得する。視線位置の変化をもとに、注視 (Fixation) を自動判定し、各課題で定義された注視領域 (ROI) との重なりを計算する。また、注視時間の時系列データを生成し、認知機能スコア算出モジュールに送信する。

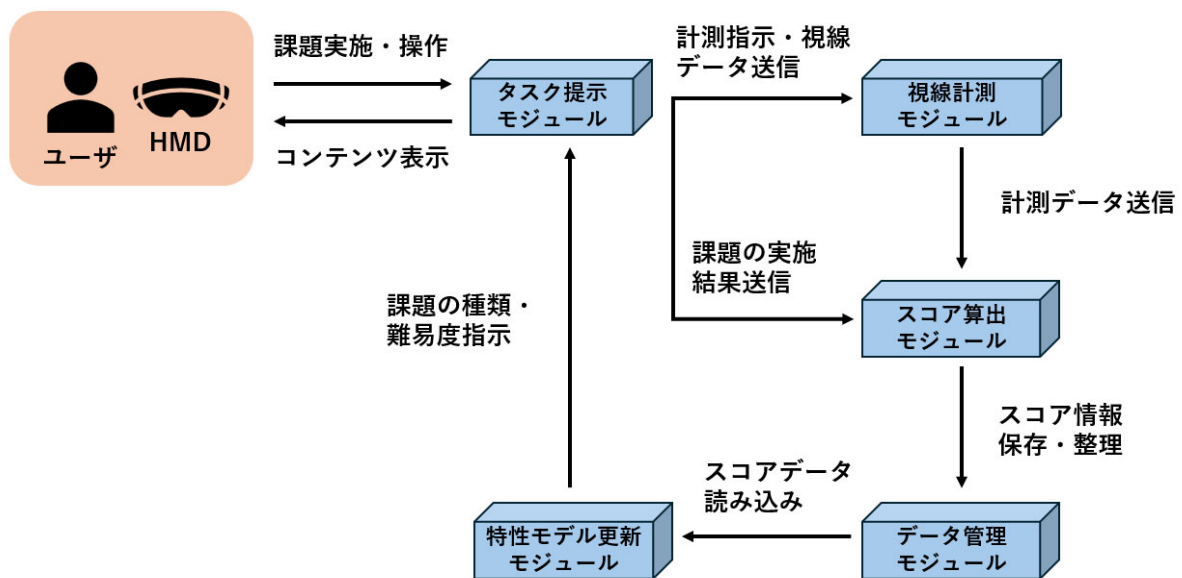


図1：第1システムの構成

● スコア算出モジュール

スコア算出モジュールは、ユーザの課題実施結果から、定量的に認知機能およびトレーニングの成果を評価する。本モジュールでは、視線計測モジュールからの注視情報を受け取り、記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知といった複数の認知要素を計算する。ここでは注視割合を用い、課題ごとの総合スコアを生成する。また、トレーニング課題においては、前回の評価結果と比較した正答率の変化や注視効率（onROI 比）の改善量を指標化し、学習効果をタイムラインで可視化する。算出スコアはセッション単位ごとにデータ管理モジュールに送られ、個人特性モデルの更新に利用される。

● データ管理モジュール

データ管理モジュールは、すべての課題結果と視線データを統合的に管理する。各試行・課題・セッション単位で生成されるデータを階層的に整理し、ローカルストレージに保存する。

● 特性モデル更新モジュール

特性モデル更新モジュールは、課題の結果からのコアデータをベースに、ユーザの特性情報を制御する。本モジュールでは、記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知といった認知要素について、得意な能力と苦手な能力を自動的に分析する。

2-2 第2システムの構成

本システムは、マルチタスク環境構築モジュール、複合動作歩行モジュール、サイクリングモジュール、モーションキャプチャモジュール、空間デボジトリにより構成される（図2）。

● マルチタスク環境構築モジュール

マルチタスク環境構築モジュールは、ユーザの全身の動きと手の動きを同期することで多様なタスクをVR空間内で実現する機能である。このモジュールは、SmartStride マルチタスクシステム内における複合動作歩行モジュールにて得た後出しじゃんけんの判定データ、BrainBike マルチタスクシステム内におけるサイクリングモジュールにて得た認知課題の判定データ、MotionCalc マルチタスクシステム内のモーションキャプチャモジュールからの計算問題の判定データを計算する。

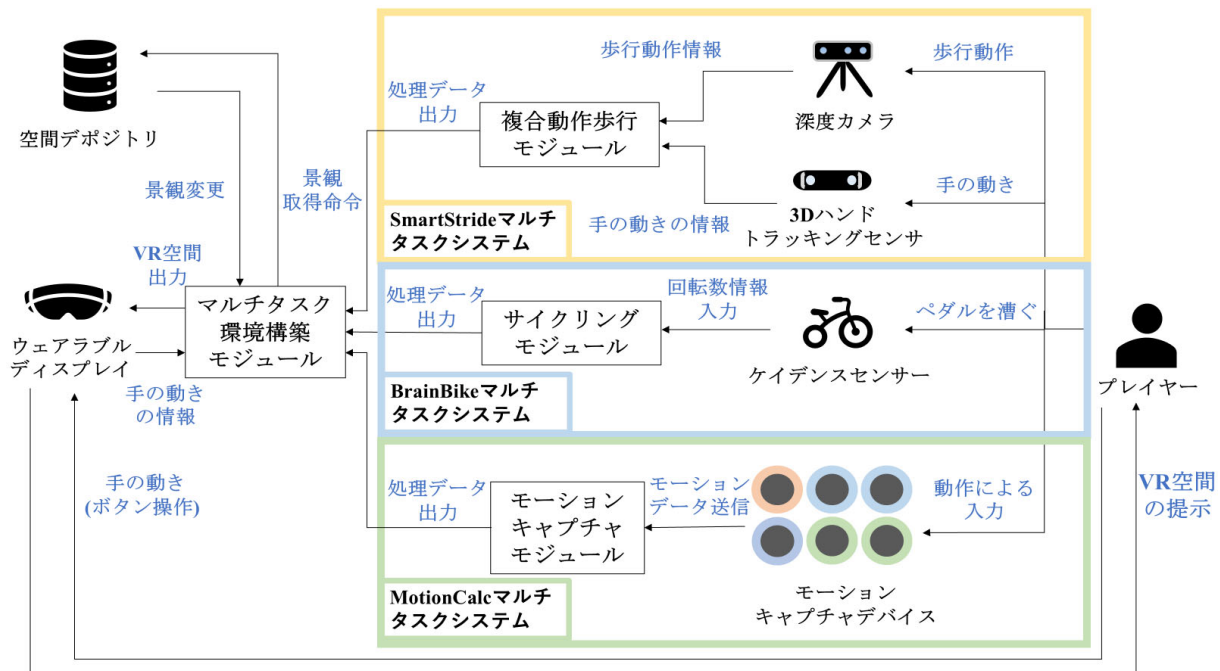


図2：第2システムの構成

● 複合動作歩行モジュール

SmartStride マルチタスクシステムにおける複合動作歩行モジュールでは、足元の深度カメラによりユーザーの足踏み動作を検知し、バーチャルアバタに同期させる。また、3D ハンドトラッキングセンサからユーザーのハンド動作を検知し、バーチャルハンドと同期する。

● サイクリングモジュール

BrainBike マルチタスクシステムにおけるサイクリングモジュールでは、フィットネスバイクに取り付けたケイデンスセンサからユーザーが漕いだペダルの回転数を計測し、VR 空間内のバーチャルアバタと同期する。

● モーションキャプチャモジュール

MotionCalc マルチタスクシステムにおける本モジュールは、モーションキャプチャデバイスから動きを検出し、VR 空間内のバーチャルアバタと連動させる。

● 空間デポジトリ

VR 空間においてユーザーが利用可能な景観が空間デポジトリに格納される。マルチタスク環境構築モジュールを介して空間デポジトリからあらかじめ作成された景観が取り出され VR 空間がユーザーに提示される。

3 第1システムのプロトタイプ

本プロトタイプでは HTC 製 VIVE Focus Vision[1] (図3) によりシステムを開発した。アイトラッキング機能内蔵の VIVE Focus Vision は、視線操作によってバーチャルオブジェクトを操作できる。さらに、バーチャルオブジェクトの利用により、教材や機材を準備する必要がなく、ユーザーが手軽に認知課題や学習体験に取り組む環境を提供できる。従来の VR 技術では、高性能 PC や外部センサなど多くの機材を必要としたものの、スタンドアロン型 HMD である VIVE Focus Vision により容易にシステムを利用できる。本プロトタイプでは、現実空間上にバーチャル課題やオブジェクトを提示し、高臨場感な体験環境をユーザーに提供するとともに、認知機能の評価や予防を実現する。



図 3 : HTC 製 VIVE Focus Vision

3-1 第 1 システム全体の設計

認知機能評価機能と認知機能低下予防トレーニング機能から構成される第 1 システムは、認知機能評価と認知機能低下予防トレーニングを統合した循環型認知支援モデルである。第 1 システムは、評価とトレーニングを一方向の処理とするのではなく、再評価によって効果を確認するとともに、継続的なトレーニングを実現する設計となっている。図 4 に、第 1 システムにおけるテスト実施から、トレーニング実施、弱点領域抽出の流れを示す。

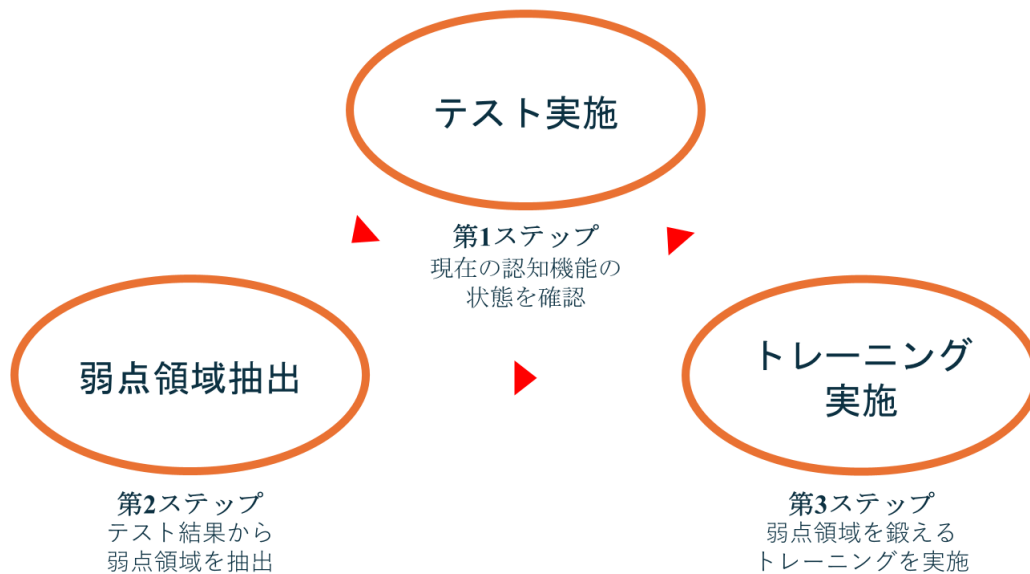


図 4 : テスト実施・トレーニング実施・弱点領域抽出の流れ

3-2 認知機能評価機能

認知機能評価機能では、各課題に正解選択肢に対応した ROI が設定され、視線がこの領域に到達した時間をフレーム単位で積算する。同時に、視線が有効に取得されていた総時間も記録し、正解への注視割合を課題スコアとして算出する。第 1 システムでは、記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知の 5 領域を評価対象とする。各領域に対応する課題は MMSE を基に設計し、課題ごとのスコアを統合して領域別スコアを生成する構造とした。表 1 に第 1 システムで実装した全課題の構成を示す。

表 1：全課題の構成

課題番号	課題名	評価する認知機能	スコア算出方法
Task1a	遅延視覚記憶（符号化）	記憶（エンコード）	スコアなし（符号化のみ）
Task2	視覚性注意・追跡	なし	スコアなし
Task3	異類選別課題	判断	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task4	視覚探索課題	視覚認知	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task5	連続引き算（100- n を 5 回）	計算	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task6	小銭カウント課題	計算	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task7	図形指定判断課題	判断	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task8	鏡像矢印課題	空間認知	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task9	二重五角形判断課題	空間認知	ROI 注視時間 / 有効視線時間
Task1b	遅延視覚記憶（再認）	記憶（遅延再認）	ROI 注視時間 / 有効視線時間

● Task1a：遅延視覚記憶課題（符号化フェーズ）

Task1a は、後続の再認課題に備えて視覚刺激を記録させる符号化フェーズであり、ユーザには図形画像を一定時間提示し、その特徴を記憶するよう指示する。本フェーズでは回答選択を行わず、視線計測は記録の確認の目的でのみ利用される。提示される図形は Task1b で正解刺激および妨害刺激として再利用され、遅延視覚記憶の評価に不可欠な事前学習段階として位置づけられる。

● Task2：視覚性注意・追跡課題

Task2 は、評価目的ではなく、移動するターゲットを視線で追跡することにより、視線操作に慣れるためのウォームアップ課題となっている。課題開始前に視線入力 of 取得を確認し、被験者が「視線で対象を選ぶ」という操作に自然に適応できるよう補助する。刺激提示や視線追跡自体は行いが、正誤判定やスコア算出は行わず、記録データも評価対象には含めない。本課題により、後続の評価課題での視線操作の精度を確保する。

● Task3：異類選別課題（判断）

Task3 は、複数の図形カテゴリの中から 1 つだけ異なる性質をもつ図形を選択する異類選別課題である。6 枚の図形がランダムな配置で提示され、被験者は視線を用いて「他と異なる図形」を注視する。本課題は、視覚的特徴の比較、カテゴリ判断、および意思決定に関わる認知プロセスを評価するものであり、妨害刺激の種類と類似度により判断負荷を制御できる点に特徴を持つ。

● Task4：視覚探索課題（視覚認知）

Task4 は、指定のターゲット図形を複数の選択肢の中から探索し、同定する視覚認知課題である。課題開始時にターゲット図形の名称または見本画像を提示し、その後、複数の類似図形を同時に提示する。被験者は視線探索によってターゲットを見つけ、注視することで視覚探索の効率やターゲットと非ターゲットの弁別能力を評価する。

● Task5：連続引き算課題（計算）

Task5 は、100 から 6～9 の整数を 5 回繰り返し減算する計算課題である。各ステップでは「100-7=?」のように現在の値を提示し、6 個の解答候補をランダムに提示する。被験者は視線のみで正しい解答値を注視し、計算処理能力を評価する。

● Task6：小銭カウント課題（計算）

Task6 は、複数の硬貨画像の合計金額を求める日常生活に近い形の数量処理課題である。被験者にはランダムに 5 円から 100 円の硬貨を複数枚提示し、その合計金額を算出したうえで正解と思われる選択肢を注視する。本課題は数量把握、情報統合、日常的な計算能力を評価する。

- Task7：図形指定判断課題（判断）

Task7 は、課題開始時に示される特定の図形を記憶し、後続の選択肢から該当図形を選択する判断課題である。まず指示文とターゲット図形を提示し、一定時間理解フェーズを設ける。その後、6 枚の図形をランダムに提示し、被験者は該当図形を視線で選択する。本課題は、図形の保持・照合・意思決定といった判断能力を評価する。

- Task8：鏡像矢印課題（空間認知）

Task8 は、提示された矢印図形に対して「上下左右反転した鏡像」に対応する選択肢を選ぶ空間認知課題である。まずエンコードとして 1 つの矢印を提示し、その後、4 方向の矢印をランダム配置で提示する。被験者は鏡像に相当する矢印を視線で注視する。本課題は上下左右変換の理解および空間認知機能を評価する。

- Task9：二重五角形判断課題（空間認知）

Task9 は、複雑な幾何学図形の同一性判断を行う空間認知課題である。まずターゲットとなる二重五角形図形を提示し、ランダムに異なる形状のものを提示する。被験者は、選択肢の中から正解の図形を視線で注視する。本課題は複雑パターンの把握、構造的類似性の判断といった空間認知能力を評価する。

- Task1b：遅延視覚記憶課題（再認フェーズ）

Task1b は、Task1a において記銘した図形を遅延後に再認させるための記憶課題であり、6 枚の図形を三次元空間内にランダム配置し、被験者は視線により記銘図形を選ぶ。本課題は短期的な視覚記憶の保持および妨害刺激への耐性を反映した遅延再認能力を評価する。

3-3 認知機能低下予防トレーニング機能

本機能では、認知機能評価の結果に準じてトレーニング課題をユーザに提供する。領域別スコアで低値の認知領域を優先的な支援対象として、当該領域に対応する課題を提示する構成とした。課題は認知機能評価機能において評価対象である記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知の 5 領域を対象としており、難易度や内容はユーザの評価結果に合わせて調整される。さらに、トレーニングの進行により課題の内容を変化させ、ユーザが楽しみながらトレーニングに取り組める工夫を施している。課題の一部では視線滞留に基づく自動選択機能を採用し、一定時間連続して注視された選択肢を回答として扱うことで、簡単なシステム操作を実現している。第 1 システムで実装した認知予防トレーニング課題は、記憶、判断、視覚認知、計算、空間認知から構成され、課題ごとに刺激画像やオブジェクト、選択肢の配置などをランダム化している。

4 第 2 システムのプロトタイプ

本研究では、深度カメラ及び 3D ハンドトラッキングセンサの前でジェスチャを取ることで、散歩と後出しのじゃんけんを同時に実行できる SmartStride マルチタスクシステム、ケイデンスセンサから得られる RPM データとハンドトラッキング機能を用いて、サイクリングと計算問題を同時に実行できる BrainBike マルチタスクシステム、フルトラッキングデバイスによりユーザを検出することで、体感迎撃回避運動と計算問題を同時に実行できる MotionCalc マルチタスクシステムを統合した InCTES : Integrated Cognitive Task and Exercise System を構築した。第 2 システムは、スタート画面、ゲーム選択画面、景観選択画面、ゲーム画面、結果画面、履歴画面で構成される。画面遷移の流れを図 5 に示す。

4-1 SmartStride マルチタスクシステム

VR 空間内での散歩は、深度カメラでユーザの動きを読み取り、アバタの操作によってウォークスルーを実現した。図 6 は、本システムで使用するアバタであり、このアバタの頭部にカメラを取り付ける。このアバタが一定距離進むとシーンが切り替わる。また、図 7 はユーザが本システムにより歩行動作を行っている例である。後出しのじゃんけんは、3D ハンドトラッキングセンサでユーザの手を読み取り、指の伸びきっている本数によってジェスチャ判定することでコンピュータ側のアバタとの相互作用を実現している。図 8 に、コンピュータ側のアバタがじゃんけんのポーズを取っている例を示す。

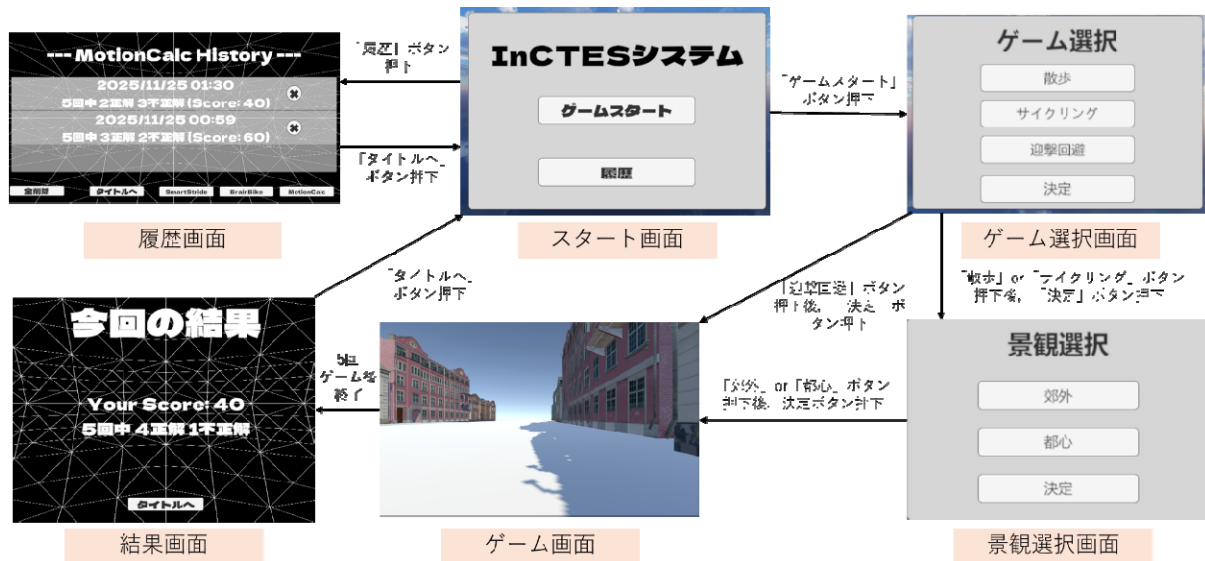


図 5 : InCTES の構成

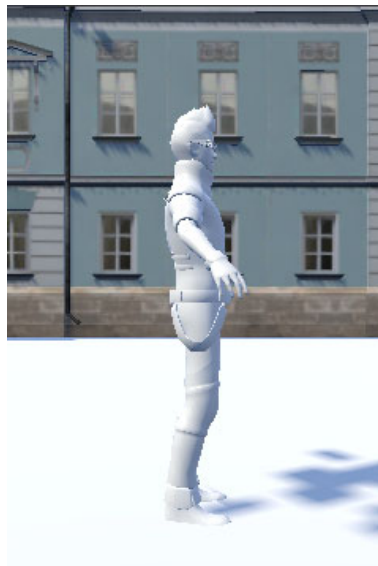


図 6 : SmartStride マルチタスクシステムの使用アバタ



図 7 : ユーザによる歩行動作の例 (SmartStride マルチタスクシステム)



図 8：じゃんけんのジェスチャを行うアバタ（ゲーのポーズ）

4-2 BrainBike マルチタスクシステム

VR サイクリングは、フィットネスバイクのクランクに取り付けられたケイデンスセンサから取得した回転数データ（RPM）を使用した。フィットネスバイクに取り付けたケイデンスセンサからの RPM データは、開発マシンとケイデンスセンサ間で ANT+ を介して無線通信を実現した。通信用のプログラムは Node.js で記述した。また、取得した RPM データは、WebSocket によりデータを転送した。アバタの速度は、ユーザがフィットネスバイクを漕ぐ速度に応じてスピードが変わる。また、VR 空間内のサイクリングアバタとして人型アバタ（図 9）を使用し、アバタの頭部にカメラを取り付けた。一定距離を走行することで認知タスク（図 10）が表示される。ユーザが VR 空間内をサイクリングしている例を図 11 に示す。



図 9：BrainBike マルチタスクシステムの使用アバタ



図 10：認知課題の出現画面



図 11：ユーザによるサイクリングの例（BrainBike マルチタスクシステム）

計算問題では，表示された式が正しくなる四則演算問題がユーザに提示される．ユーザは，HMD のハンドトラッキング機能によりボタンをプッシュして回答する．図 12 と図 13 に正解と不正解の判定結果例を示す．

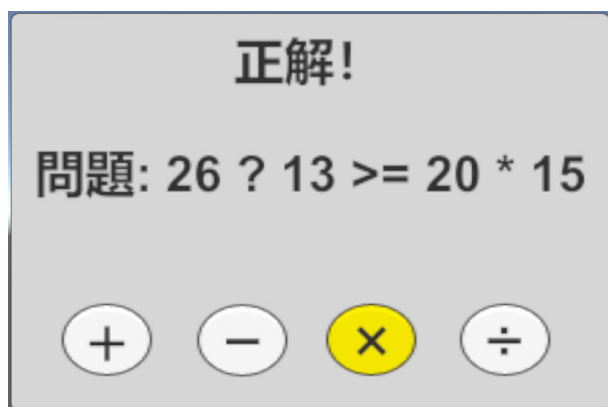


図 12：判定結果（正解例）

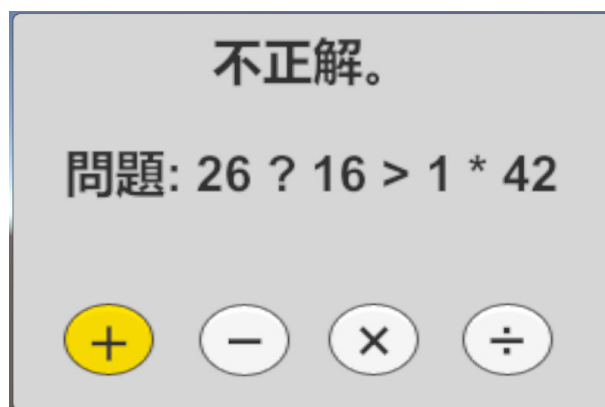


図 13：判定結果（不正解例）

4-3 MotionCalc マルチタスクシステム

体感迎撃回避運動は，ユーザに装着した 6 つのセンサから得られるデータを用いる．頭部，四肢，腰部に装着された 6 つのセンサ（図 14）からのデータを「mocopi[2] スマホアプリ」を用いて Bluetooth による無線通信で Unity に送信する．なお，アプリケーション側の設定として，パソコンの IPv4 アドレスと Unity 側のポート番号が用いられる．

図 15 は，ユーザによる体感迎撃回避運動の様子であり，図 16 は，ユーザがオブジェクトを迎撃したときとオブジェクトに衝突したときの効果を示している．

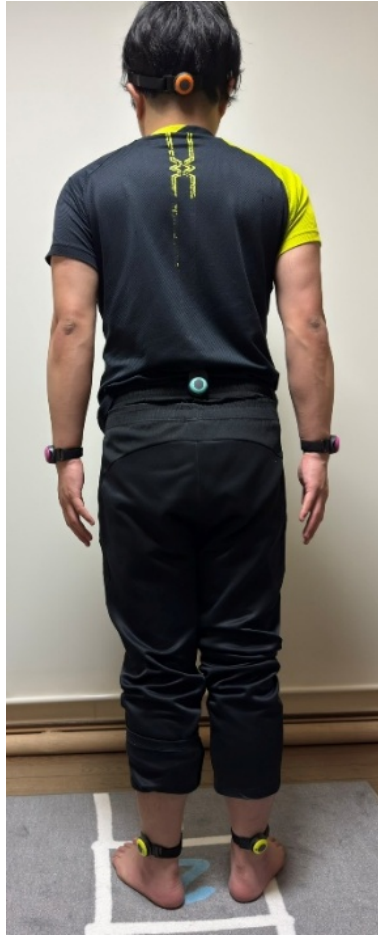


図 14 : 6 つのセンサの装着様子



図 15 : 実際に行っている様子 (MotionCalc マルチタスクシステム)

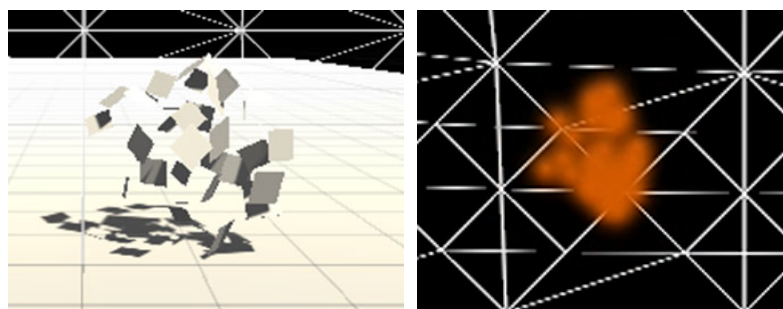


図 16 : 障害物のエフェクト (左 : 迎撃用, 右 : 回避用)

計算問題は、足し算・引き算・掛け算・割り算の選択式計算問題が提示される。ユーザは、正解の選択に移動することで回答オブジェクトに接触する。図 17 と図 18 は、ユーザが計算問題に対してそれぞれ正解と不正解の例示画面である。

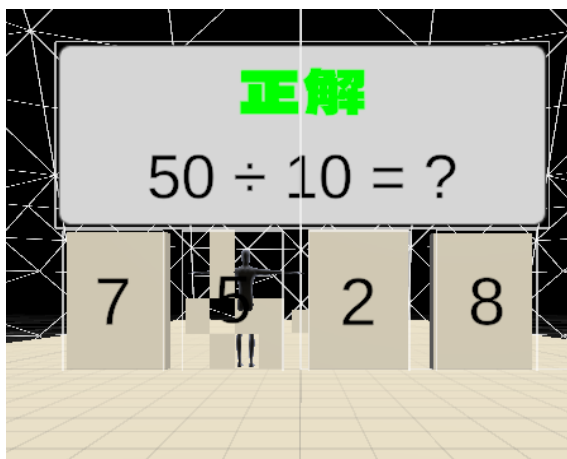


図 17：判定結果（正解例）

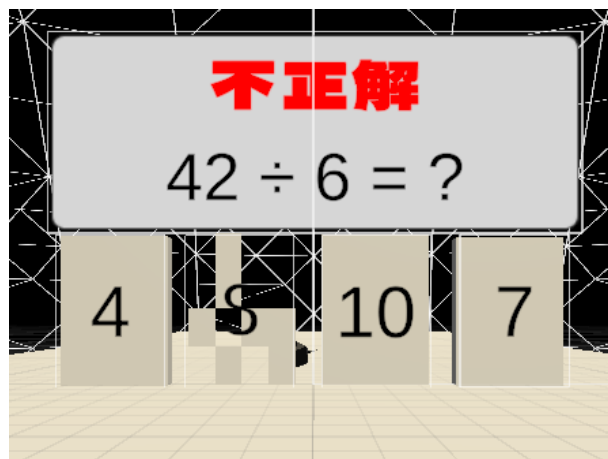


図 18：判定結果（不正解例）

5 第 1 システムの評価

第 1 システムのユーザビリティ評価を目的として、アンケート調査を 50 名に実施した。被験者は第 1 システムを体験後、アンケートに回答した。

本システムの評価に参加した被験者の年齢層を図 19、視線操作経験の有無を図 20 に示す。さらに、視線操作経験の有無は、視線操作経験無が 44 名で、視線操作経験有が 6 名であった。第 1 システムの評価においては、Brooke により提案された System Usability Scale (SUS) [3]を用いてユーザビリティを評価した。本研究では、第 1 システムを体験後に SUS を 1 回実施した。被験者別の SUS スコアを図 21 に示す。SUS において良好なユーザビリティの目安とされる基準値は 68 点である。図 21 より、多くの被験者において SUS スコアは基準値である 68 点を上回っており、本システムの幅広いユーザに対する良好な評価結果を確認できた。極端に低い評価項目は少なく、全体として安定した評価分布となっている。また、全体の SUS スコアの平均および標準偏差は 70.9 ± 11.3 であり、SUS の基準値である 68 点を上回っている。

6 第 2 システムの評価

SmartStride マルチタスクシステム、BrainBike マルチタスクシステム、MotionCalc マルチタスクシステムの操作性と有効性の評価を実施した。図 22 は、各システムの評価における被験者の年齢層となっている。

6-1 SmartStride マルチタスクシステムの評価

SmartStride マルチタスクシステムの操作性（図 23）に関しては、被験者の 74%が肯定的な回答をした。一方で、26%が「どちらでもない」または「やや難しい」と回答した。この結果から、SmartStride マルチタスクシステムの操作性に対する改善の必要性が明らかとなった。SmartStride マルチタスクシステムの有効性（図 24）について、被験者の 95%が肯定的な回答をしており、システムの高い有効性を確認できた。

6-2 BrainBike マルチタスクシステムの評価

BrainBike マルチタスクシステムの操作性（図 25）と有効性（図 26）について、多くの被験者が肯定的な回答をしており、高い操作性と有効性を確認できた一方で、BrainBike マルチタスクシステムの操作性においては、被験者より「サイクリングの遅延が気になる」とのコメントが寄せられた。

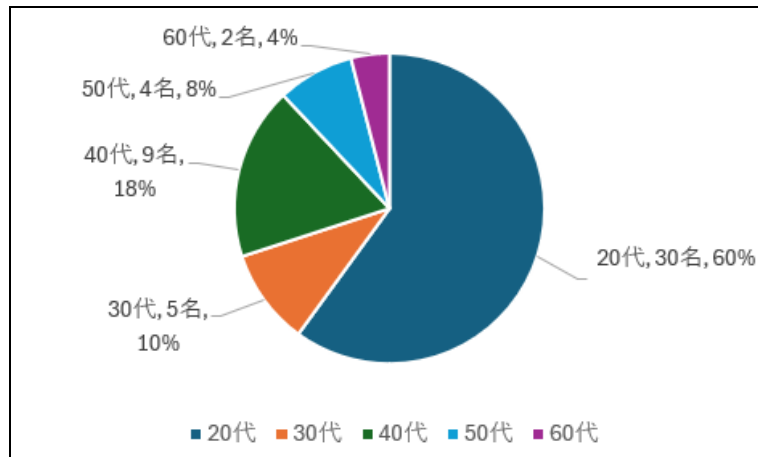


図 19：被験者の年齢層 ($n = 50$)

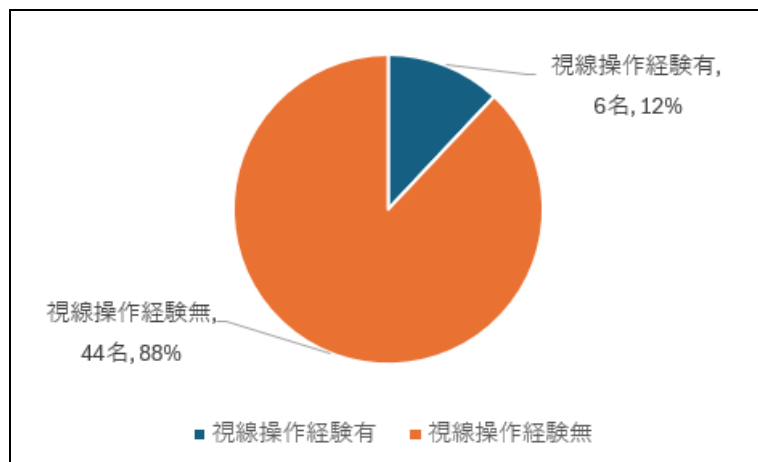


図 20：被験者の視線操作経験の有無 ($n = 50$)

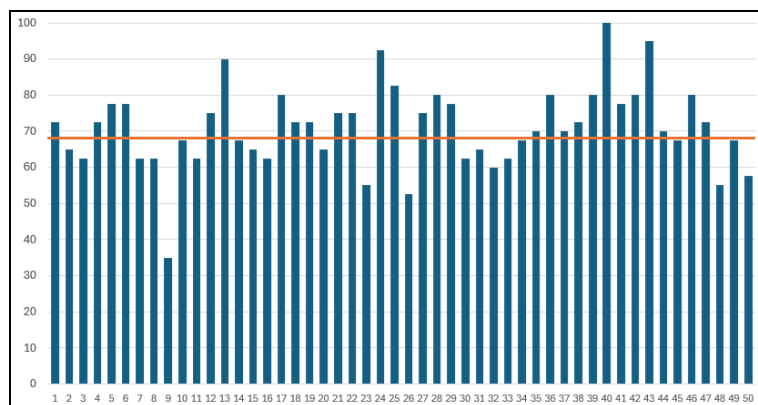


図 21：各被験者の SUS スコア ($n = 50$)

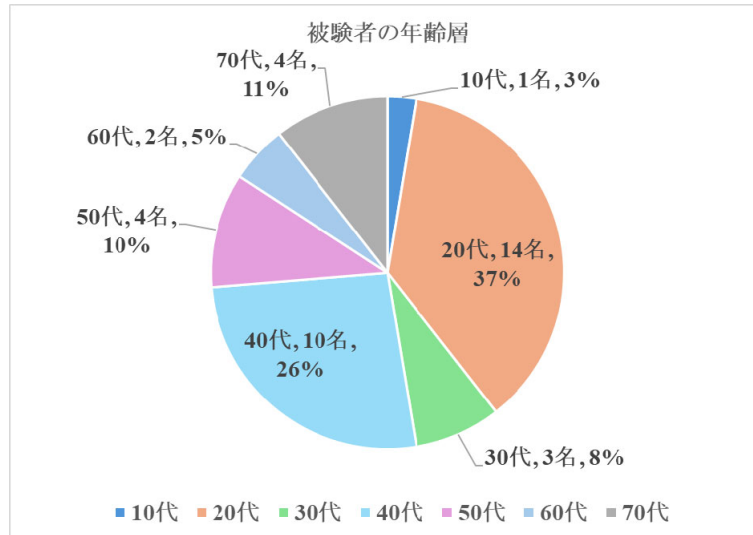


図 22：被験者の年齢層 ($n = 38$)

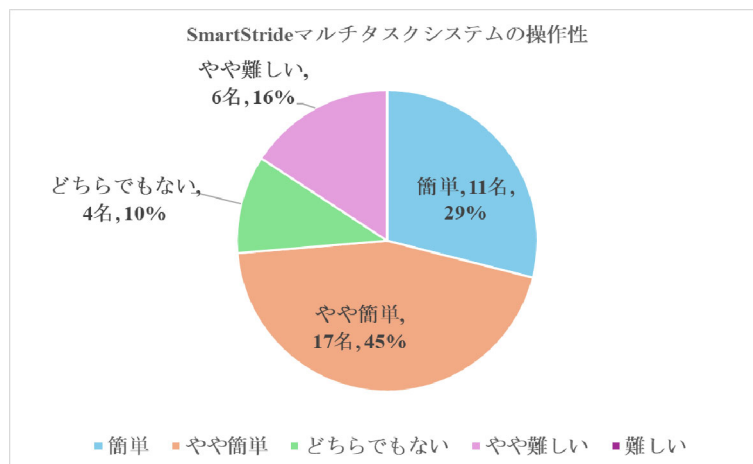


図 23：SmartStride マルチタスクシステムの操作性 ($n = 38$)

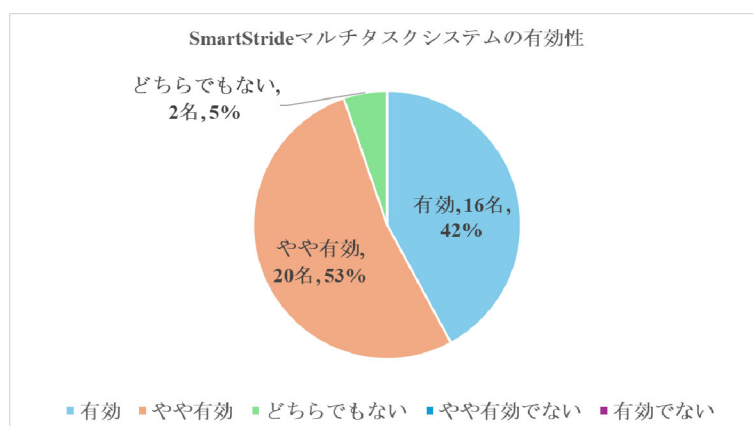


図 24：SmartStride マルチタスクシステムの有効性 ($n = 38$)

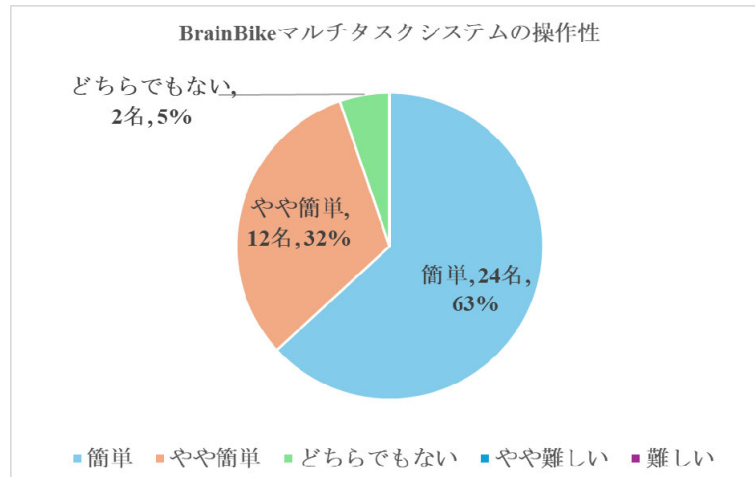


図 25 : BrainBike マルチタスクシステムの操作性 ($n = 38$)

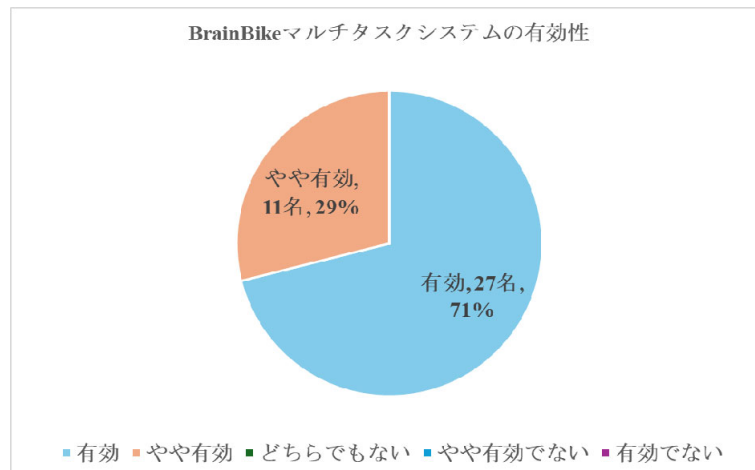


図 26 : BrainBike マルチタスクシステムの有効性 ($n = 38$)

6-3 MotionCalc マルチタスクシステムの評価

MotionCalc マルチタスクシステムの操作性 (図 27) と有効性 (図 28) について、すべての被験者が肯定的な回答をしており、高い操作性と有効性を確認できた。

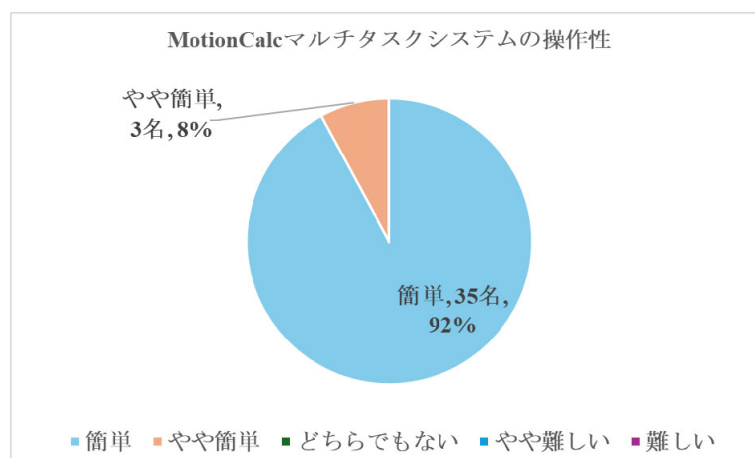


図 27 : MotionCalc マルチタスクシステムの操作性 ($n = 38$)

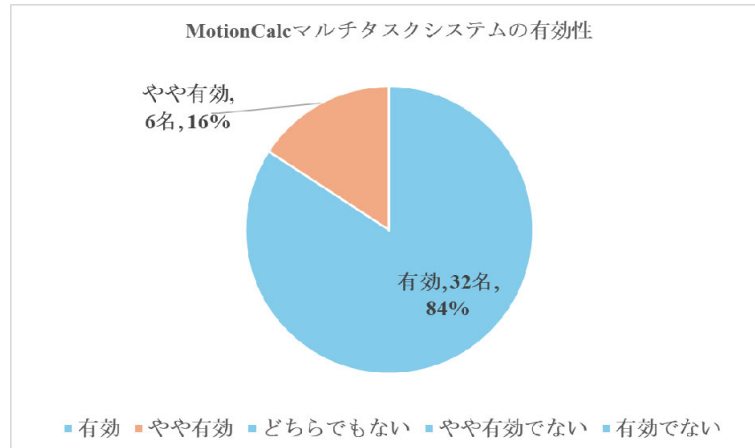


図 28 : MotionCalc マルチタスクシステムの有効性 ($n = 38$)

7 まとめ

本研究では、第1システムとして、視線計測技術とVR環境を組み合わせ、視線入力のみで認知機能の評価および低下予防トレーニングを実施できるシステムを開発した。第1システムは、HMDの視線追跡機能により、コントローラ操作を必要としない操作環境を実現し、入力と認知活動を一致させた操作体系を構築した。これにより、ユーザ操作を簡素化した認知機能支援環境を実現した。また、認知機能評価結果に基づいて対応する予防トレーニング課題へと自然に移行する仕組みを構築した。刺激数や制限時間を調整することで、個別化トレーニングを実現しており、「評価→フィードバック→予防」という一連の流れを同一プラットフォーム上で完結させた。第1システムの評価では、SUSによるユーザビリティ評価を実施した結果、高いユーザビリティを確認できた。

次に、第2システムとして、Integrated Cognitive Task and Exercise System (InCTES)を開発した。第2システムでは、「健常者の方が楽しく一人で継続可能な認知症予防VR環境の実現」を目的としている。InCTESは、VR技術と複数のセンサデバイスを組み合わせたSmartStrideマルチタスクシステム、BrainBikeマルチタスクシステム、MotionCalcマルチタスクシステムから構成される。第2システムの評価として、ユーザビリティ評価（操作性と有効性）を行い、高い操作性と有効性が示された。

【参考文献】

- [1] HTC Corporation, “VIVE Focus Vision,” <https://www.vive.com/us/product/vive-focus-vision/specs/>, 閲覧日：2026年3月31日。
- [2] SONY, Sony Corporation - mocopi, <https://www.sony.co.jp/en/Products/mocopi-dev/en/>, 閲覧日：2026年3月31日。
- [3] Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. Usability evaluation in industry, 189(194), 4-7.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Dual-task Virtual Reality System using Motion Capture Devices	Proc. of the 17th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS-2025)	2025 年 9 月
Cognitive Function Support System using Gaze Control	Proc. of the 31st International Symposium on Artificial Life and Robotics	2026 年 1 月
視線操作による直感的インタラクションを用いた認知機能支援システムの開発	日本VR学会第57回テレ-immージョン技術研究会	2025 年 6 月
テレ-immージョン技術研究会 20 年の軌跡と今後の展望	第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会	2025 年 9 月
認知症予防を目的とした統合型 VR システムの開発	日本 VR 学会第 58 回テレ-immージョン技術研究会	2026 年 2 月