

東京大学

次世代知能科学研究センター

「モビリティ知能社会デザイン」社会連携研究部門

ANNUAL REPORT 2022



Next Generation Artificial Intelligence Research Center

次世代知能科学研究センター

東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授
次世代知能科学研究センター センター長

國吉康夫



『モビリティ知能社会デザイン社会連携研究部門』はモビリティに関連する社会の価値観や人間の感情の理解が可能となる次世代知能の基盤技術の確立と、次世代を担う学術人材を育成することを目的に、2019年8月に設置された次世代知能科学研究センターの社会連携研究部門です。

当社会連携研究部門の特徴の一つが、産学協創の研究機関として大学と企業が全力でがっぷり四つに組み、研究に取り組んでいることにあります。すなわち企業側として将来を託す生命線となるような最重要技術に対して、大学側としても極めて学術的意義が高く最先端のフロンティアを目指す研究課題群が設定され、それらに対して学術、社会実装両面で協働して取り組んでいる点です。

もう一つは設定されている研究課題に対して神経科学、人工知能学、都市工学、数理工学と、次世代の知能科学を切り拓く広範な重要研究領域の視点から接近を試みていることです。一つのアプローチでは正解にたどり着くのが困難な複雑な実社会の課題に対して、多面的な研究アプローチが協働することで本質を見極め、共通の問題を見出して取り組む研究体制がとられている点にあります。

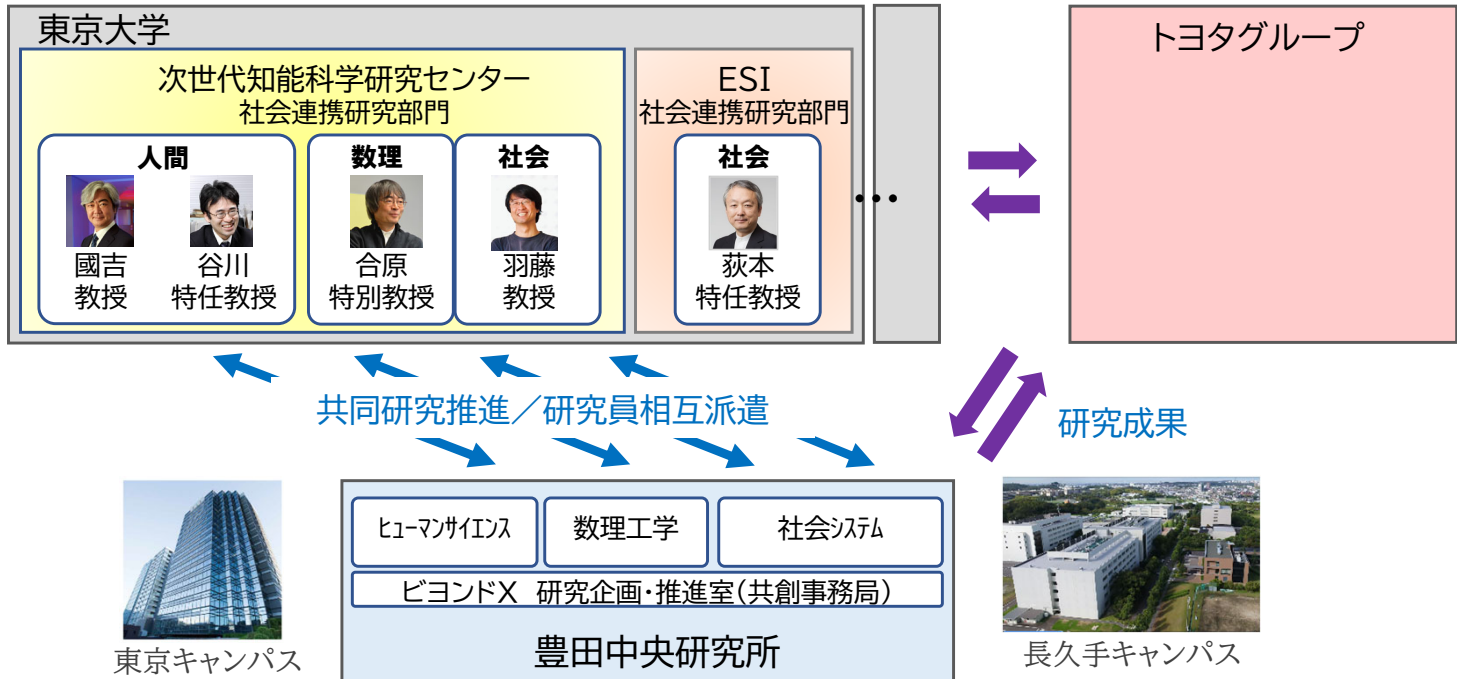
4年目である当年度は、この多面的な研究アプローチによる協働のもと、「多様性と可動性」が重要であることを共通認識し、最終年度となる2023年度に向け各テーマの研究推進をするとともに、一層のテーマ間連携を進めました。

当年度の成果を年次報告としてまとめました。本報告によって、より多くの方々に、ご理解を深めていただければ幸いです。

引き続きモビリティ知能社会デザイン社会連携研究部門の展開にご期待ください。

東京大学 - 豊田中央研究所 産学共創プロジェクト

1. 全体スキーム



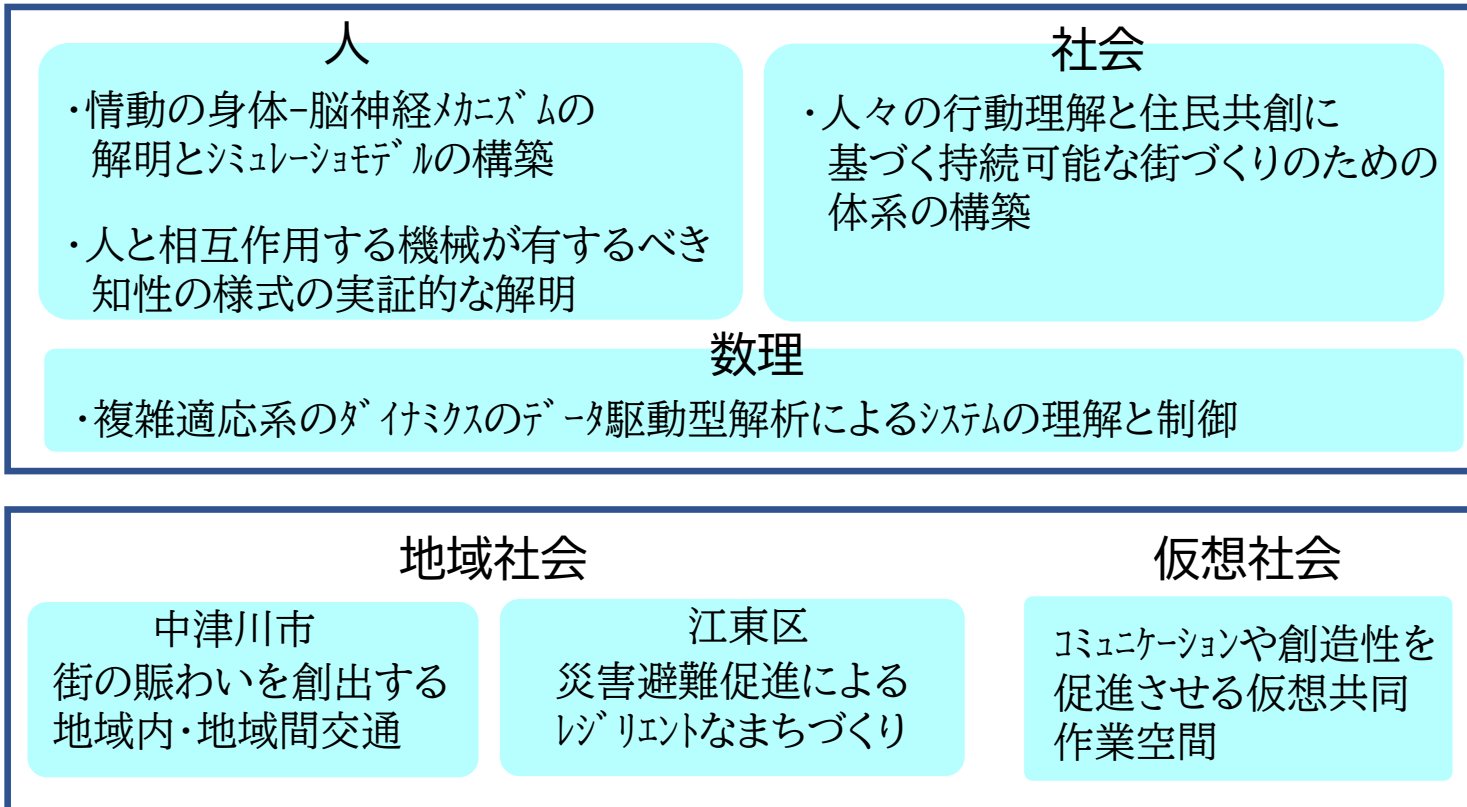
2. 研究内容

社会の価値観や人間の感情の理解が可能となる
次世代知能の基盤技術の確立

基礎研究

×

実証研究



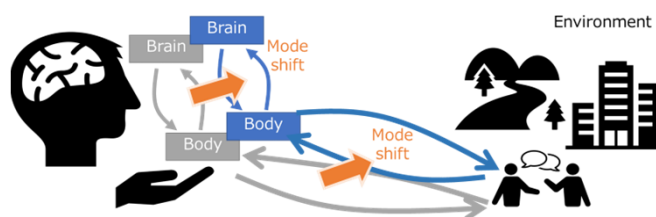
目次

- | | |
|----------|---------|
| 1. 取り組み | … P. 1 |
| 2. 研究者一覧 | … P. 9 |
| 3. 研究成果 | … P. 11 |

情動メカニズム

(目標)「情動的モードシフト」を予測可能な身体－脳神経連成モデルを構築する

(アプローチの特徴) AIを用いるブラックボックス的な手法ではなく、機能的特徴を表現した複数のモデルを組合せる構成論的なアプローチにより身体－脳神経連成モデルを開発する。また、筋活動、脳活動、呼吸・循環・代謝活動を同時計測し、そのデータに基づき情報伝達ネットワーク構造を抽出することによりモードシフトを実験的にとらえる。



東京大学
國吉康夫(左)



豊田中央研究所
岩本正実(右)

概要

本研究では、情動の根幹をなすのは脳・身体活動のモードをシフトするシステムであると考えられる。ヒトは問題に直面すると、脳・身体モードを切り替えることで注意や行動戦略を切り替え、問題を解決しようとする。つまり、モードシフトシステムには問題解決という機能がある。モードシフトシステムが情動そのものを意味するとは限らないが、将来的にはモードシフトシステムがいかなる条件を満たすときに「情動」となるのかを切り分ける作業が必要である。しかしいずれにせよ、いわゆる「喜怒哀楽」をも含めた情動プロセスの根底にはモードシフトシステムがあると考えられる。

ヒトは環境の変化あるいは環境への働きかけの変化に対応して、脳と身体の状態が変化することにより注意・行動選択戦略が切替わること(本研究ではこれを「情動的モードシフト」と呼ぶ)で、様々な問題解決を行っている。この「情動的モードシフト」を具体的に言えば、例えば、落ち込んだ状態だったのが、ポジティブな情報に注意が向き、元気な状態を取り戻す、といったことである。本研究では、喜びや怒りといった、呼吸や心拍等の身体的変化を伴う情動の根幹に、このような「情動的モードシフト」があるという新しい情動の解釈を取り入れており、「情動的モードシフト」を予測可能な身体－脳神経連成モデルを構築することを目指している。

「情動的モードシフト」は、状況に応じて適応的に行動生成するための脳・身体・他者関係のモードとその自発的切り替えのことであり、本研究では、運動、環境・風景、他者行動などによる、脳・身体相互作用系におけるfunctional networkとそのflexibilityの動態についてモデル化しシミュレーション実験を行うとともに、生体実験計測を行う。特に、Negative modeとPositive modeの生成方法とmode間のシフト条件をモデルと実験で明らかにすることを目指している。

モデル化においては、既存の呼吸心拍－青斑核－皮質モデルにおいて皮質ネットワークの柔軟性を表現する部分を改良し、身体運動や他者行動の入力によるflexibleなモードシフトについてシミュレーション実験を行う。生体実験計測においては、Positive/Negativeモード間のシフトを表現するタスクを設計し、筋活動、脳活動、呼吸・循環・代謝の全身状態の実験計測を行い、低次モードシフトとしての脳・身体系のfunctional networkの遷移、高次モードシフトとしてそのflexibilityの変化、などの計測・解析を試みる。

「情動的モードシフト」の発生条件が明らかになれば、例えば、Negative modeからPositive modeに情動を誘導できる可能性がある。眠気状態から覚醒状態に誘導できれば運転中や作業中の安全性を高めることができ、不快な状態から快状態に誘導できれば、より快適な車室内空間や作業環境を創出することが可能になる。情動のメカニズムを深く理解することで、ヒトの安全性や快適性を高めることができWell-beingの向上が期待できる。

最終目標と今年度目標

本研究の最終目標は、脳と身体の状態が変化することにより、注意・行動選択戦略が切替わる、といったヒトに見られる「情動的モードシフト」を予測可能な身体－脳神経連成モデルを構築することである。そのため、今年度は、昨年度までに開発した身体－脳神経連成モデルを改良し、両眼視野闘争における知覚交替を対象として呼吸による皮質情報処理の柔軟性(flexibility)を調整するモデル化を試みた。また、生体計測実験により両眼視野闘争における知覚交替と呼吸、循環、眼球運動、瞳孔径の相関関係を調査した。

今年度成果

(1)呼吸による皮質情報処理のflexibility調整

闘争のように「緊張」の状況にあるときは、脳の注意状態は一点に集中した状態になる(図1(a))。一方、ピクニックのように「楽しい」状況にあるとき、脳の注意状態は柔軟に遷移する(図1(b))。このようなNegative・Positiveなモード間のシフトの前提となる、脳・身体相互作用系におけるfunctional networkとそのflexibility(柔軟性)の動態についてモデル化、シミュレーション実験を実施している。呼吸ペース、呼吸の位相(呼気-吸気相)に関して両眼視野闘争*1の切り替わり頻度が変化するという前年度の知見を踏まえ、本年度は、その切り替わりダイナミクスを数理的に記述するモデルの検討を行った。リザーバーコンピューティングの代表的モデルであるESN(Echo State Network)を用いて、両眼視野闘争における左右目由来の視覚情報入力に対する知覚値出力を行う大脳皮質モデルを作成した。この知覚値出力の更新に寄与する皮質ニューロンの活性化ゲイン k は、前年度までに開発した呼吸-青斑核モデル[1]から呼吸の状態に応じて分泌されるノルエピネフリンのゲインと関連づけてモデル化した。このモデルを用いて、両眼視野闘争における知覚交替を対象として呼吸による皮質情報処理の柔軟性の調整を試みた。その結果、呼吸のペースによって皮質ニューロンの活性化ゲイン k の取り得る範囲が変化し、 k の大きさによって、flexibilityを調整できる可能性があることがわかった(図1)。

[1] Yonekura et al. bioRxiv, 2022.

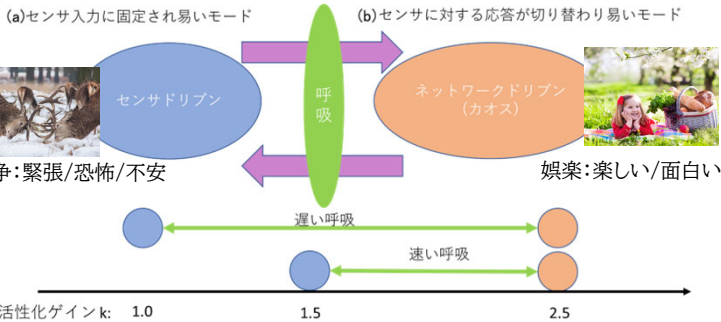


図1. モードとflexibilityと呼吸の関係性の概念図

(2)知覚交替と呼吸-運動-脳活動の生体実験計測

昨年度の実験において、両眼視野闘争*1の時にみられる知覚交替の発生確率が呼吸位相と呼吸のペースに依存することがわかったが、呼吸以外の身体情報がどのように影響しているかは検証していなかった。本年度は視線や神経活動による影響について検証するため、ヘッドマウントディスプレイを利用した視線計測および瞳孔径計測を追加し、両眼視野闘争における知覚交替と呼吸、循環、眼球運動、瞳孔径の相関関係を調査した。その結果、知覚交替に対して、呼吸・循環・視覚が独立して影響するとともに、呼吸状態によってその影響の仕方も変化することが示唆された。通常ペースと早い呼吸では眼球運動が、遅い呼吸では呼吸運動が、知覚交替に対する影響が最も強かった。また、運動時の知覚交替に対する呼吸、脳神経活動、筋活動の影響を調査するため、VRゴーグルを利用した計測実験を行い、脳波計、筋電図計、呼吸センサ、心電図の生体計測実験を行った(図2)。

*1: 両眼視野闘争とは、左目と右目で異なる視覚情報が提示された場合、それぞれの目に入る画像を同時に知覚することはなく、どちらかの画像のみが認識される現象であり、時間とともに優位に知覚される側が自発的に切り替わる「知覚交替」が起こる。

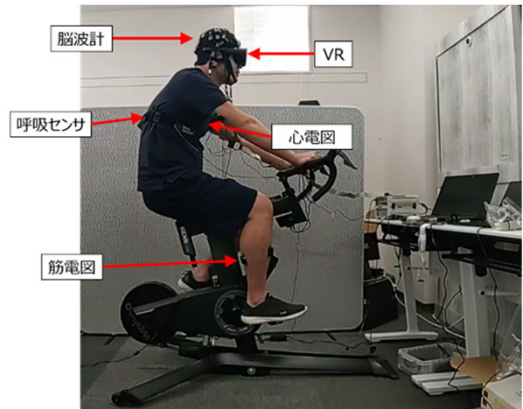


図2. 知覚交替と呼吸-運動-脳活動の関連実験

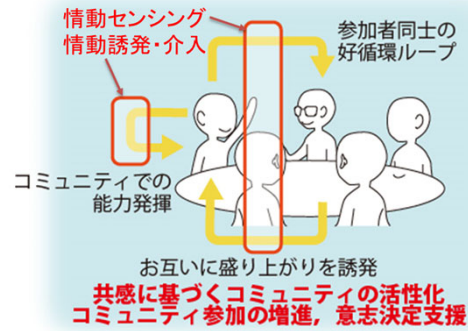
今後の展開

Positive・Negativeなモード間のシフトのメカニズム解明に向けて、予測的認知と情動的行為による能動的なモード遷移生成の統合例についてモデル化、シミュレーション実験を行う。この際、内受容系を持つエージェントを実装し、様々な認知行動タスクを行うとともに、複数の神経伝達物質も導入し、能動的なモードシフトに必要な構成要素を明らかにし、その生存・社会活動における機能性を提示する。また、自由運動時における筋活動、脳活動、呼吸・循環・代謝などの全身状態計測実験を実施し、運動によって生じるモードシフトの変化が行動、認知、情動などに与える影響を検証することにより脳・身体の大脳皮質相互作用系におけるfunctional networkとそのflexibilityの動態の理解を目指すとともに、Well-beingとの関連調査を進める。

機械知性

(目標)人の感情や情動に働きかけるポジティブフィードバックを、VR技術とAI技術の協調で実現

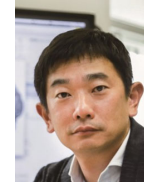
(アプローチの特徴) 情動情報のセンシングに基づいてコミュニケーションのボトルネックを検出し、適切に情動に働きかけるVR技術やAIアバターにより、コミュニケーションの促進と創造性の向上を実現する。



概要



東京大学
谷川智洋(左)

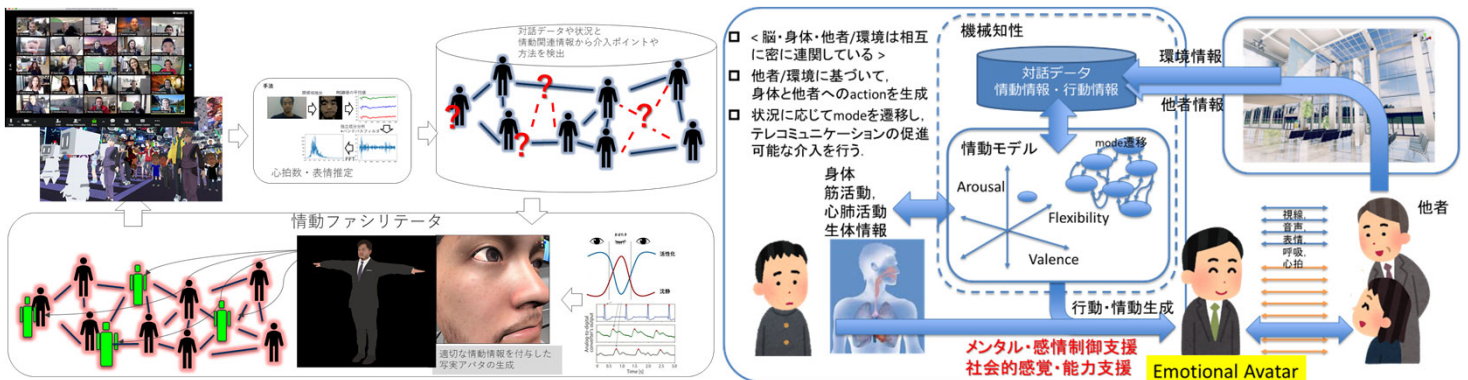


豊田中央研究所
堺浩之(右)

機械知性では、情動メカニズム研究の知見を踏まえ、VR、ウェアラブル、ロボット等の技術を活用して、情動の可視化や誘導、情動に関連する認知行動特性や心理特性についての実験を行い、データ収集と分析を行う。また、人と相互作用する知能機械において情動メカニズムが果たすべき役割を構成論的研究により調査し、情動メカニズム研究にフィードバックすることを目指す。さらに、社会展開を想定した情動・感情介入による人の社会的能力の向上やグループの創造性の向上を想定した技術の提案と実証を行う。

VR、ARの技術を活用したコミュニケーションを促進する情動を誘発する技術として、視覚だけではなく、聴覚、触力覚といった多感覚情報に注目して研究開発を行っている。特に、自己や他者の情動反応を変調して伝送することで感情喚起を行うシステムの開発、手を使った作業を妨げない触力覚提示を実現するウェアラブルデバイスの開発を行っている。また、情動や感情のセンシング技術として、VR体験時の顔面の血流量と呼吸を計測可能とするHMD一体型のセンシングデバイスの開発や、ビデオ会議システムと共存できるビデオ画像からリアルタイムに心拍数及び表情を推定し蓄積するミドルウェアの開発を行った。

これらの情動センシング技術と情動誘発技術をVRプラットフォームや一般的なビデオ会議システムに接続し、情動に関する行動特性や心理特性の検証やデータ収集を行うVRプラットフォームや実験環境の構築を行っている。構築した実験環境を用い、対話データと情動に関連する生体情報や表情、音声における感情情報の蓄積と解析を行い、情動メカニズムに基づくコミュニケーション促進や創造性の向上を実現する介入ポイントや方法の提案と実証を行う。



最終目標と今年度目標

最終目標は、コミュニケーションを通じた認知行動機能・意欲・創造性・やりがい等の向上につながる人への働きかけ手法の社会実装と、情動アルゴリズムに基づく人と相互作用する機械知性の様式解明と要素機能構築である。今年度は、情動誘発の実験及びデータ収集プラットフォームとして、ビデオ画像から情動情報となる心拍変動や血流量を取得できるセンサデバイスやアルゴリズムの開発、さらにその情報をアバター表情に反映できるアバタを構築し、最終的に情動モデリングの成果である心拍モデルに結合し、自律的な情動反応を示す写真アバタを目指す。また、感情手掛かり(表情、声色など)のリアルタイム変調がグループの創造性に与える影響をビデオ会議システム上で検証するための実験系を構築を目標とする。

今年度成果

(1)情動誘発技術実験プラットフォームの構築

情動アルゴリズムに基づく人と相互作用する機械知性の様式解明と要素機能構築のための実験プラットフォームの構築を行った。特に、昨年度開発した情動誘発技術やセンシング技術を、オンラインコミュニケーションへの展開するための実験システムの開発を行った。

まず、表情に加え心拍や血流による繊細な情動反応を提示可能な写真的リアリティの高いアバタを、遠隔間で活用できるテレコミュニケーション環境の試作をおこなった。メタバース対応を想定し、ネットワークを介したマルチユーザーでの参加が可能にし、メタバース上のオフィスにそれぞれ離れた場所から参加可能なシステムを実現することができた。このシステムでは、ユーザの視線、音声、表情、呼吸、心拍をHMDを介してセンシングを行い、適切に表出可能なアバター(Emotional Avatar)として遠隔間、メタバース内でのコミュニケーションが可能になる。これにより一般的なメタバース・遠隔VR環境では欠落しているコミュニケーション促進に不可欠な情動や共感に関わる情報を、取り扱うことができる実験基盤を世界に先駆けて構築可能となった。



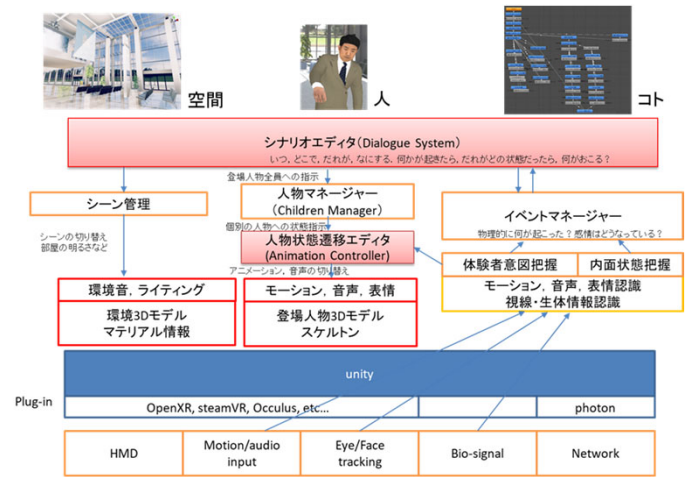
Emotional well-beingを実現するテレコミュニケーション実験基盤

(2)VRアバターが情動に与える影響の評価

VRアバターを用いたオンライン心理支援における、非言語コミュニケーションの豊富さと対面性の低さの役割を検討するために、比較実験を行った。動きのあるアバターと動きのないアバタの比較により、心理支援における心理士の非言語コミュニケーションの豊富さの有効性が示唆された。また、VRアバターとビデオ会議システムの2つの通信形式による心理面接を体験し、各面接を評価した。各面接の評価点の差をt検定で分析した結果、アバター通信を用いた心理支援における心理士の対面性の低さの有効性が示唆された。

(3)AIアバター構築プラットフォームの検討

情動を喚起する対人コミュニケーションを実現する自律アバターを構築するためのプラットフォームの試作を行った。自律アバターの実現には、人物の3Dモデルだけではなく、どのような状況でどのタイミングでどのように会話への介入を行うか、その介入にはどのような音声や表情、モーションをするかをあらかじめ登録する必要がある。そのため、人物状態遷移とどのような対応を行うかを、人物状態遷移エディタとシナリオエディタとして分離し、簡易に修正・管理できる様に設計と実装を行った。



情動介入のためのAIアバター実現のためのVR・メタバースプラットフォームの設計

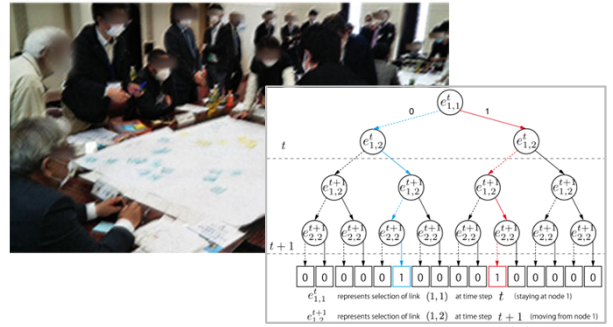
今後の展開

今年度構築した実験プラットフォームを活用し、アバターを介した情動反応伝達がメタバース共同作業に与える効果などをさらに検証する。具体的には共同作業中の情動反応の収集を行い、収集データに基づいた写真アバターへの情動反応の反映を実現する。実現したアバターとの対面及びオンラインの共同作業を行い、情動反応伝達の有無により、体験者の感情や作業内容への影響を検証する。さらに、体験者の情動・感情状態や対話内容に応じた、アバターの表出すべき情動反応の推定手法を情動メカニズムの知見を踏まえて検討する。グループ創造性に与える影響や、将来的に、オンラインコミュニケーション上の情動情報のセンシングによる、コミュニケーションのボトルネックを検出し、適切に情動を誘発するVR技術や情動をファシリテートするAIアバターにより、コミュニケーションの促進と創造性の向上を実現を目指す。

モビリティまちづくりの実証的研究と都市のダイナミクス分析

(目標)モビリティによる持続可能なまちづくりの設計、および、長期的な都市構造への影響分析手法を確立

(アプローチの特徴) モビリティを活用した、賑わいのある、災害にも強いまちづくりを目指して、最適化や行動モデルの数理研究と同時に、地域住民との共創によるサービス設計・実装に取り組んでいる。また、モビリティが長期的に都市構造へ与える影響についても、分析を進めている。



東京大学
羽藤英二(左)



豊田中央研究所
志賀孝広(右)

概要

本研究領域では、ネットワーク上の行動モデルを下敷きにした新たな都市設計理論の構築とその社会実装の研究に取り組んでいる。リニア開通によって社会モビリティの環境が激変することが予想されている中津川と、首都圏において津波や洪水リスクの高いとされている江東区を対象敷地として、自動走行やシェアリングサービスなどの新たなモビリティサービスによって実現可能な新たな社会像を地域と共に共有を図り、社会実験の実現に成功している。

社会実験の実施に際しては、新たな技術の社会的受容性を高めていくための方法論が求められる。地域ワークショップの定量的な解析やその可視化、地域社会の歴史的経緯を踏まえながらサービス評価を行い、受容可能な未来の社会像を共有していくことに取り組むことで、確度の高い導入プロセスの構築を図っている。

新たなモビリティサービスとして、需要がスパースな中津川には貨客混載型のモビリティサービスを、首都圏避難が困難であることが2019年の台風によって明らかとなった江東区には自動走行避難サービスの導入を想定している。これらのサービスを支えるのは、ニューモビリティの時空間ネットワーク上の正確な需要予測技術と、需要の重ね合わせによる最適化の実現である。

貨客混載のようなサービスの最適化は、NP-Hardの問題であると同時に再計算性の性能確保が必須となることから、貨客混載経路の組み合わせ問題を構造化処理したデータベース構造とすることで、モノとヒトの輸送のより高速な最適化計算が可能なアルゴリズムの開発に成功している。

また、このようなサービスを導入することによって、地域社会の人々の活動分布は大きく変容することになる。自動走行やシェアリングの浸透による活動分布と土地取引のダイナミクスは互いに相互依存関係にあることを踏まえて、モビリティサービスが投入されることで変化する都市の回遊パターンと土地取引や土地利用を都市シミュレーションによって再現・予測する研究にも取り組んでいる。

開発を進めている都市シミュレーションでは、新たなモビリティサービスやそのアルゴリズムを組み込むと同時に、単なるモビリティサービスの評価を超えて、カーボンニュートラルや地域社会の持続可能性という観点から多元的な評価を可能にするを目指している。

最終目標と今年度目標

最終

- ・貨客の輸送の同時最適化を可能にする不動産と不動産の最適オペレーション技術の開発
- ・ニューモビリティサービスが新たな都市社会に与える影響の評価が可能な数値計算シミュレータの開発

今年度

- ・貨客混載と自動運転避難を対象とするモビリティサービスのアルゴリズム開発
- ・生成モデルを援用した時空間ネットワーク上の相互動的交通行動モデルの構築
- ・モビリティと地域の活動分布、立地の動学モデルの開発

今年度成果

(1)中津川付知町における
クーポン付きモビリティサービス実験

①実験概要

2022年10月に実施した社会実験では、自動運転車両での公共交通の社会実装を念頭に、3種類のモビリティ実験が行われた。「①無料の完全予約制タクシー型車両」(デマンド型)では、町内を新しい地域拠点である地域デザインミュージアムまでの所要時間に応じて2エリアにわけ、エリア毎に予約時に選択してもらうスロットを変えることでリクエストの実行可能性を担保した。「②無料シャトルバス」では、イベントが行われている道の駅とミュージアムという拠点間輸送を試みた。「③北恵那バス木簡切符販売」では、フリー区間をもつ特別切符を販売した。



北恵那交通木簡切符



利用者人数	総数	10/15(土)	10/16(日)
①デマンド	157人	88人	69人
②シャトル	28人	17人	11人
③北恵那	18人	13人	4人

②アンケート結果

社会実験に併せ、実験参加者を対象に聞き取り調査を行った。②シャトルバス利用については、付知町外在住の参加者の6割が「シャトルバスがなければミュージアム周辺を訪問していなかった」と回答し、観光客を地域内部へと取り込む効果が示された。また、付知町在住者へデマンド交通が実装された場合の利用意向を訪ねたところ、免許非保有者は過半数が利用の意向を示したものの、免許保有者は大半が自家用車利用を継続すると回答し、実装に向けた課題が示された。

(2)江東区 避難訓練実験

2022年3月から4月にかけて東京都江東区で避難行動調査と避難訓練の繰り返し調査を実施した。浸水地域から非浸水地域への広域避難体験や、地域の災害リスク情報の提供の前後で、巨大台風接近時の避難行動が変化するかを調査した。267名が参加し、災害意識の向上や安全な避難場所の認知につながったという感想が寄せられた。

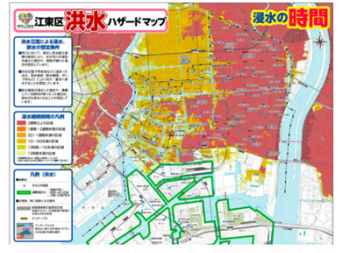


図1 災害リスク情報の提供 (出典：江東区)



図2 広域避難体験の様子

自動走行避難の需要予測や、情報による膨大な避難需要の適切な制御を行うため、災害情報の学習による行動変化を表現する避難行動モデルを構築した。提案モデルは、将来効用を考慮した意思決定を表現できるRecursive Logitモデルを時系列に適用し、避難情報の学習が意思決定に与える影響をパラメータとして推定した。

表1:避難行動モデルの推定結果

目的地的効用の変化	①非浸水域居住・避難		②非浸水域居住・非避難		③浸水域居住・避難		④浸水域居住・非避難	
	estimates	t-stat	estimates	t-stat	estimates	t-stat	estimates	t-stat
1. 目的地的浸水域内(0/1)	0.876	0.73	56.842	0.09	-0.672	-0.94	-2.453	-1.78*
2. 避難訓練(自宅選択時, 0/1)	-1.370	-1.83*	-282.833	-0.34	-2.340	-2.30*	-1.529	0.94
3. 目的地的混雑情報(非自宅選択時, 0/1)	-1.322	-2.31*	-1.081	-1.50	-8.166	-8.19*	-1.454	-1.29
記憶率 for 1	1.000	1.39	0.023	0.09	1.000	3.24**	0.769	3.55**
記憶率 for 2	1.000	7.04**	0.006	0.34	1.000	7.50**	0.863	2.98**
記憶率 for 3	0.850	7.60**	1.000	5.97**	0.133	0.19	0.950	5.33**
慣性項(現在の行動を繰り返す時, 1)	0.664	9.59**	0.795	6.41**	0.790	11.25**	0.694	5.22**
number of samples	48		84		52		60	
initial log-likelihood	-361.9		-148.8		-360.9		-141.8	
final log-likelihood	-297.3		-84.0		-284.5		-85.5	
likelihood ratio	0.179		0.436		0.212		0.397	
adjusted likelihood ratio	0.159		0.389		0.192		0.348	

推定の結果、居住地の災害リスクとももとの避難意向によって避難体験や災害情報に対する反応が異なることが明らかになった。特に、浸水域に居住しているが元から避難する意向がない人には、ハザードマップの提示により浸水域にとどまる選好を低下させられる可能性がある。本モデルを活用して、個人に焦点を当てた避難情報の提供の最適化や、モビリティによる避難支援へ展開していく。

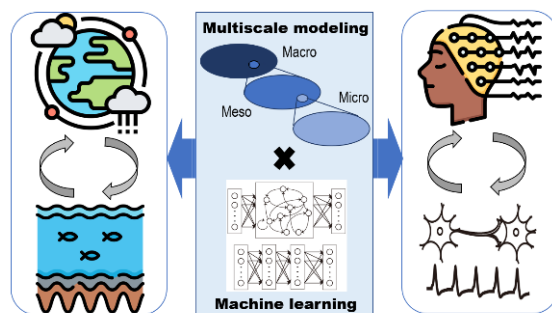
今後の展開

本研究の最終目標は、都市構造への長期的影響にも配慮した、モビリティによる持続可能なまちづくりの設計・実装手法の確立である。今後は中津川及び江東区における実証実験で取得したデータの分析を進め、モビリティの最適化や行動モデルの研究をさらに推進していく。

マルチスケール複雑適応系解析

(目標)複雑適応系の時空間データを高速・高精度に予測し、要素間の因果関係を解析する技術の確立

(アプローチの特徴) 人・社会・環境などの動的な複雑適応系を対象として、さまざまな時空間スケールを考慮した数理的手法を開発し、実現象の解析、予測、制御、最適化などを行っている。たとえば、機械学習(AI)に基づくマルチスケールモデリング手法の開発を行い、気候変動や脳活動に関わるデータ解析技術の発展を目指している。



Icon made by Freepic from www.flaticon.com, (C) 2021 Gouhei Tanaka



東京大学
合原一幸(左)
田中剛平(中)
豊田中央研究所
吉田広顕(右)

概要

自動車、IT通信各産業が目指している高度モビリティ社会は、同時に地球環境負荷が小さくサステナブルである必要がある。その実現のためのアプローチに共通するキーワードが、「繋がり」と「循環」である。人やまち、地域や自然が互いに繋がり、物質やモノ、情報の円滑な移動と循環を可能にすることがカギとなる。たとえば、トヨタ環境チャレンジ2050は6つの課題にブレークダウンされているが、CO₂や水、モノのチャンネルをつなぎ、循環する未来が描かれている。個々のアプローチに共通する課題として繋がりの大規模化、構成要素の複雑化がある。

系が大規模でネットワークが広範にわたることに加え、個々の構成要素である人(脳・体)や社会、まちそれぞれの振舞いが「単体でも」極めて複雑なことが、数理工学がこれまで威力を発揮してきた物理、化学や工学の諸分野と異なる点である。たとえばこれは、分子を構成要素とした繋がりからなる物質を調べるケースでは、個々の分子が決められた法則に則って運動することと対照的である。物質の振舞いにも十分難しい問題が含まれるが、人やまち、社会を考えるとときには、その構成要素が従う統一的な法則はまだ見いだせていない。構成要素がせいぜい数個程度からなるシステムはどうか扱えても、それが何千・何万と連結した大規模系は、きわめてマルチスケール性が高く、その振舞いの解明と制御がとても難しい。たとえば、以下のような現象には、複数の異なるスケールのダイナミックな現象が関わっている。

- 気候変動: 海洋と大気の循環を主として異なる空間スケールでのダイナミクスの相互作用が関係し、季節性や氷期—間氷期サイクルのような異なるスケールの時間的周期性を有する
- 脳活動 : 個々のミクロな神経細胞が集団として神経ネットワークレベルでのマクロな神経活動や情報処理機能を生み、脳状態を特徴づけるさまざまな周波数の脳波が知られている
- 交通系 : 交通規則の制約の下で個々の車(運転手)の自由意思による走行が集団としてのマクロな交通流を生み、交通情報がフィードバックされて個々のローカルな走行パターンを変えるという循環性をもつ

本研究領域では、このような人・社会・環境などの動的な複雑適応系を対象として、さまざまな時空間スケールを考慮した数理的手法を開発し、実現象の解析、予測、制御、最適化に応用する研究活動を行っている。

こうした数理的手法を支えるのは、複雑適応系の数理モデリングである。支配法則が明らかな対象には、物理法則等に基づいて数理/物理モデルを構築することができるが、上記のような複雑的適応系では必ずしもそれが可能ではない。そこで、そのような対象には、現象論的モデルやデータ駆動型モデルの活用が有望となる。マルチスケール系に対応する、これらのモデリングの枠組みはまだ発展途上なので、個別研究を進めながら知見を蓄え、より汎用的なモデリング技術を体系化することを目指していく。

最終目標と今年度目標

本研究の最終目標は、複雑適応系のダイナミクスをデータ駆動型解析により理解、制御することを通して、高度モビリティ社会実現の先回り課題に資する数理基盤技術を構築することである。そのために今年度は、気候変動・脳活動・交通系の実データに対し将来予測、因果解析、および急激な変化の予兆を検出する技術を適用し、手法の有効性を検証する。

今年度成果

(1)マルチ時間スケールデータに対するリザーブコンピューティングの発展と応用

複数の時空間スケールをもつシステムは、物理や生物学、医療など様々な分野で見られるが、全てのスケールの現象について支配法則が分かっているケースは少なく、解析や予測が難しい。このような場合に有効な、データに基づいてモデルを構築することのできる機械学習法はまだ確立されていない。本研究の目的は、リザーブ計算の枠組みに基づいて、マルチスケールダイナミクスの予測に有効な手法を開発することである。

本年度は、昨年度に提案した発展的リザーブ計算手法を用いて、実世界の複雑データである脳波(EEG)のパターン認識に取り組んだ。睡眠時無呼吸症候群の研究用に測定されたEEGのベンチマークデータを利用し、覚醒状態と浅睡眠状態を分類する機械学習タスクを行なった。ある被験者のEEGデータに対し、適切な前処理を施してからリザーブ計算を行なったところ、他の最先端の分類手法に匹敵する高い認識率が得られる可能性が示唆された(図1)。

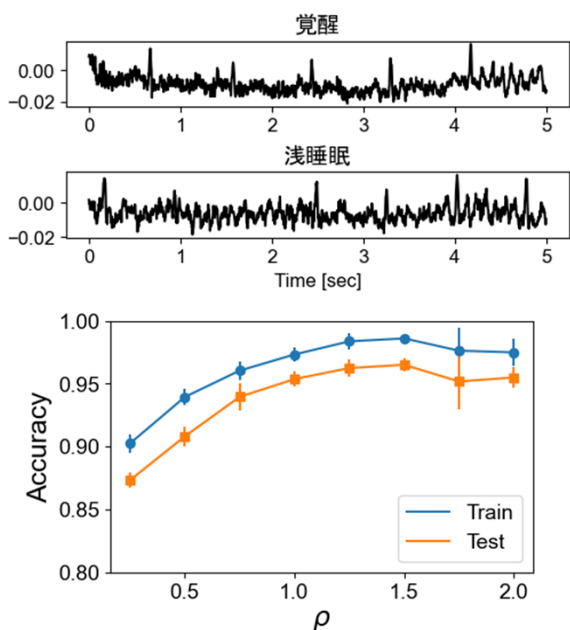


図1. 脳波EEGデータの例(上)、覚醒状態と浅睡眠状態の2値分類タスクの正解率(下)

(2)スタジアム周辺の人流に関する数理モデリング

大規模イベントの内容やイベント会場の特徴が周辺地域に与える影響を明らかにするために、実データを用いた解析を行なった。2018-19年に実施されたJリーグの公式試合について、モバイル空間統計データから得られるスタジアム周辺の滞在人数の変化(図2a)に与える影響を、回帰分析により解析した。

解析の結果から、試合後に観客が会場周辺に留まる時間は、ホームチームが勝利した場合長くなり、逆に敗北した場合は短くなるのが分かった。さらに、「逆転勝ち」や「大差負け」といった試合の内容も人流に影響を及ぼすことが分かった。

また、回帰モデルから得られる会場ごとの滞在時間の違い(図2b)を会場付近の商業地の分布を用いて再現する数理モデルを構築し、MCMCを用いたパラメータのベイズ推定を行なった。このモデルは、試合後の観客の行動を推定するもので、イベント会場の設計の指針となりうる。

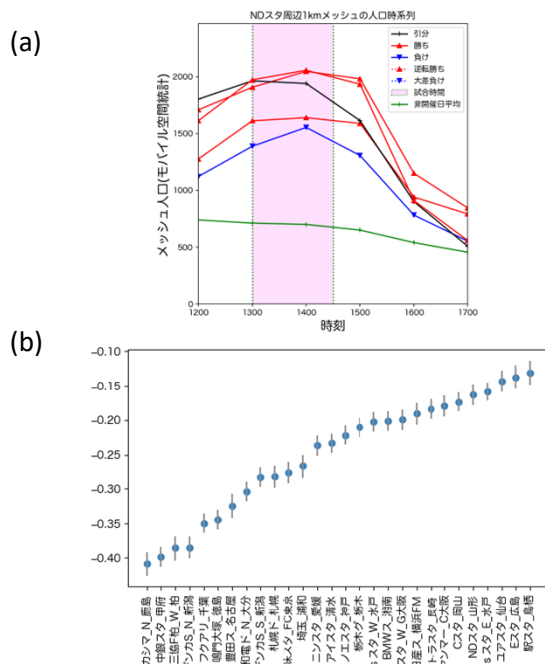


図2. (a) 会場周辺滞在人口の時間変化の例 (b) 会場ごとの滞在時間の傾向の違い

今後の展開

理想化されたデータに対して実証してきた数理解析技術を実データに適用して有効性を確認し、理想化データには現れないデータの複雑性・不完全性により生じる新たな課題に対して手法の高度化を進める。具体的には、社会システム関連のデータとして地価変動を取り上げ、交通インフラや商業施設との因果関係を解明する。

また、異常気象現象の発生と関連が強い大域気候現象の検知・予測に適用し、社会経済活動へのインパクトが大きい気候変動の理解を通してカーボンニュートラルに貢献する数理基礎技術を確立を目指す。

さらに、複雑な変動を示す脳波データのパターン認識技術を運転時眠気検知や疾病早期発見に活用する。

所属研究者

情動モデリング

東京大学	情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 ニューロインテリジェンス国際研究機構(IRCIN)	教授 准教授 助教 特任助教 特任研究員 特任研究員 博士課程 博士課程 博士課程 修士課程 修士課程 特任教授	國吉 康夫 中嶋 浩平 井上 克馬 金沢 星慶 小倉 有紀子 米倉 将吾 Dongmin Kim Elena Skoullou Wei Yu 阿部 由吾 成田 淳志 長井 志江 (協力研究者)
豊田中央研究所	イノベティブ研究企画・推進室 ヒューマンサイエンス研究領域 ヒューマンサイエンス研究領域 ヒューマンサイエンス研究領域 ヒューマンサイエンス研究領域	室長 研究領域リーダー リーディングリサーチャー	山田 大介 杉浦 豪軌 岩本 正実 渥美 範俊 平林 智子

機械知性

東京大学	情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科	特任教授 特任研究員 特任研究員 博士課程 修士課程 学士課程 学士課程	谷川 智洋 大村 吉幸 Magrans de Abril, Ildefons 金 希哲 阿部 由吾 濱野 将伍 宮ノ原 優斗
豊田中央研究所	バイオインスパイアードシステム研究領域 バイオインスパイアードシステム研究領域 バイオインスパイアードシステム研究領域 バイオインスパイアードシステム研究領域	研究領域リーダー リーディングリサーチャー	村本伸彦 堺 浩之 岩井 幸一郎 前田 智祐

広域・長期的な都市形成過程の分析・モデリング・制御

東京大学	工学系研究科	教授	羽藤 英二
	工学系研究科	助教	小林 里瑛
	工学系研究科	特任研究員	北原 麻理奈
	工学系研究科	博士課程	黛 風雅
	工学系研究科	博士課程	増田 慧樹
	工学系研究科	特任研究員	原 祐輔
	次世代知能科学研究センター		
豊田中央研究所	社会システム研究領域	研究領域リーダー	志賀 孝広
	社会システム研究領域	リーディングリサーチャー	西 智樹
	社会システム研究領域	リーディングリサーチャー	日高 健
	社会システム研究領域	リーディングリサーチャー	吉村 貴克
	社会システム研究領域		池貝 未来
	社会システム研究領域		大脇 崇史
	社会システム研究領域		清水 麻里子
	社会システム研究領域		早川 敬一郎
	モビリティ基盤創成研究企画・推進室	グループリーダー	牧野 玲子
	クラウドインフォマティクス研究領域		石井 良尚

複雑適応系の時系列データに対する因果解析と予測

東京大学	ニューロインテリジェンス国際研究機構(IRCN)	特別教授	合原 一幸
	ニューロインテリジェンス国際研究機構(IRCN)	特任准教授	田中 剛平
	情報理工学系研究科	特任研究員	山下 洋史
豊田中央研究所	数理工学研究領域	研究領域リーダー	小島 祥子
	数理工学研究領域	リーディングリサーチャー	吉田 広顕
	数理工学研究領域		井上 大輔
	数理工学研究領域		小山 志穂里
	数理工学研究領域		岡田 明久
	数理工学研究領域		大山 倫弘
	数理工学研究領域		川本 敦史
	数理工学研究領域		生田 靖弘
	数理工学研究領域		大滝 啓介
	バイオインスパイアードシステム研究領域		原田 匠

情動モデリング

- [1] T. Takada, W. Shimaya, Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi : “Disentangling Patterns and Transformations from One Sequence of Images with Shape-invariant Lie Group Transformer”, IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL) 2022
- [2] S. Hamano, H. Kim, Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi : “Using human gaze in few-shot imitation learning for robot manipulation”, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2022 (IROS2022)
- [3] A Narita, H Kanazawa, S Yonekura, Y Kuniyoshi : “Cognitive flexibility associated with respiratory cardiopulmonary dynamics”, Society for Neuroscience 2022
- [4] H Kanazawa, Y Yamada, K Tanaka, M Kawai, F, Niwa, K Iwanaga, Y. Kuniyoshi: Open-ended movements structure sensorimotor information in early human development, PNAS
- [5] S. Yonekura, J. Cueto, H. Kanazawa, N. Atsumi, S. Hirabayashi, M. Iwamoto, Y. Kuniyoshi : “A neuromodulatory model for determining the effect of emotion-respiration-cognition coupling on the time-to-respond”, [submitted to PLoS One]
- [6] M. Iwamoto, S. Yonekura, N. Atsumi, S. Hirabayashi, H. Kanazawa, Y. Kuniyoshi: “Respiratory entrainment of locus coeruleus modulates arousal level to avoid physical risks from external vibration ”, (accepted by Scientific Reports)

機械知性

- [7] Maeda T, Yoshida S, Murakami T, Matsuda K, Tanikawa T, Sakai H: “Fingeret: a wearable fingerpad-free haptic device for mixed reality”, Proceedings of the ACM Symposium on Spatial User Interaction
- [8] Hamano S, Kim H, Ohmura Y, Kuniyoshi Y: “Using human gaze in few-shot imitation learning for robot manipulation”, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [9] Wei Y, Ogura Y, Ohmura Y, Magrans de Abril I, Kanazawa H, Kuniyoshi Y: “Integrated altruistic and fairness preference induces advanced mutual cooperation in sequential social dilemmas”, International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems

広域・長期的な都市形成過程の分析・モデリング・制御

- [10] 西智樹, 原祐輔, 大社綾乃, 吉田広顕, “活動文脈を考慮したSP調査に基づく移動販売店舗の選択要因分析”, 土木計画学研究発表会(春大会), 2022.6
- [11] 池貝未来, 増田慧樹: “江東区を対象とした水害時避難促進のための実証実験による避難行動分析”, 日本モビリティマネジメント会議(JCOMM), 2022.8
- [12] Fuga Mayuzumi, Keiichiro Hayakawa, Eiji Hato, “A Dynamic Scheduling Algorithm based on Marginal Contribution in Mixed Passenger-and-Freight Delivery Networks”, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2022.10
- [13] 池貝未来, 日高健, 増田慧樹, 羽藤英二, “リスク認知が避難行動に与える影響の分析-繰り返しSP調査を用いた河川氾濫に対する主観確率の回帰モデリング”, 土木計画学研究発表会(秋大会), 2022.11
- [14] 増田慧樹, 池貝未来, 羽藤英二, “異質性に着目した強化学習に基づく動的避難目的地選択モデル”, 土木計画学研究発表会(秋大会), 2022.11
- [15] Satoki Masuda, Eiji Hato, “Evacuation choice modeling using reinforcement learning based on the multi-armed bandit problem”, The 12th International Conference of the International Society for the INTEGRATED DISASTER RISK MANAGEMENT, 2022.9
- [16] 黛風雅, 羽藤英二: 貨客提携ネットワーク上の動的システム最適配分とそのシャープレイ評価, 第65回土木計画学研究発表会, 2022.6
- [17] 小林里瑳, 羽藤英二: Gale-Shapleyアルゴリズムによる微視的土地取引メカニズムのモデル化と実証, 第66回土木計画学研究発表会, 2022.11
- [18] R. Kobayashi, E. Hato, Microscopic interaction model between land ownership-pedestrian trip chains with integrated structure estimation algorithm, the 16th IATBR conference, 2022.12

複雑適応系の時系列データに対する因果解析と予測

- [19] G. Tanaka, T. Matsumori, H. Yoshida, K. Aihara, “Reservoir Computing with Diverse Timescales for Prediction of Multiscale Dynamics,” *Physical Review Research* 4 (3), L032014 (2022)
- [20] 山下洋史, 吉田広顕, 西智樹, 原祐輔, “Jリーグ試合終了後の会場周辺人流に影響を及ぼす要因の統計解析:メッシュ人口時系列データを用いた分析”, 土木学会論文集 (査読中)
- [21] A. Okada, D. Inoue, S. Koyama, T. Matsumori, H. Yoshida, “Dynamical cooperation model for mitigating the segregation phase in Schelling’s model,” *The European Physical Journal B* 95 (10), 1-10 (2022)
- [22] T. Akiyama and G. Tanaka, “Computational efficiency of multi-step learning echo state networks for nonlinear time series prediction,” *IEEE Access*, 10, pp. 28535-28544 (2022).
- [23] Z. Li and G. Tanaka, “Multi-Reservoir Echo State Networks with Sequence Resampling for Nonlinear Time-Series Prediction,” *Neurocomputing*, 467, pp. 115-129 (2022).
- [24] Z. Li, Y. Liu, G. Tanaka, “Multi-Reservoir Echo State Networks with Hodrick-Prescott Filter for Nonlinear Time-Series Prediction,” *Applied Soft Computing*, 135, 110021 (2023).
- [25] 合原一幸: “高次元データ解析手法の開発と脳科学への応用可能性”, 玉川大学脳科学研究所特別講演会, 招待講演, オンライン, 4月18日(2022).
- [26] 合原一幸: “ニューロモルフィック人工知能研究はどこまで進んだか:人と社会を幸せにするテクノロジーとは?”, KISTEC先端科学技術セミナー2022, 招待講演, オンライン, 4月22日(2022).
- [27] 合原一幸: “複雑系数理モデル学とニューロインテリジェンス”, 2022年度応用脳科学アカデミー, 招待講演, オンライン, 7月13日(2022).
- [28] 合原一幸: “先端数理による複雑社会現象の解明とその実装”, 第87回WIN定例講演会・第42回人間情報学会講演会『人間と人工物の関係をスムーズにつなぐ社会技術』, 招待講演, オンライン, 9月6日(2022).
- [29] 合原一幸: “複雑系数理モデル学とその未病科学研究などへの応用”, 第62回日本臨床化学会年次学術集会, 特別講演, 富山市, 9月30日-10月2日(2022).
- [30] 合原一幸: “複雑系数理モデル学とその高次元データ解析への応用”, 東京理科大学研究推進機構総合研究院第7回総合研究院アカデミー, 招待講演, 東京, 10月11日(2022).
- [31] 合原一幸: “複雑系数理モデル学とICT”, IEICE ICT PIONEERS WEBINARシリーズ ~第31弾~, 招待講演, オンライン, 11月25日(2022).
- [32] 合原一幸: “未病の数理:複雑系数理モデル学からのアプローチ”, 日本人類遺伝学会第67回大会, 特別講演, 横浜, 12月16日(2022).
- [33] 田中 剛平, “リザーバーコンピューティングとマルチスケールモデリング,” 電子情報通信学会総合大会, チュートリアルセッション「NBT-1. 次世代ネットワークを支える数理モデルの展開」, 招待講演, 3月8日(2023).
- [34] 田中 剛平, “AIによる複雑ダイナミクスのパターン認識,” 日本生理学会第100回記念大会, 100周年記念事業委員会企画シンポジウム「AIが切り開く医学・生理学・生命科学の新展開」, 招待講演, 3月15日(2023).