

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 2021



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。

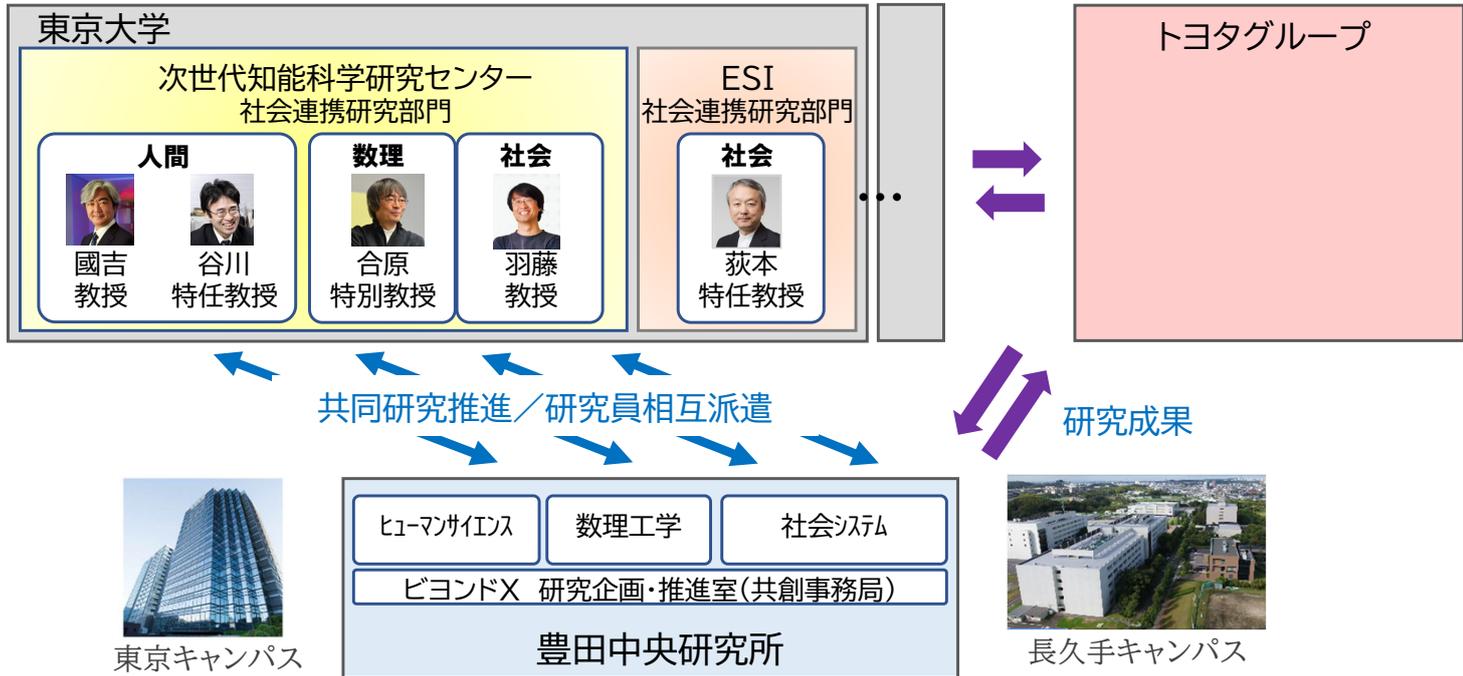
当社会連携研究部門の特徴の一つが、産学協創の研究機関として大学と企業が全力でがっぷり四つに組み、研究に取り組んでいることにあります。すなわち企業側として将来を託す生命線となるような最重要技術に対して、大学側としても極めて学術的意義が高く最先端のフロンティアを目指す研究課題群が設定され、それらに対して学術、社会実装両面で協働して取り組んでいる点です。

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。

設置から約2年が経過し、その端緒となる重要な研究成果が創出されつつある中、この度2021年度の成果を年次報告としてまとめました。モビリティ知能社会デザイン社会連携研究部門の今後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



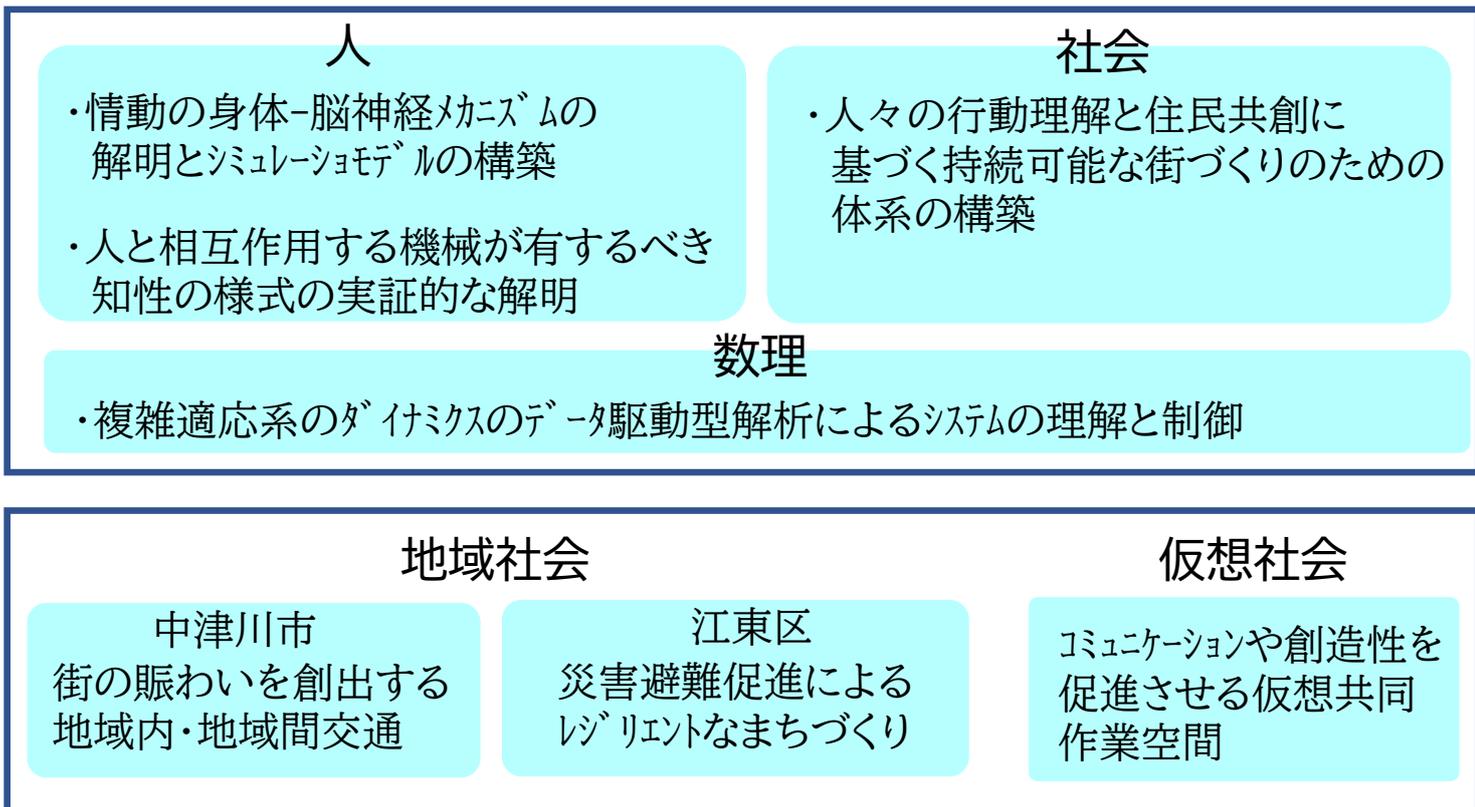
2. 研究内容

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



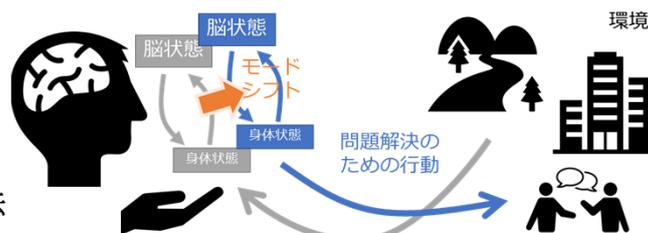
目次

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

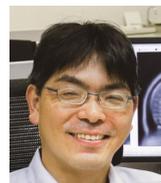
情動メカニズム

(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、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モデルの高度化を進めるとともに、生理実験計測を実施し呼吸性情動認知におけるモードシフトについて調査した。また、情動的モードシフトの要因の一つと考えられる社会的他者の行動がモードシフトに及ぼす影響を調査することを目指して、社会的相互作用における意思決定の計算技術を開発した。

今年度成果

(1) 身体-脳神経連成モデルの高度化

ヒトにおける恐怖か驚愕かの表情識別タスクにおいて、刺激提示から恐怖か驚愕かの判断のためのボタンを押すまでの反応時間は、恐怖表情提示時は吸息時に速くなり、個人差はあるものの驚愕表情提示時は吐息時に反応時間が速くなる現象が報告されている[1]。この現象を再現するため、前年度までに開発した身体-脳神経連成モデル[2]における青斑核-皮質認知系の部分を改良することにより高度化を試みた。具体的には、覚醒度調整に寄与する青斑核が血中二酸化炭素濃度(pCO2)センサや肺伸展センサや呼吸制御中枢からの情報入力を受けているという神経生理学的根拠に基づき、3つの内受容情報が異なるゲーティングを受ける機構をもつ青斑核-皮質認知系モデルを構築した(図1)。改良後のモデルを用いた計算結果は文献[1]で報告された現象を再現した。この際、恐怖と驚愕という一見区別がつかない異なる情動のモードの入力に対して青斑核-皮質がカップリングすべき内受容情報が切替わることがわかった。

[1] Zelano et al. J.Neurosci. 36(49), 2016.
[2] Cueto et al. CNS2019.

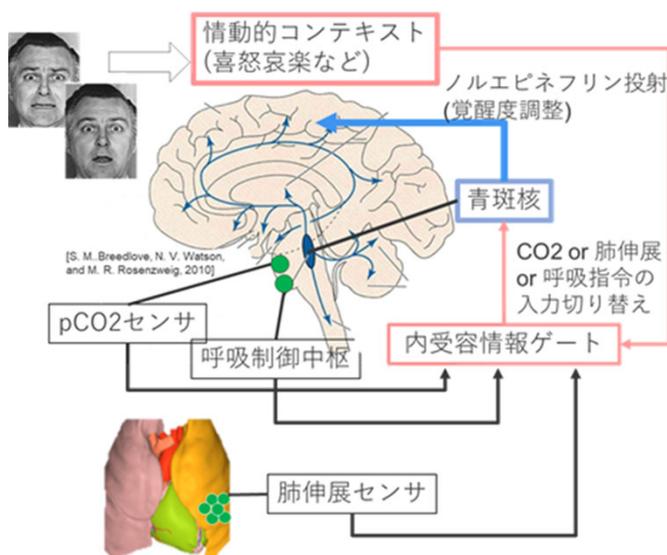


図1. 青斑核-皮質認知系モデルの高度化

(2) 情動認知におけるモードシフトの生体実験計測

情動認知におけるモードシフトを生体実験計測で捉えるため、筋活動計測、脳活動計測、呼吸・循環・代謝計測などを組み合わせ、脳-身体に内在する情報伝達ネットワーク構造の抽出に着手した(図2)。この技術を利用して、呼吸、循環、脳状態が知覚刺激に対する応答に与える影響を調査するため、両眼視野闘争*1に着目した実験計測を実施した。両眼視野闘争時の左右視覚情報の選択的認識は時間経過とともに交替するという特徴があるが、知覚交替に関連する要因は明確になっていない。そこで、両眼視野闘争を被験者に体験させたときの呼吸状態や循環状態、脳活動や筋活動との関係を詳細に調査した。その結果、呼吸位相により知覚交替(モードシフト)の発生状況が変化することがわかった。

*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

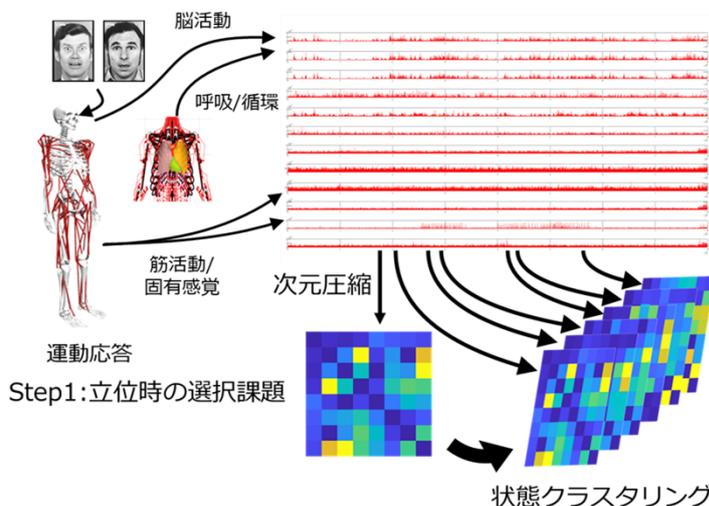


図2. 生体実験計測データから情動伝達ネットワーク構造の抽出

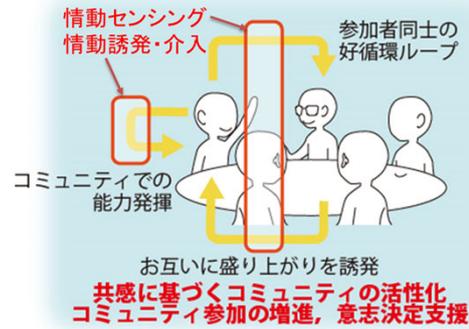
今後の展開

身体-脳神経連成モデルの皮質部分を高度化することにより、Positive・Negativeなモード間のシフトの前提となる、脳-身体の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。

また、立位時の選択課題、一定姿勢・周期運動での実験、自由環境下での行動実験を順次実施し、その際に行う筋活動計測、脳活動計測、呼吸・循環・代謝計測から、脳-身体に内在する情報伝達ネットワーク構造を抽出することにより、脳-身体の総合作用系のfunctional networkとそのflexibilityの動態の理解を目指す。

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



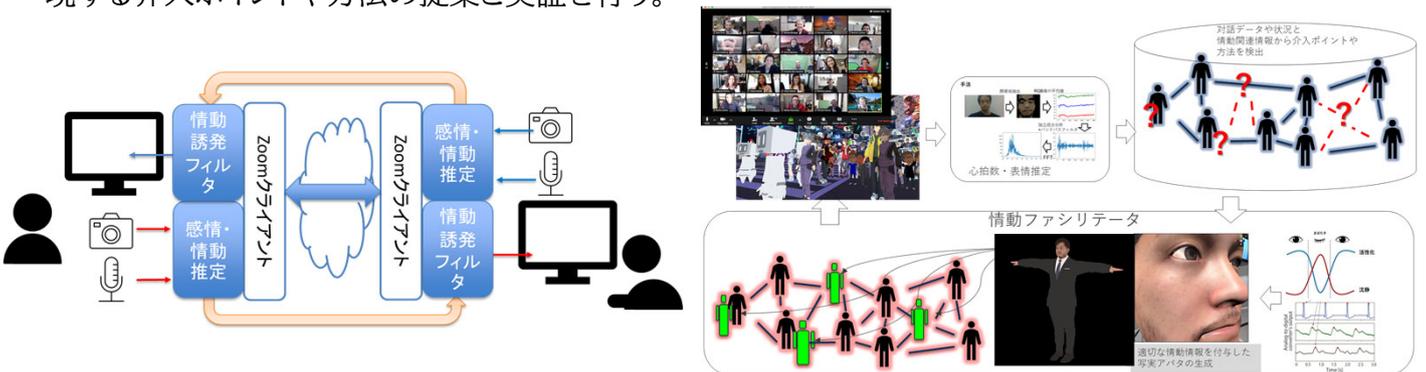
東京大学
谷川智洋(左)

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

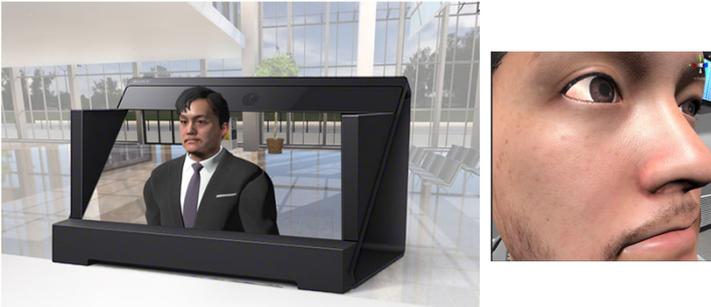
最終目標は、コミュニケーションを通じた認知行動機能・意欲・創造性・やりがい等の向上につながる人への働きかけ手法の社会実装と、情動アルゴリズムに基づく人と相互作用する機械知性の様式解明と要素機能構築である。今年度は、情動誘発の実験及びデータ収集プラットフォームとして、ビデオ画像から情動情報となる心拍変動や血流量を取得できるセンサデバイスやアルゴリズムの開発、さらにその情報をアバター表情に反映できるアバタを構築し、最終的に情動モデリングの成果である心拍モデルに結合し、自律的な情動反応を示す写実アバタを目指す。また、感情手掛かり(表情、声色など)のリアルタイム変調がグループの創造性に与える影響をビデ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

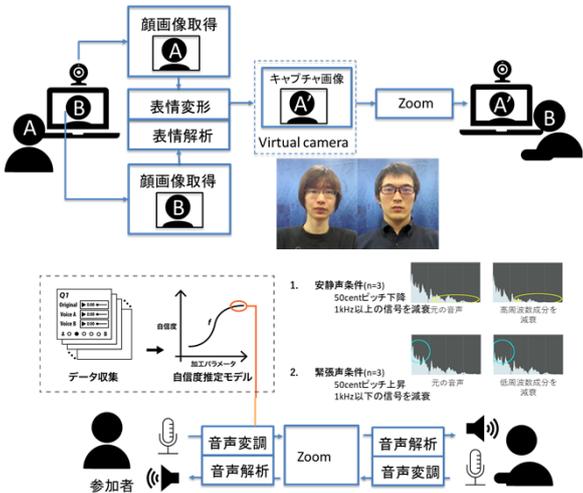
(1)情動誘発技術実験プラットフォームの構築

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、メタバース上のコミュニケーションへの応用を見据え、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構築した。また、グループ創造性の向上をターゲットとして、ビデオ会議システムを使った感情介入実験系を構築した。表情フィードバックを利用した感情誘発技術、音声変調のモジュールを一般的なビデオ会議システムに接続する仕組みを構築し、Zoomを介した情動介入実験を可能とした。



ビデオ会議システムでの情動推定・誘発技術の実験・データ収集プラットフォーム



ビデオ会議システムでの情動推定・誘発技術の実験・データ収集プラットフォーム

(2)指腹開放型触覚デバイスの開発

オンラインコミュニケーションや仮想空間における共同作業において多感覚情報の活用を実現するため、新たなウェアラブル触覚デバイス Fingeret を開発した。

このデバイスの特徴は、爪への振動刺激と、指側面へのせん断刺激を用途に応じて使い分けられることにある。これにより、低周波から高周波まで多様な触力覚を提示できることに加え、指腹が開放されることで、実空間と仮想空間双方のオブジェクトとシームレスな触覚インタラクションが可能になった。



開発したウェアラブル触覚デバイス Fingeret

(3)VRアバターが情動に与える影響の評価

情動を喚起する対人シミュレーションにおいて、ストレス指標研究者の協力のもと、構築しているVRアバターが体験者に適切に対人ストレスを与えられるかどうかの検証を行った。その結果、VRアバターによるクレマー接客体験後には、唾液中のストレス指標に顕著な上昇がみられた。アバターの態度によってストレスレベルをコントロールできる可能性が示唆された。



VRアバターによる対人ストレス付与の検証実験

今後の展開

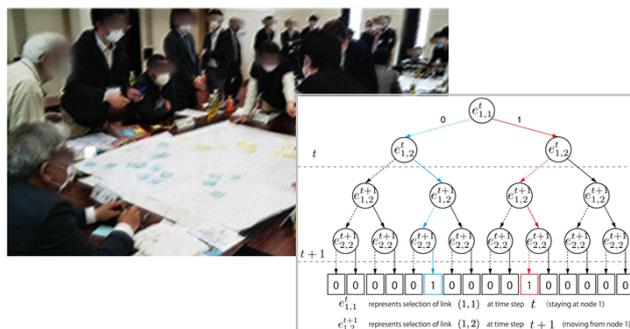
今年度構築した実験プラットフォームを活用し、ビデオ会議において感情手掛かりのリアルタイム変調がグループ創造性に与える影響や、アバターを介した情動反応伝達がメタバース共同作業に与える効果などを検証する。具体的には共同作業中の情動反応の収集を行い、収集データに基づいた写実アバターへの情動反応の反映を実現する。実現したアバターとの対面及びオンラインの共同作業を行い、情動反応伝達の有無により、体験者の感情や作業内容への影響を検証する。さらに、体験者の情動・感情状態や対話内容に応じた、アバターの表出すべき情動反応の推定手法を情動メカニズムの知見を踏まえて検討する。

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一昨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

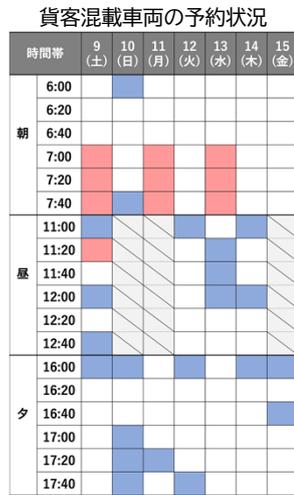
- ・貨客混載と自動避難を対象とするモビリティサービスのアルゴリズム開発
- ・時空間ネットワーク上の相互動的交通行動モデルの構築。
- ・社会実験の社会的受容性確保のための可視化技術の開発

今年度成果

(1)中津川 貨客混載

①中津川市付知町における貨客混載社会実験

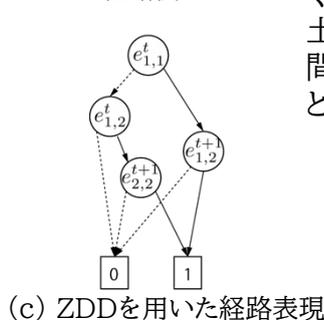
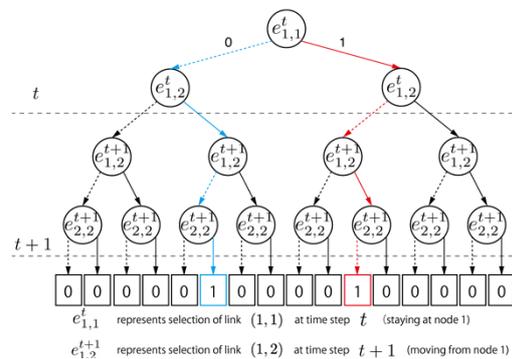
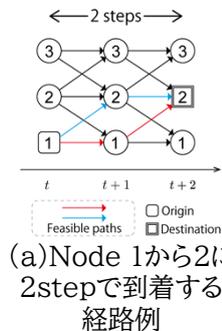
2021年12月に実施した貨客混載車両の社会実験では、道の駅を起点とする片道10分圏の範囲を対象に、20分を1スロットとして出発地・目的地を選択してもらってデマンド型で実施した。リクエストの実行可能性を担保するために、同じスロット内に複数のリクエストを受け付けないように設定した。モノの輸送として、道の駅への農産物出荷や広告チラシの配送の予約がみられた。ヒトの移動による予約は、昼の時間帯に多く見られた。全108件のスロットに対して32件の予約があった。



②逐次的な最適経路選択問題

貨客混載におけるマッチングは組合せ最適化問題であるが、求解アルゴリズムとしてZDDを用いた手法で、6ノード・15タイムステップからなるネットワーク上での5エージェントのマッチングを数値実験として実施した。1ステップを10分と仮定した場合、列挙・索引処理を工夫することで、急な経路の変更やキャンセル・追加に1ステップ以内で対応可能であることを示した。

- 1) ZDDによる時間構造化NW上の車両・利用者の経路の列挙索引化
- 2) 容量制約・時空間プリズム制約を満たす形で統合(マージ)
- 3) 最適経路の計算(ソート)



(2)土地所有交通モデル

①地主間の取引、②土地取引と来訪者の行動の相互作用を考慮した多主体の同時推定モデルを提案

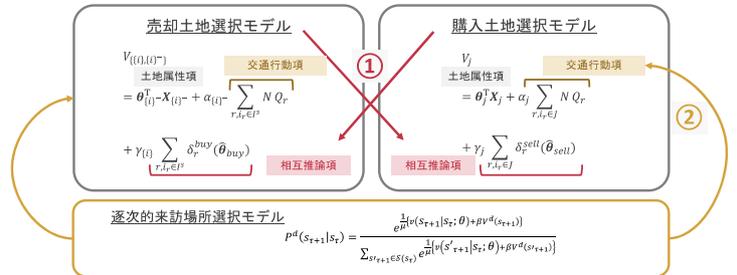


図1: 売却及び購入土地選択モデル、来訪者の逐次的な来訪場所選択モデルの相互作用

モデル実証のため、交通行動調査に加え、不動産登記全部事項を用いて、土地取引及び地主の土地所有状況をクロスセクショナルデータ化する方法についても提案した。

表1: 2017年の推定結果

提案モデルは道後温泉周辺エリアで実証した。

Integrated				
Param.	Selling	Buying	Param.	Visit
CC dist.	-2.47	-1.25	S	1.58
t-value	-5.60	-3.29	t-value	4.49
FL	1.59	0.51	R1	1.42
t-value	11.49	1.12	t-value	5.27
Est visit vol.	1.11	-2.11	R2	1.88
t-value	3.91	-0.89	t-value	7.49
Est land vol.	-6.32	-0.53	Trans. land	0.17
t-value	-12.66	-0.80	t-value	1.68
			Dist.	-0.02
			t-value	-0.34
			PJ1	1.07
			t-value	3.26
			PJ2	1.45
			t-value	6.16
	-1541.35	-79.02		-399.14
	-727.53	-37.14		-315.78
	0.53	0.52		0.19
	1485.33	90.46		662.88
	1938	57		88
				7398.94

2017年の交通行動データを用いたモデル推定の結果、土地の購入量が増加するほど土地の売却量が減少するという取引の状況、購入が卓越しているエリアほど来訪者が多く訪れるという形で、土地取引と訪問量との間に相互作用があることを明らかにした。

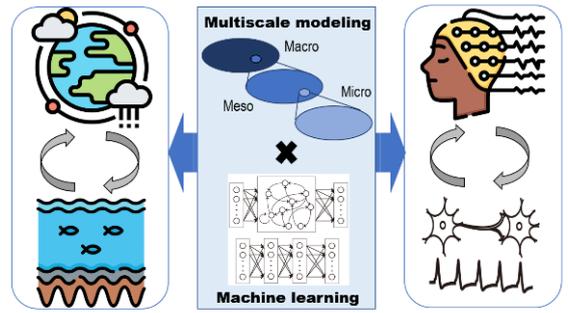
今後の展開

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と同時に、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サイエンス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、社会を考えると時には、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構築を構築することである。そのために今年度は、多地点の時系列データに対し、空間相関の影響を考慮して将来予測、および因果解析する技術を開発し、実データで検証する。また、特異的で急激な変化を含む時系列データの将来予測および因果解析する技術を開発し、実データで検証する。

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バーコンピューティング

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、リザーバー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。

従来手法ではリザーバー内のニューロンは均一で時定数の範囲が限られていたが、本手法では応答特性の異なるニューロンをランダムに混在させたりザーバーを考案することで、時定数分布の範囲を可変とする仕組みを実現した。複数の時間スケールをもつ多変量時系列データの予測タスクにおいて、提案手法によりリザーバーの時定数分布を十分広くしておけば、予測精度が従来手法より向上することを示した(図1)。

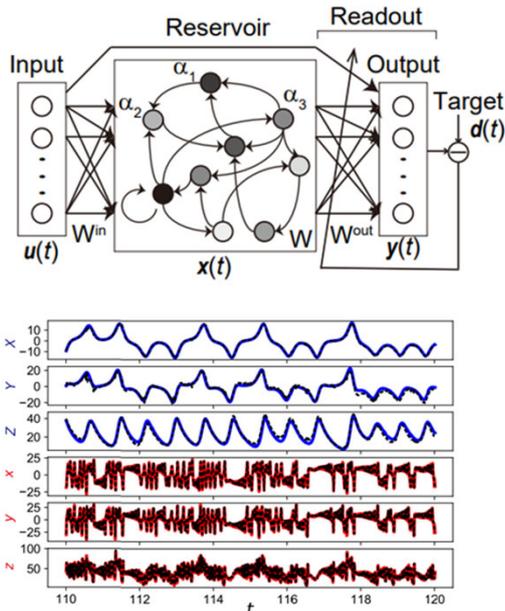


図1. リザーバーコンピューティングの基本構造(上)、マルチ時間スケールデータの予測結果(下)。

(2) 量子コンピュータによる大規模信号機群の制御

大都市の渋滞を緩和するために、交通状態に応じて適応的に信号機を制御することは重要な課題である。従来の適応的な信号機の制御は、各交差点の周辺の局所情報のみを考慮したもので、都市全体の交通状況を同時に最適化することはできない。そこで本研究では、次世代計算機として期待されている量子コンピュータの一種である量子アニーリングマシンを用いて、大都市の信号機群を協調制御する手法を開発した。

ここでは、道路網は縦横に直交する格子状であるとし、道路網上の交通は一定の確率で右左折する車両群によりモデル化した。問題を定式化して解析した結果、交通流の偏りを最小化する信号の色の組合せを決める最適化問題が、イジングモデルのエネルギー最小化問題に帰着されることが示された。これにより、量子アニーリングマシンにより信号制御問題を解くことが可能になった(図2)。

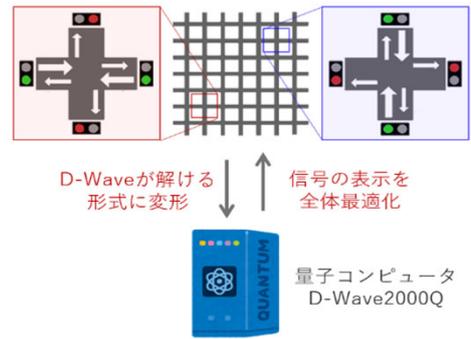


図2. 交通流制御手法の概念図(上)、交通流の偏りの大きさを表す評価関数値の比較結果(下)

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の確立を目指す。

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	教授 特任研究員 特任助教 特任研究員 博士課程 修士課程 学士課程	國吉 康夫 米倉 将吾 金沢 星慶 小倉 有紀子 Elena Skoullou ファヴィエ 要 成田 淳志
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 ヒューマンサイエンス研究領域 クラウドインフォマティクス研究領域 クラウドインフォマティクス研究領域	室長 研究領域リーダー リーディングリサーチ 研究領域リーダー	山田 大介 稲垣 瑞穂 天野 真輝 岩本 正実 渥美 範俊 平林 智子 伊藤 健二 山下 勝司

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 情報理工学系研究科 先端科学技術研究センター	特任教授 講師 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 特任講師	谷川 智洋 新山 龍馬 大村 吉幸 Magrans de Abril, Ildefons 金 希哲 阿部 由吾 濱野 将伍 宮ノ原 優斗 吉田 成朗
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	村本 伸彦 堺 浩之 原田 匠 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 工学系研究科 工学系研究科 工学系研究科 次世代知能科学研究センター	教授 博士課程 修士課程 修士課程 特任研究員	羽藤 英二 小林 里瑛 小川 瑞貴 黛 風雅 原 祐輔
豊田中央研究所	社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 社会システム研究領域 モビリティ基盤創成研究企画・推進室 数理工学研究領域	研究領域リーダー リーディングリサーチ リーディングリサーチ グループリーダー	志賀 孝広 西 智樹 吉村 貴克 石井 良尚 池貝 未来 大社 綾乃 大滝 啓介 清水 麻里子 早川 敬一郎 日高 健 牧野 玲子 小出 智士

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 (IRCIN) 情報理工学系研究科 情報理工学系研究科	特別教授 特任准教授 特任研究員	合原 一幸 田中 剛平 山下 洋史
豊田中央研究所	数理工学研究領域 数理工学研究領域 数理工学研究領域 数理工学研究領域 数理工学研究領域 数理工学研究領域 数理工学研究領域	リーディングリサーチ	吉田 広顕 生田 靖弘 井上 大輔 大山 倫弘 岡田 明久 小山 志穂里 川本 敦史

情動モデリング

- [1] Y. Wei, Y. Ogura, Y. Ohmura, I. Magrans de Abril, H. Kanazawa, Y. Kuniyoshi, “Integrated altruistic and fairness preference induces advanced mutual cooperation in sequential social dilemmas,” (査読中)
- [2] M. Iwamoto, S. Yonekura, N. Atsumi, S. Hirabayashi, H. Kanazawa, Y. Kuniyoshi, “A computational emotion model with brain cardiorespiratory interactions predicts arousal level elicited by external stimulation,” (査読中)
- [3] S. Yonekura, J. Cueto, H. Kanazawa, N. Atsumi, S. Hirabayashi, M. Iwamoto, Y. Kuniyoshi, “A neuromodulatory model for the effect of emotion respiration cognition coupling onto reaction time,” (査読中)

機械知性

- [4] 塩崎敬祐, 小柳陽光, 青山一真, 鳴海拓志, 谷川智洋, 葛岡英明, 廣瀬通孝, “対面接客訓練 VR における交替潜時がアバタの印象に及ぼす影響,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 26巻, 3号, pp.169-176, Sept. 2021.
- [5] Y. Chang, K. Matsumoto, T. Narumi, T. Tanikawa, M. Hirose, “Redirection controller using reinforcement learning,” IEEE Access, vol.9, pp.145083-145097, Oct. 2021. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3118056
- [6] T. Tanikawa, K. Shiozaki, Y. Ban, K. Aoyama, M. Hirose, “Semi automatic reply avatar for VR training system with adapted scenario to trainee’s status,” HCI International 2021 - Late Breaking Papers: Multimodality, eXtended Reality, and Artificial Intelligence, pp.350-355, July 2021. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-90963-5_26
- [7] S. Yoshida, T. Narumi, T. Tanikawa, H. Kuzuoka, M. Hirose, “Teardrop glasses: pseudo tears induce sadness in you and those around you,” CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 12Pages, Yokohama, Japan, May 2021. DOI:<https://doi.org/10.1145/3411764.3445741>
- [8] H. Sakai, M. Shimizu, T. Yoshimura, E. Hato, “Psychological reactance to mobility restrictions due to the COVID 19 pandemic: a Japanese population study,” Frontiers in Psychology, June 2021. DOI:<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.655022>

広域・長期的な都市形成過程の分析・モデリング・制御

- [9] R. Koseki, E. Hato, "Modeling long-term recursive migration choices from superdisasters: a case study of the great east Japan earthquake," 101st TRB Annual Meeting, no. TRBAM-22-04862, Washington, DC, USA, Jan. 2022.
- [10] M. Ogawa, E. Hato, "Manifold learning with OD matrix as latent variables for pedestrian network design with surrogate model," 101st TRB Annual Meeting, no. TRBAM-22-04919, Washington, DC, USA, Jan. 2022.
- [11] K. Masuda, R. Koseki, E. Hato, "Evacuation network design with a dynamic scheduling model: pareto frontier analysis for historic tsunami recovery urban planning," 101st TRB Annual Meeting, no. TRBAM-22-04894, Washington, DC, USA, Jan. 2022.
- [12] 小川瑞貴, 羽藤英二, 石井健太, "起終点交通量を潜在変数とする多様体学習とネットワークデザインのための代理モデルの構築," 都市計画論文集, 56巻, 3号, pp.1351-1358, Oct. 2021.
DOI:<https://doi.org/10.11361/journalcpj.56.1351>
- [13] 小関玲奈, 羽藤英二, "巨大災害後の広域人口移動予測に向けた動的居住地選択モデル," 都市計画論文集, 56巻, 3号, pp.595-602, Oct. 2021.
DOI:<https://doi.org/10.11361/journalcpj.56.595>
- [14] 小林里瑛, 羽藤英二, "市整備に伴う回遊選択の変化に応答的な土地の両面市場モデル," 都市計画論文集, 56巻, 3号, pp.524-531, Oct. 2021.
DOI:<https://doi.org/10.11361/journalcpj.56.524>
- [15] K. Masuda, E. Hato, "Cliometric analysis with a pareto frontier of urban planning after the Chile tsunami," The 11th International Conference of the International Society for the Integrated Disaster Risk Management, Online, Sep. 2021.
- [16] R. Koseki, E. Hato, The 11th International Conference of the International Society for the Integrated Disaster Risk Management, Online, Sep. 2021.
- [17] B. Shen, E. Hato, "Model pedestrian route choice in 3D space using discounted recursive logit model in time-structured network," 第41回交通工学研究発表会論文集 (CD-ROM), Aug. 2021.
- [18] M. Shimizu, T. Yoshimura, E. Hato, "Can probability neglect bias promote social distancing during the COVID-19 pandemic?," Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour, Vol.84, pp.363-374, Jan. 2022.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.11.007>

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,” (査読中)
- [20] S. Koyama, D. Inoue, A. Okada, H. Yoshida, “Electro-osmotic diode based on colloidal nano-valves between double membranes,” *Physical Review Research*, vol.3, Iss.3, no.033289, Sep. 2021. DOI:10.1103/physrevresearch.3.033289
- [21] H. Yamashita, K. Aihara, H. Suzuki, “Accelerating numerical simulation of continuous-time Boolean satisfiability solver using discrete gradient,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol.102, no.105908, Nov. 2021. DOI:https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.105908
- [22] Z. Li, G. Tanaka, “Multi-reservoir echo state networks with sequence resampling for nonlinear time-series prediction,” *Neurocomputing*, vol.467, pp.115-129, Jan. 2022. DOI:https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.08.122
- [23] R. Nakane, A. Hirose, G. Tanaka, “Spin waves propagating through a stripe magnetic domain structure and their applications to reservoir computing,” *Physical Review Research*, vol.3, Iss.3, no.033243, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.033243>
- [24] H. Tamura, G. Tanaka, “Transfer-RLS method and transfer-FORCE learning for simple and fast training of reservoir computing models,” *Neural Networks*, vol.143, pp.550-563, Nov. 2021. DOI:https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.06.031
- [25] T. Ichimura, R. Nakane, G. Tanaka, A. Hirose, “A numerical exploration of signal detector arrangement in a spin-wave reservoir computing device,” *IEEE Access*, vol.9, no.20986654, pp.72637-72646, May 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3079583

その他アクティビティ

- [26] 豊田中央研究所, 東京大学交通・都市・国土学研究室, 発話解析結果掲載, 地域広報誌つけちレター, Dec. 2022.
- [27] 田中剛平, 中根了昌, 廣瀬明, リザーバーコンピューティング:時系列パターン認識のための高速機械学習の理論とハードウェア, 森北出版, 東京, 2021. ISBN: 978-4-627-85531-1
- [28] ”こんなことにもイジングマシン:事例6 豊田中央研究所、交差点2500ヵ所の信号を模擬 スムーズ移動の解はQAに軍配,” *日経エレクトロニクス*, 第1231号, pp.58-60, Sep. 2021.
- [29] 吉田広顕, ”渋滞のないモビリティ社会に向けて ~量子アニーリングによる信号制御~, ” 東京大学次世代知能科学研究センター連続シンポジウム第3回, Sep. 2021.
- [30] 羽藤英二, ”モビリティ研究の理論と進展,” 東京大学次世代知能科学研究センター連続シンポジウム第3回, Sep. 2021.