

「空間識の幾何による 重力覚解明と感覚拡張世界創出」 第1回 シンポジウム

日時

2023年 3月16日(木)
13:30~18:05

会場

中部大学不言実行館
Active Hall (定員50名)
およびZoom配信

参加お申込み

下記URLまたは右のQRコードより
専用フォームへアクセスし、
お申込みください。

<https://forms.gle/UCejiPJap3Z2mXSA>



プログラム 13:00より受付開始

- | | |
|-------------|---|
| 13:30~13:40 | 平田 豊
「空間識の幾何プロジェクト」 |
| 13:40~14:40 | 和田佳郎
「めまい患者やアスリートの重力感受性から見た空間識」 |
| 14:40~14:50 | 休憩 |
| 14:50~15:50 | 谷本昌志
「ゼブラフィッシュ仔魚を用いた
前庭神経回路のイメージング解析」 |
| 15:50~16:00 | 休憩 |
| 16:00~16:40 | 田所 慎
「眼球運動から推定する空間識」 |
| 16:40~17:00 | 休憩 |
| 17:00~18:00 | Jean Laurens
「The “otolith vermis”: a mathematical
perspective on the role of the Nodulus
and Uvula in self-motion perception」 |
| 18:00~18:05 | 閉会挨拶 平田 豊 |



研究代表者
平田 豊

中部大学工学部教授,
AI数理データサイエンス
センター, 創発学術院



和田佳郎

奈良県立医大特任講師,
和田医院院長



谷本昌志

基礎生物学研究所 助教



田所 慎

中部大学大学院博士後期
課程, 防衛医科大学校耳
鼻咽喉科学講座医師



Jean Laurens

Ernst Strüngmann Institute
for Neuroscience,
Principal Investigator

<連絡先>

事務局

✉ nclab_secretaries@googlegroups.com

☎ 0568-51-9476



<https://crest-sog.org>

CREST

JST CREST マルチセンシング領域

「空間識の幾何による重力覚解明と感覚拡張世界創出」チーム

第1回シンポジウム

2023年3月16日（木）13時30分開会

於 中部大学不言実行館アクティブホール

講演要旨集

平田 豊 「空間識の幾何プロジェクト」

和田佳郎 「めまい患者やアスリートの重力感受性から見た空間識」

谷本昌志 「ゼブラフィッシュ仔魚を用いた前庭神経回路のイメージング解析」

田所 慎 「眼球運動から推定する空間識」

Jean Laurens 「The “otolith vermis”: a mathematical
perspective on the role of the Nodulus and
Uvula in self-motion perception」

空間識の幾何プロジェクト

平田 豊

中部大学工学部ロボット理工学科，AI 数理データサイエンスセンター，創発学術院

本研究プロジェクト「空間識の幾何による重力覚解明と感覚拡張世界創出」（代表平田 豊. <https://www.crest-sog.org>）は，JST CREST 「生体マルチセンシングシステムの究明と活用技術の創出」領域（研究領域統括 永井良三先生，研究総括 入来篤史先生. https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunya2021-5.html）の第2期採択課題として，5.5年間の予定で昨年10月に始まりました．主たる共同研究者として数学者の荒井迅先生（中部大学創発学術院教授）と実験心理学者の川合伸幸先生（名古屋大学情報学研究科教授，中部大学創発学術院客員教授），また，研究参加者として多くの若手・中堅・シニアの研究者に参画いただいています（<https://www.crest-sog.org/members>）．本講演では，この研究プロジェクトの内容を紹介いたします．

我々が多様な環境下で安全に行動するには，常に「自己の状態」を意識・無意識下で把握しておく必要があります．中でも，自己の姿勢や運動状態の把握は，他者や周囲環境と相互作用しながら安全かつ迅速・精緻に行動する上で不可欠です．こうした脳内で推定される自己の姿勢や運動の状態知覚・認識を「空間識」と呼びます．地球上の動物は全て重力の影響下で進化・発達を遂げ，鉛直下向き・1G で不変な重力ベクトルの存在を暗黙の前提条件として空間識を形成しています．そのため，耳石器と呼ばれる重力センサを内耳に有し，常に自己と重力ベクトルの相対関係をモニタリングしています．空間識を形成する過程でも，重力ベクトルの脳内推定値である「重力覚」が基準軸として参照されます．重力のない宇宙船の中では重力覚が乱れ，結果として空間識形成に失調をきたし，宇宙酔いと呼ばれる自律神経症状（冷や汗，嘔吐など）を発症する宇宙飛行士が多数報告されています．地上においても，例えば，重力ベクトルに対して傾斜したマジックハウス内では正しい重力覚が得られず，正常な歩行動作が困難になり，転倒してしまう人もいます．

重力覚ならびにそれを基準として形成される空間識は，主に前庭センサ（三半規管，耳石器），視覚センサ（網膜），体性感覚を司る深部感覚器（筋，腱，関節内受容器）や触覚センサ（皮膚内触覚受容器），ならびに聴覚センサ（鼓膜-耳小骨-蝸牛）からの異種感覚情報を統合することにより形成されます．しかしながら，これらの感覚センサのダイナミックレンジの制約や重畳するノイズにより，上述のような特異環境下でなくとも，いつも正確な空間識が推定されるわけではありません．特に，アインシュタインの等価原理として知られる重力による加速と，力の作用による直線加速の等価性により，重力センサである耳石器は，身体の並進運動と重力軸に対する傾きを識別できず，両者を混同する錯覚（空間識失調）が生じることも知られています．この錯覚（Somatogravic illusion）は，航空機のパイロットが前方への直線加速を上方への傾きと

知覚し、それを補正するために誤って機首を下げて墜落してしまうなど、大事故につながる危険をはらんでいます。一方、近年では、ヘッドマウントディスプレイの普及により、安全が保証された仮想空間において、自分は静止状態にありながら、落下感や浮遊感、回転感、加速感など、空間識推定の誤りを楽しむこともできるようになっています。こうした空間識形成過程の不完全性は、上述の異種感覚センサへの刺激を適切に組み合わせることで、所望の状態に重力覚や空間識を操作・拡張できることを示唆しています。実際に、遊園地の乗り物には、視環境変化（視覚刺激）と椅子の傾斜により前後、左右、上下方向の加速感をはじめ、浮遊感や回転感など様々な空間識を与えるものもあります。ただし現状では、視覚刺激の種々の時空間パラメータやヨー、ピッチ、ロール回転の速度、振幅などの頭部刺激パラメータは試行錯誤的なチューニングにより決定されており、所望の加速感を得るためのシステムティックな方法論はありません。空間識形成過程を表現する数理モデルが構成できれば、これらのパラメータを数理的に定めることができ、メタバースを支える重要な基盤技術にもなるはずです。

空間識形成過程の数理モデル化は、1970年代から Somatogravic Illusion などの代表的な空間識失調の再現と機序説明を目的に、伝達関数を用いたフィルタモデルなどの古典制御理論の適用から始まっています。近年では、現代制御理論の枠組みで状態空間モデルを用い、種々の感覚入力に対する空間識形成過程をモデリングし、ベイズ最適化による推定値としていくつかの空間識失調状態を模擬する試みがなされてきました。しかしこのアプローチでは、非可換な3次元回転運動に3次元の並進運動が加わり、これに重力軸に対する傾き、さらに視覚や聴覚など異なるモダリティの環境変数も加わることで、状態空間の構造把握が困難でした。そのため、重力覚の形成やそれに基づいてなされる空間識形成過程、ならびに空間識失調の発生状態を明確に表現できず、システムティックな空間識操作法や空間識失調防止法のデザインが困難でした。

本プロジェクトでは、こうした背景のもと、異種多感覚刺激統合による空間識形成の神経メカニズムを新たな計算理論により定式化し、これに基づき人工多感覚刺激をデザインして空間識を制御する方法の確立を目指します。そのために、数理グループ（代表 荒井）が構築する新しい空間識形成過程の数学理論に基づき、心理グループ（代表 川合）と神経生理グループ（代表 平田）が、それぞれヒトを用いた認知心理学実験と魚を用いた神経科学実験を実施する理論駆動型のアプローチにより研究を進めます。

めまい患者やアスリートの重力感受性から見た空間識

和田佳郎

和田耳鼻咽喉科医院, 奈良県立医科大学耳鼻咽喉・頭頸部外科

地球上での空間識の基本軸は重力である。1G という重力は生まれた時から当たり前のよう存在するため、普段の生活の中で意識することはない。しかし、重力に抗う時、重力を操る時にその存在の大きさに気づく。本シンポジウムでは、臨床の立場から「重力とめまい、スポーツの関係」についての研究内容を紹介する。

重力方向の感受性（重力感受性）は、Head Tilt Subjective Visual Vertical (HT-SVV) 法により簡便に評価出来る (Wada et al. Laryngoscope Investig Otolaryngol., 2020)。HT-SVV 法は、頭部直立および頭部傾斜条件下の SVV（自覚的な重力方向）から Head Tilt Perception Gain (HTPG, 頭部傾斜感覚ゲイン) を求める。HTPG は重力感受性が正確であれば 1, 過小であれば <1 , 過大であれば >1 となる。

めまいが長期化・難治化すると HTPG は過大となる (Wada et al. Laryngoscope Investig Otolaryngol., 2023)。めまいによる不安定な姿勢に対する身体の代償機能と考えられるが、病的な過大、すなわち代償過剰となる患者が多い。従来、めまいリハビリテーションは代償不全を念頭に行われてきたが、代償過剰に対しては異なるアプローチが必要となる。さらに、最近話題となっている Persistent Postural Perceptual Dizziness (PPPD, 持続性知覚性姿勢誘発めまい) との関連についても紹介する。

スポーツに関しては、競技の種類により HTPG に特徴があらわれる。例えば、体操のような正確な姿勢安定性を求める競技は $HTPG=1$, サッカーやラグビーのようにスライディングやタックルのために姿勢安定性を犠牲にする競技は $HTPG<1$, ゴルフのように斜面やバンカーでもしっかりとスイングが出来る高い姿勢安定性を求める競技は $HTPG>1$ となる。その競技やアスリートの HTPG の特徴に合った効果的なトレーニング方法の開発が期待される。

このように、HTPG により様々な状況でのわれわれと重力の関係が明らかとなってきた。その関係を理解し、重力そして空間識とうまくつきあうことが出来れば、人生はさらに楽しく豊かになるはずである。

ゼブラフィッシュ仔魚を用いた前庭神経回路のイメージング解析

谷本昌志

自然科学研究機構基礎生物学研究所神経行動学研究部門

頭部の傾斜や動きの情報を伝達する前庭神経回路は空間知覚において重要な役割を担う。前庭情報処理の神経回路機構を個々の神経細胞の活動の系統的な計測・解析を通じて理解するために、我々は脳や体が透明かつ小型で細胞レベルの生体イメージングに適したゼブラフィッシュ仔魚（受精後約 5 日齢、体長およそ 4mm）を対象として前庭神経回路の機能イメージング解析の実験系を構築してきた。

まず、頭部の傾斜や振動中の神経活動を可視化するために「対物レンズ傾斜顕微鏡」を作成し、仔魚や小さな試料を 360° 自由に傾斜させたり、振動させながらイメージングすることを可能にした。傾斜や振動刺激中に止むを得ず生じてしまう大きなアーティファクト（生体応答に起因しない人工的な蛍光強度変化）は、蛍光強度比イメージング法によって低減させた。

次に、この顕微鏡を用いた神経活動計測が可能かどうかを調べるため、頭部傾斜や直線加速度を受容する耳石器官の卵形嚢の有毛細胞と前庭神経節ニューロンに注目した。Roll/Pitch 方向の頭部傾斜/振動刺激中のこれらの細胞の活動を Ca^{2+} イメージングで計測した結果、頭部の傾きの「方向」が、異なる場所の有毛細胞・ニューロンによって受容し分けられること、そして振動刺激は分水嶺の有毛細胞、静的傾斜は主に分水嶺外の有毛細胞によって受容し分けられていることが明らかになった（Tanimoto et al., Nat. Commun., 2022）。前庭器官の構造と機能は脊椎動物種間で共通性が高いため、私たちヒトの耳石器官でも同様の仕組みで頭部の傾きや振動が受容し分けられていることが示唆された。

さらに我々は姿勢制御行動を解析した。Roll 方向の傾斜刺激中の仔魚の行動を暗黒下で記録すると、遊泳を伴わずに鰾（うきぶくろ）周辺の胴体を傾斜時上側方向へわずかに屈曲させる行動（以下、前庭屈曲反射と呼ぶ）が誘発され、これに加えて傾斜角度が大きい場合には時折、遊泳によって姿勢を正す行動が観察された。前庭屈曲反射の姿勢保持への寄与を力学的に検討すると、傾斜中の屈曲によって、重力の作用する質量中心と浮力の作用する体積中心の位置がズレて、傾いた体を元に戻す方向へ力のモーメントが発生すると考えられ、実際にこのモデルを支持する実験データが得られた。 Ca^{2+} イメージングと細胞破壊実験により、前庭屈曲反射が前庭神経核の一部のニューロン群から中脳の内側縦束核ニューロン群、脊髓運動ニューロン群を介して鰾の側方に存在する筋へ至る神経回路によって駆動されることを証明した（Sugioka et al., Nat. Commun., 2023）。このイメージング解析を基盤として今後、前庭・視覚等の多感覚情報統合による空間識の神経回路機構の研究への展開が期待される。

眼球運動から推定する空間識

田所 慎

中部大学大学院工学研究科，防衛医科大学校耳鼻咽喉科学講座

我々は視覚，前庭感覚，体性感覚等のマルチモーダルな感覚情報を脳内で統合処理することで，空間の中での自己の位置や運動，姿勢の知覚（空間識）を形成し，自己（身体のみならず，搭乗する乗り物）の位置，運動，姿勢を維持する．感覚情報が乏しい場合や通常時とは異なる情報が入力された場合に誤った認知が形成され，自己の位置や運動，姿勢を保てなくなることを空間識失調と呼ぶ（田所 & 平田, 体育の科学, 2022）．これは航空機事故の原因の 33%を占め，その死亡率はほぼ 100%である．現在，その対策としてはパイロットの体調管理や，自身の感覚に頼らない計器飛行の徹底等，パイロット自身の努力と自覚に頼る部分が多く，客観的に自己運動・姿勢等知覚の誤りを検出し，是正出来るようなフェイルセーフシステムは未だ開発されていない．一方で，我々は自己運動の知覚に基づいて，合目的的な運動を出力しており，翻せば出力された運動からその基となった自己運動の知覚を推測できる可能性がある．

本シンポジウムでは眼球運動に着目し，実際の三半規管応答よりも回転運動の知覚に相関するように生じる等速回転運動時の前庭動眼反射（vestibulo-ocular reflex, VOR），視覚誘導性自己運動感覚（ベクション；Vection）の有無に応じて増減する視運動性眼球運動（optokinetic response, OKR）及び視運動性後眼振（Optokinetic after nystagmus, OKAN）（Thilo, K V., et al., 1999; Nooij, S., 2018），直線加速（慣性力）と傾き（重力）を区別して知覚しているように生じる VOR（Paige et al., 1991），これらの現象を説明し，VOR・OKR・OKAN の全てに関わる速度蓄積機構（velocity storage mechanism：VSM）が，運動の各要素（回転速度，直線加速度，重力ベクトル）の知覚形成の中心を担うこと，そして知覚の形成には運動の存在確率，いわば経験や行動履歴が強く影響することを示す数理モデル（Laurens & Angelaki, 2011）など，眼球運動と自己運動の知覚との相関を示す先行研究に加えて，各自由度の回転運動（Yaw, Roll, Pitch）の存在確率に応じた金魚・メダカ OKR の特徴（Tadokoro et al., 2022）や，直線加速と傾きを区別する金魚 VOR が視覚・前庭協調学習によって変化（2023 年 5 月発表予定）することを示した自験例を紹介する．

このほか，時間が許せば，眼球運動から客観的に自己運動・姿勢等知覚の誤りを検出し，是正することを目指す手法の開発など，現在準備を進めている研究についても簡単に紹介したい．

The “otolith vermis”:
a mathematical perspective on the role of the Nodulus and Uvula
in self-motion perception.

Jean Laurens

Ernst Strüngmann Institute for Neuroscience

The Nodulus and Uvula (NU) (lobules X and IX of the cerebellar vermis) form a prominent center of processing of self-motion information of vestibular origin. Here, I review the current literature on the NU, and I propose that it implements a forward internal model to predict the activation of the otoliths. I build a mathematical model using a Kalman filter, and I show that this framework accounts for various functions of the NU, neurophysiological findings, as well as the clinical consequences of NU lesions. This highlights the role of the NU in processing information from the otoliths and supports its denomination as the “otolith” vermis.