

ダイナミクスインサイト：複雑パターンの解明

Dynamics Insights: Uncovering Complex Patterns

プロジェクトリーダー：白木慶汰/Keita Shiraki

1. プロジェクト概要

1.1. プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、複雑なシステムの動きの中に潜むパターンの解明を目的とする。特に、物理学、工学、生物学、化学などのさまざまな分野で発生する複雑な現象やパターンに焦点を当て、それらの背後にあるメカニズムを解明することを目指す。さまざまな手法を用いて、複雑なシステムのダイナミクスについて新たな洞察を得ることを目指す。

1.2. グループ構成とテーマ概要

本プロジェクトでは、テーマ決めを行った際、メンバー間での関心領域が多様であったため、1つの研究テーマに統合するのではなく、モデリング班・音班・物理班の3グループによる並列3テーマ体制へと方針を転換した。モデリング班は、食堂の混雑をセルベースの数理モデルとして構築し、ルール設計を含めたシミュレーションによる問題解決を目指した。音班は、ノイズ環境下での話者特定を目的とし、機械学習手法を用いた特徴量設計・制度評価を実施した。物理班は流体物理現象（液胞・カルマン渦）を量子コンピュータ上のモデルとして表現し、量子計算によるシミュレーションの可能性の探求を行った。

2. 数理モデリング班

2.1. 背景と目的

未来大学では、多くの学生や教員がお昼に集中して食堂を利用するため、混雑が日常的に発生している。数理モデリング班では、食堂における座席の充填率に関するシミュレーションを通じて混雑の発生のメカニズムや解決策を考察する。

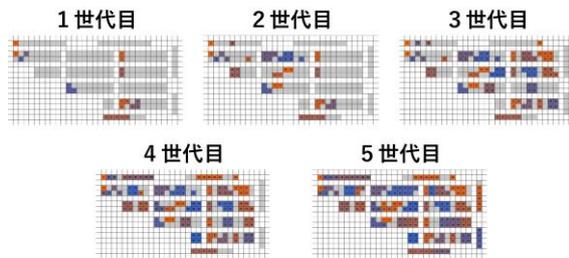
2.2. 手法

本プロジェクトでは、食堂における人の流れや混雑の発生状況をモデル化する方法として、混雑のような現象をシンプルなルールによって表現できることから2次元セルオートマトンを採用した。また、座席の充填率に関するシミュレーションでは解空間が広く、要素間の関係が複雑な問題に対しても柔軟に適応できる点を評価し、シミュレーテッドアニミシングを採用した。

2.3. 結果と考察

前期ではPython上で2次元セルオートマトンにより人流を再現し、滞留時間を計測・分析した結果、レジと下膳口で渋滞が発生し、最短2分・最頻15分・最大30分の遅延が生じることを確認した。後期では、「コストをかけずに改善可能な混雑緩和」を目的

に、座席の配置と着席パターンの最適化を新たな課題として設定した。着席状態をスコア化し、SAにより座席交換を繰り返すこと高スコア解を探索した結果、混雑時間帯の座席充填率が従来よりも向上し、利用可能人数と快適性が増加することが示された。



図：シミュレーションの過程

3. 音班

3.1. はじめに

3.1.1. 背景

日常生活では多人数による会話が行われているが、対面環境では非言語情報により発話の重なりが比較的少ない。一方、オンライン会話や雑音環境では発話が重なりやすく、音声の聞き取りが困難となる。この問題に対し音源分離が有効とされるが、その前段階として話者特定技術が重要である。

3.1.2. 目的

本プロジェクトの目的は、同時発話音声およびノイズが存在する環境下において話者を特定することである。音声信号から音響特徴量を抽出し、機械学習手法を用いて話者分類を行うことで、複雑な音響環境下における話者特定性能を評価する。

3.2. 使用技術

音声信号は、音源と声道フィルタから構成されるソース・フィルタモデルで表現できる。

本研究では、音声の周波数特性を得るために離散フーリエ変換を用い、振幅スペクトルの統計量を特徴量として利用した。また、対数スペクトルに基づくケプストラムや、人間の聴覚特性を考慮したメルスペクトルおよびMFCCは、話者固有の音響的特徴を捉える手法として広く用いられている。さらに、声道特性を反映する特徴量として線形予測符号化(LPC)を利用した。

3.3. 活動内容

3.3.1. 同時発話音声に対する線形VAE

同時発話音声は各話者の音声の線形和として表されることに着目し、線形な特徴量と線形活性化関数のみを用いたVAEを構築した。単独話者音声で学習したモデルを用い、同時発話音声から得られる潜在表現に基づいて話者の特定を行った。

3.3.2. ノイズ環境下における話者特定

ノイズが混在する環境下では、メルスペクトル対数およびMFCCを特徴量とし、SVMを用いて10名の話者分類を行った。音声データにはJVSCorpus、雑音データにはESC-50を用いた。

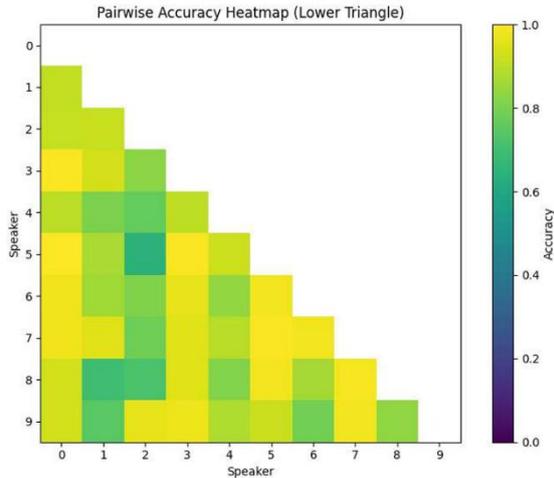
3.4. 実験結果

SVMを用いたノイズ環境下での話者特定では、話者によって分類精度に差が見られ、全体として約6割程度の精度であった。一方、線形VAEを用いた同時発話音声の実験では、10名中2名が同時に発話した場合において、約89%の精度で話者を特定できることが確認された。

3.5. 考察

線形な特徴量および線形活性化関数を用いたVAEにより、単独話者音声から学習した潜在空間上で、同時発話音声を話者ごとの寄与の線形和として表現できる可能性が示された。

一方で、本手法は表現力が限定されるため、話者数の増加や声質差が小さい場合には分類性能の低下が懸念される。今後は、線形性を保ちつつ特徴量の拡張や正規化を行う手法の検討が課題である。



4. 物理班

4.1. 目的

本プロジェクトの目的は、計算コストの増大が課題となる流体现象のシミュレーションに対し、量子コンピュータを用いた新たなアプローチを模索し、その有効性を検証することである。具体的な対象として、薄膜の不安定化現象である「dewetting」と、流体が障害物の背後に形成する「カルマン渦」の2つの現象を選定した。それぞれについて、古典的な数値流体力学によるシミュレーションと、量子アルゴリズムを用いたアプローチの両面から実装・評価を行った。

4.2. 薄膜のダイナミクス

基盤上の液膜が不安定化し、破裂して穴が広がる dewetting 現象に対し、古典的アプローチではナビエ・ストークス方程式と連続の式から導出された支配方程式を用いた。空間微分には擬似スペクトル法を採用し、高速フーリエ変換により計算を効率化した。膜厚がゼロに近づく際の数値的発散を防ぐため、自由エネルギー項に正規化パラメータを導入す

る工夫を施し、膜の破裂と液滴形成過程の再現に成功した。この非線形ダイナミクスに対する量子アプローチとして、量子レザバーコンピューティング (QRC) を導入した。QRC は、量子回路を固定された「リザバー」として利用し、入力データを高次元ヒルベルト空間へ写像することで非線形パターンを学習する手法である。本プロジェクトでは、薄膜の高さデータを角度エンコーディングにより量子ビットの回転角へ変換し、6 量子ビットの回路に入力した。回路内のエンタングルメント操作と測定結果を用いた Ridge 回帰学習により、量子回路が薄膜方程式の複雑な非線形挙動を高い精度で模倣できることを実証した。これは、量子回路が高い表現能力を持つ非線形関数として機能することを示している。

4.3. カルマン渦

古典的手法として、流体粒子が格子点上を移動・衝突する様子をモデル化した格子ボルツマン法 (LBM) を採用した。D2Q9 モデルを用いた計算により、円柱障害物周りの流れにおいてレイノルズ数の増加に伴いカルマン渦が形成される様子を確認し、比較基準となるデータを得た。本プロジェクトの技術的な核心は、この流体挙動を量子ウォーク (QW) を用いて再現する試みである。通常の QW はユニタリ発展に従う線形かつ可逆な系であり、そのままでは流体特有の「粘性 (エネルギー散逸)」と「非線形性 (移流効果)」を表現できない。そこで、これら2つの要素を導入した拡張モデルを構築した。粘性の導入には、開放量子系の枠組みを利用した。系に Ancilla (補助) ビットを相互作用させた後、その情報を測定せずに破棄 (トレースアウト) することで、系に不可逆な位相緩和を引き起こし、物理的なエネルギー散逸プロセスを再現した。また、Ancilla ビットの状態制御により、エネルギーの注入 (外力) も同一の枠組みで記述可能とした。非線形性の導入には、非線形光

学における光 Kerr 効果と Madelung 変換のアナロジーを利用した。各格子点における粒子密度に応じて位相を変化させる密度依存型の演算子を組み込むことで、流体自身の密度分布が流速場に影響を与える非線形相互作用を実装した。これらの拡張を施した量子ウォークアルゴリズムを実装し、円柱障害物周りのシミュレーションを行った結果、左右対称性を保った安定した層流と、障害物背後に伸びる後流の形成が確認された。明確な渦の放出には至らなかったものの、量子アルゴリズム上で粘性と非線形性を持つ流体挙動を再現することができた。

4.4. 結果と考察

本プロジェクトでは古典計算と量子計算の双方のアプローチを用いることで、量子回路が流体シミュレータとして機能する潜在能力を持つことを示した。QRC による高精度なダイナミクス予測と、拡張 QW による物理プロセスの模倣は、異なるアプローチでありながら共に量子計算の有用性を示唆している。特に QW における散逸と非線形の導入手法は、可逆な量子系でマクロな不可逆現象を扱うための具体的な指針を与えるものである。今後はパラメータ探索による乱流状態の再現や、連続極限における厳密な数理的対応付けが課題となる。

5. 参考文献

西成活裕. 渋滞のサイエンスとその解決法, 日本物理学会. 日本物理学会誌. Vol.71, No.3, 2016, 170-173p.

浜田宏. なぜ数理モデルが必要か: 理論と実証の対話. 数理社会学会, 理論と方法, 2022, 37 巻 1 号.

Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press,

2010.

瀬田剛. 格子ボルツマン法. 森北出版, 2021.

R.V.Craster and O.K.Matar (2009) Dynamics and stability of thin liquid films, Reviews of Modern Physics, Vol.81.