

オンラインユーザ挙動の因果関係から過去状態を遡及可能なユーザ状態推定技術の開発

代表研究者
共同研究者

高野 知佐
會田 雅樹

広島市立大学 情報科学部 教授
東京都立大学 システムデザイン学部 教授

1 はじめに

本課題では、ユーザの個性やそれらが集団として示す振る舞いに着目し、そのダイナミクスを理論的に捉えるための枠組みとして、遅延ポテンシャルおよび先進ポテンシャルの理論体系を整備し、これに基づく検討を行った。特に、ユーザの過剰な活動や情報拡散の暴走といった現象を抑制するためには、ネットワーク構造が果たす役割が重要であるとの観点から、ユーザの活動を効果的に抑制しうる構造の特性を明らかにした。その上で、抑制的効果を持つ仮想ユーザノードの適切な配置や、それらと実ノードとの間のリンクの重みの設計について理論的な考察を加えた。また、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークといった代表的な構造を対象に、振動モデルを用いた解析を行い、リンクの重みがユーザ活動の制御に有効であることを確認した。さらに、この理論を応用し、ユーザアクティビティが爆発的に増加するシステムに対して、負荷を分散的に処理する新たなシステムの設計を提案した。加えて、ユーザダイナミクスを観測する方法として、SNS などの実データに対して周波数スペクトル解析を適用し、活動の過熱化に先立って現れる低周波モードの顕在化を検出する手法の有効性についても検討を行った。

2 リンクの遅延に対するネット炎上の抑制効果

Facebook や Twitter などのオンラインソーシャルネットワークでは、ユーザの活動が現実世界の出来事にも影響を及ぼすようになってきた。しかし、こうしたユーザ動態は、活性化によって市場を刺激する正の側面がある一方で、「炎上」などの社会問題を引き起こす負の側面も持つ。これらの動態は、ユーザの合理的判断を超えるスピードで伝播するため、リアルタイムかつ簡便な対処が求められている。本研究では、ネットワーク上でのユーザの影響伝播を波動方程式に基づく「振動モデル (oscillation model)」により記述し、特定の一方方向リンクの重みを制御することでユーザ活動の拡大を抑制する手法を提案した。特に、エコーチェンバー現象のような情報の過度な集中を抑えることを目的とする。

本研究で用いる振動モデルは、ユーザの活動状態を時間依存の状態ベクトルとして表現し、影響の強さを振動エネルギーとして定量化するものである。実際の SNS では、ユーザ間の影響が常に双方向とは限らず、一方方向的な閲覧やフォローの関係が多く存在する。そのため、全ての双方向リンクを同時に把握することは現実的でなく、一方方向リンクの重み制御によりネットワーク全体を調整する方針が有効である。

数理解析による動態の制御原理 (連続近似による数式的理解)

非対称ラプラシアン行列に基づき、波動方程式を変形し、ユーザの活動状態を連続的に表す微分方程式として導出した。解析の結果、リンクの重みが 1 より小さい場合、波動の振幅 (すなわち活動強度) が時間の経過とともに減衰することが確認された。特に、伝播方向によって振幅の増減が異なり、リンク重みを調整することで特定方向への影響を抑えることが可能となる。

シミュレーションによる検証

一次元ネットワーク上において、一定間隔でリンク重みを減じた「モジュールノード」を配置し、波動の振幅変化を観察した。その結果、リンク重みを 0.1 に設定した場合、時間経過とともに振幅が大幅に減少し、活動の伝播が効果的に抑制されることが示された。さらに、ダンベル構造を持つネットワークでも同様の実験を行い、2 つのクラスターを接続するリンクの重みを小さくすると、情報の波動が他クラスターに伝播しにくくなり、ネットワーク全体の活動が抑制される傾向が確認された。

モジュールノードの選定方法と効果比較

ネットワーク内でリンク重みを下げる「モジュールノード」の選定方法によって、制御効果に差が生じることが明らかとなった。本研究では以下の 3 つの方法を比較した：単純な周期的選定 (Multiples of 9)、ネットワーク構造を考慮せず、ノード番号が 9 の倍数のノードを一律にモジュールノードとする手法、次数中

心性による選定 (Degree Centrality) 多数の接続を持つノードを優先して選定する手法、媒介中心性による選定 (Betweenness Centrality) 情報伝播の経路における中継点として重要なノードを選ぶ手法。

無作為グラフおよびスケールフリーネットワークにおける検証

1,000 ノードのランダムグラフに対して振動エネルギー (活動強度) の合計値を比較したところ、ネットワーク構造を考慮しない選定では抑制効果が限定的であり、中心性指標に基づく選定の方が有効であることが分かった。また、実際の SNS 構造に近いスケールフリーネットワークにおいても、同様の実験を行った。中心性に基づく選定によって振動エネルギーを約 30% まで抑えることができた。これは、スケールフリーネットワークではごく少数のハブノードが情報伝播の中枢を担っているためであり、それらを適切に制御することで高い効果が得られるといえる。

以上から、本研究では、オンラインソーシャルネットワークにおけるユーザ動態を振動モデルによって表現し、一方向リンクの重み制御により活動過剰を抑制する手法を提案した。本手法は、エコーチェンバー現象やネット炎上の抑制に有効であり、現実のネットワークにおいては、メール到達の遅延や掲示板更新頻度の調整などの操作として実装可能である。また、モジュールノードの選定においては、ネットワーク中心性を考慮することで、より高い抑制効果を得られることが示された。特にスケールフリーなネットワークでは、適切なノード選定によって振動エネルギーを大幅に低減可能である。今後は、さらなる現実的なネットワーク構造への適用や、実時間での制御アルゴリズムの開発が期待される。

2 ユーザアクティビティの爆発的な増加に対する分散処理システム

本研究では、インターネット上で突発的に発生するユーザのアクティビティの爆発的な増大現象として、「フラッシュクラウド」現象への対策を検討した。ネットワーク上の拡散方程式を用いたロードバランサ (LB) 間の自律分散型負荷分散方式 (Diffusion Control 方式、以下 DC 方式) を実機環境でプロトタイプとして実装し、その有効性を評価した。

近年、SNS や Web サービスの利用拡大により、突如特定の Web サイトにアクセスが集中するフラッシュクラウドが頻発している。この現象は、サーバの応答遅延を引き起こし、ユーザの再送信によって負荷がさらに増大する悪循環をもたらす。このような事態を緩和するためには、サーバやロードバランサ間で負荷を動的かつ自律的に分散させる手法が求められている。従来は CDN, P2P, オートスケール技術、および L4・L7 ロードバランサなどが用いられてきたが、本研究では拡散現象を模倣した新たな制御手法に着目している。DC 方式では、各ノードが保持するリクエストキュー長の差に基づき、拡散方程式に従って隣接ノードへのリクエスト転送数を決定する。具体的には、リクエスト数の差に拡散係数を乗じた値が転送数となり、これにより全体の処理負荷を平滑化することが可能となる。本研究では、Go 言語を用いてソフトウェア LB を実装し、それを Docker コンテナ上に複数展開することで実験用のクラスタ群を構築した (図 1)。

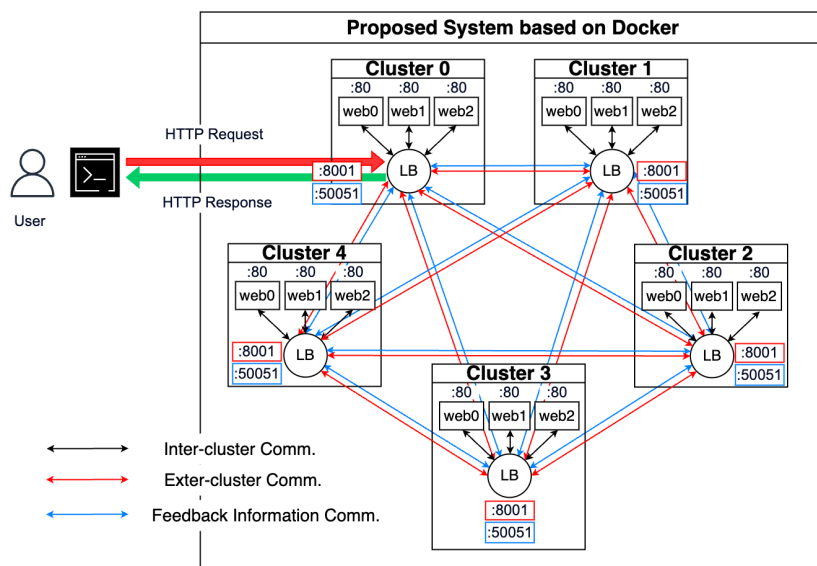


図 1 全体のシステム構成

各クラスタにはLBと複数のWebサーバが配置され、LB間はフルメッシュで接続されている。また、LB間の通信にはgRPCを用い、隣接ノード間で定期的にセッション数の情報を送受信し、これをもとに拡散方程式による重みを計算し、WRR (Weighted Round Robin) 方式によりリクエストを転送する設計とした。この構成により、あるクラスタにアクセスが集中した際に、他クラスタへ負荷を動的に移譲することが可能となる。

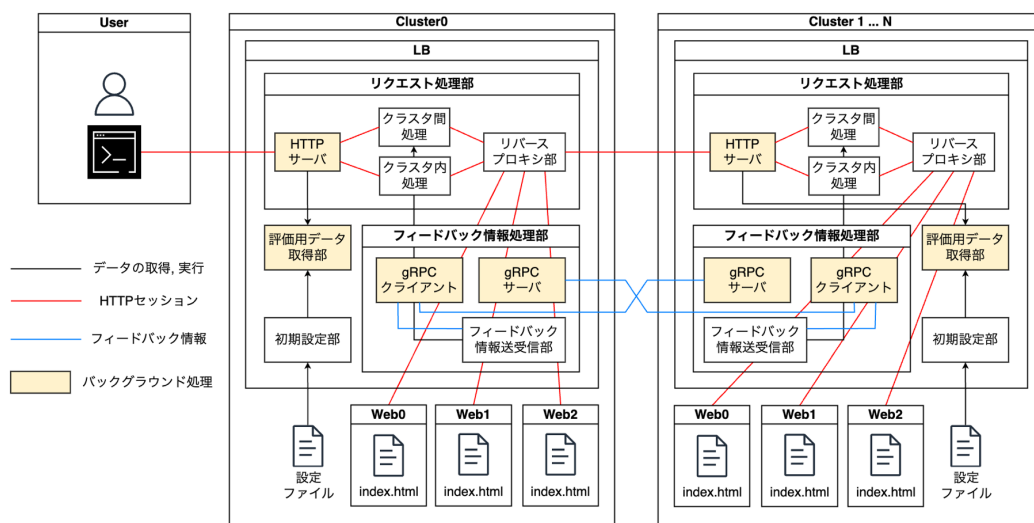


図 2 クラスタ間のシステム構成

評価実験では、代表的な負荷生成ツールであるk6を用いて、Cluster 0に仮想ユーザー100人分のリクエストを集中的に送信し、実機による負荷分散性能の評価を行った。評価指標として、各クラスタのセッション数、レスポンス数、リクエスト数を100ミリ秒間隔で収集し、閾値（セッション数のしきい値）を変化させながら負荷の分散状況を分析した。

評価の結果、閾値が10セッションと低い場合は、すべてのクラスタでセッション数が平滑化されたが、大量のリクエストが未処理となり、レスポンス数は十分に確保できなかった。これはリクエストの過剰な転送が生じ、いわゆる「マルチホップ」が発生しやすくなったためである。一方で、閾値を70セッション程度まで引き上げた場合、セッション数の平滑化は達成できなかったが、レスポンス数が平滑化し、リクエストの処理が効率的に行われるようになった。この結果は、セッション数の平滑化とレスポンス数の平滑化が常に

一致するとは限らないことを示している(図3)。

また、レスポンス数の観点から見ると、Cluster 0 が常にリバースプロキシとしてレスポンス返却に関与するため、他クラスタよりもレスポンス数が増える傾向が見られた。しかし、閾値を70セッションとした場合、各クラスタのレスポンス数の比率が5:1程度に近づき、理想的な負荷分散が達成されていることが確認された。

これらの結果を踏まえ、DC方式を用いた負荷分散システムは、適切な閾値設定を行うことで、実機環境でも安定的なレスポンスを提供できることが明らかとなった。一方で、閾値が低すぎる場合には、リクエストがクラスタ間を過剰に移動する「マルチホップ現象」が発生し、レスポンスが遅延する原因となる。今後の課題としては、このようなマルチホップを制限する仕組みや、閾値を固定するのではなく、隣接クラスタ間のセッション数の差分に基づき自律的に転送数を調整する動的閾値制御の導入が挙げられる。

本研究の意義は、理論モデルとしてのDC方式を実機に落とし込み、その実用性と制限を明らかにした点にある。今後、クラウド環境や大規模ネットワークにおいても本方式を応用しうる可能性があり、DC方式をベースとした次世代負荷分散制御技術の発展が期待される。また、ユーザアクティビティの増大によるシステムへの負荷の集中によってユーザ体験が大きく損なわれるような状況においても、本方式を用いることで一定の品質保証を実現できることから、サービス提供者にとっても有効な対策手法となると考えられる。

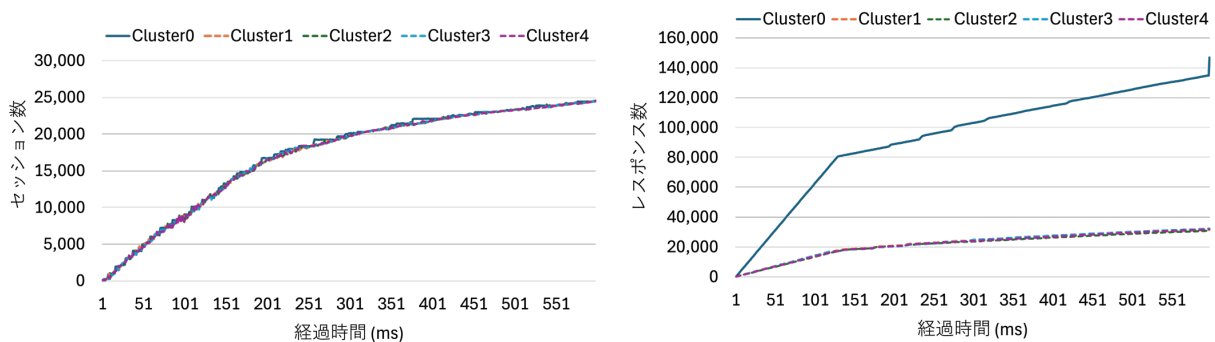


図3 閾値によるセッション数の推移(左: 閾値10, 右: 閾値70)

3 周波数スペクトル解析による低周波モードの顕在化とユーザダイナミクスへの影響

本研究は、SNS等のオンライン空間におけるユーザの過剰な活動—いわゆる「炎上」—の早期検知を目的とした新たな方法論を提案するものである。従来の炎上検知手法は、投稿数など時系列データの量的な変化を閾値超過により判断する方法が主流であったが、それでは炎上顕在化してからでなければ検知できないという限界があった。本稿では、SNSデータの周波数スペクトル解析を通じて、炎上の兆候として現れる「低周波モード」の出現に着目し、炎上の前兆を既存手法よりも早く察知可能とする理論的・実証的枠組みを提示する。炎上とは、ある事象を契機としてネット上で批判が大量に拡散される現象であり、その影響は社会的に重大である。現在は、投稿数のしきい値超過、コンテンツの感情分析、ユーザ属性の分析といった情報を複合的に用いたAIベースの検知が実用化されつつある。しかしこれらは多くが量的な変化に依存しており、本質的な構造変化の兆候には対応しきれていない。

これに対し、本研究では「構造変化によりネットワークに新たな低周波モードが出現する」という理論的洞察に基づく早期検知を可能とする手法を提案した。つまり、ユーザ行動の熱狂化(overheating)の兆候として時系列データに低周波成分が強く現れることに注目し、量的変化が生じる前段階でその兆しを捉えることを目的とする。このような理論的枠組みの基盤となる「振動モデル(Oscillation Model)」について解説する。振動モデルは、ネットワーク上のユーザ間の影響伝播が有限速度を持ち、かつ時間的因果性を満たすことを前提に、ユーザ活動を波動方程式により記述する枠組みである。このモデルでは、影響波形をフーリエ変換し、各周波数成分が有限速度で伝播することを前提とする。その結果、ユーザ活動の強度は波動エネルギー(振動エネルギー)として定義され、これは従来の次数中心性や媒介中心性の一般化であることが知られている。ネットワークのラプラシアン行列の固有値が実数から虚数へと変化することで、系の振動解の

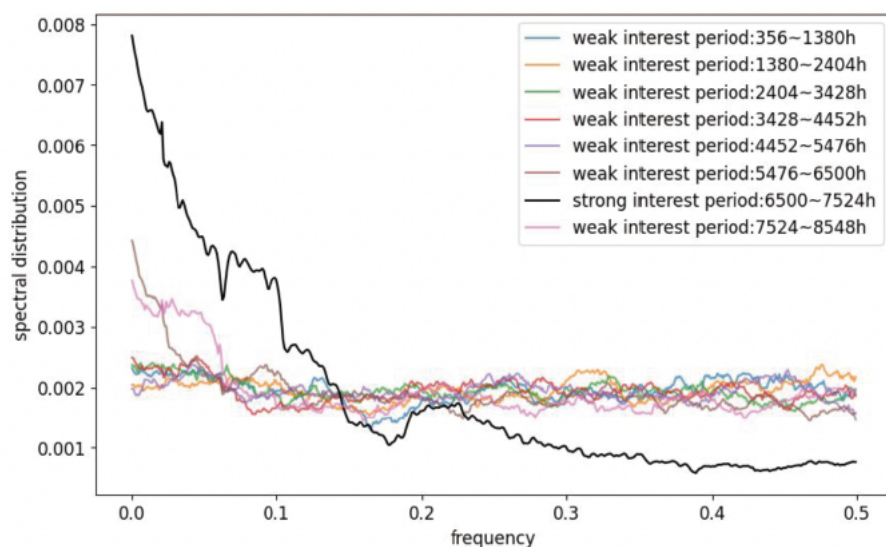
振幅が発散し、ユーザ行動が過熱化する現象が説明される。このとき、固有値の接近によって振動モード間に「打ち消し効果」が生じ、これが低周波モードの出現につながる。簡単な例として、近い周波数を持つ余弦波の重ね合わせでは、低周波ビートが観測されることが示されている。この現象は、振動エネルギーの平方を取ることによってそのスペクトルに顕著に現れ、さらに観測の分解能を下げた（移動平均を取った）場合、低周波成分だけが残る傾向にある。このような低周波モードの出現が、ユーザ行動の過熱化の兆候と一致することが理論的に導かれた。

また、この低周波モード出現の実データによる検証を行った。データには Google Trends で取得した特定キーワードの検索数（時間単位）を用い、この数値をユーザ行動強度の指標とみなす。データは1週間単位で取得されるため、期間が重なるように収集して長期的な時系列を再構成している。得られた時系列データは、固定長の時間区間に分割し、各区間ごとに高速フーリエ変換（FFT）を行った。その後、絶対値を取って位相情報を除いた振幅スペクトルを算出し、バイアス除去と定数倍の影響を除くために正規化を行った。これにより、単なる検索数の増加ではなく、構造変化に伴う周波数特性の変化に注目できるようになる。

福岡ソフトバンクホークスに関する検索データを例とすると、シーズン中に検索数が多い区間では低周波モードが顕著に表れており、オフシーズンに比べてスペクトルの分布に顕著な差が見られた。一方、「就活」に関するデータでは、検索数の増減があってもスペクトルに大きな差異は見られず、単なる検索行動の変化ではなくネットワーク構造の変化がスペクトルに反映されることが示唆された。この低周波モードの出現によってユーザ行動の過熱化を事前に予測する可能性について検討している。ここでは、Japan Series（プロ野球日本シリーズ）、ウクライナ情勢、およびビッグモーター社の不祥事に関する検索データを事例として取り上げている。Japan Series に関しては、大会開催直前および開催中の区間で顕著な低周波モードの出現が確認されており、さらにその直前や終了直後にも同様のモードが表れている。これは、人々の関心の高まりや余韻といった社会的構造変化がネットワークに反映されていることを意味する。ウクライナでは、ロシアによる侵攻開始の前後で検索数が急増しており、その直前の期間においても低周波モードの顕著な変動が確認された。バイデン大統領による発言や地政学的な緊張の高まりがネットワーク構造に影響を及ぼし、検索行動にもその兆しが現れていたと考えられる。

ビッグモーター社に関しても、保険金不正問題が報道された直後から検索数が増加し、それに先立つ数ヶ月前から低周波モードの強まりが見られている。このことから、事件の顕在化以前に社会的関心が構造的に高まっていた可能性が示される。以上より、時系列データのフーリエスペクトル解析を通じて低周波モードの変化を観測することで、ユーザ行動の過熱化を事前に予測可能であることが実証的に示された。

本研究が提案する方法の意義を強調している。すなわち、本手法はコンテンツの感情分析やソーシャルグラフの構造解析といった複雑な処理を必要とせず、単純な時系列の周波数解析のみで実装可能であるという点で、高い実用性と応用可能性を有している。特に経済・金融・広報分野などにおいて、社会的な関心の高まりや炎上の兆候を早期に察知するツールとして応用できる可能性がある。



〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A Dynamic Splitting TCP Using both Packet Loss Rate and Latency	The Twelfth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2024) Workshop (17th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks (ASON 2024))	November 26-29, 2024
Characteristic analysis of SNS videos for detection of flaming using sentiment analysis and principal component analysis	The Twelfth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2024) Workshop (17th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks (ASON 2024))	November 26-29, 2024
Early detection of user dynamics overheating through frequency analysis of time-series data	The 22nd IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC 2024) Workshop (The 22nd International Workshop on Assurance in Distributed Systems and Networks)	November 5 - 8, 2024
SBOM を活用したブロックチェーンによるソフトウェア依存関係管理手法の提案	電子情報通信学会 情報通信システムセキュリティ研究会	2025 年 3 月 6 日
エッジコンピューティングにおける遅延と同時接続数を考慮した最適リクエスト転送比率の導出手法	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2025 年 3 月 7 日
アドホックネットワークにおける結合振動子の同期モデルに基づく送信タイミング制御法	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2025 年 3 月 7 日
BLE-Advertisement を用いた Bluetooth MANET におけるフラッド通信の高速化と効率化を目指した通信制御	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2025 年 3 月 7 日
パケットロス率と遅延に基づく動的な TCP コネクション分割機構	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2025 年 3 月 7 日
ネットワーク上の拡散方程式に基づくロードバランサ間の負荷分散システムの実装	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	2024 年 12 月 19 日
5G 網の QoS を活用した IP ポリシールーティングの提案	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	2024 年 12 月 20 日
未公表の企業情報の特異な動向を早期検知するためのユーザダイナミクス分析法の検討	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2024 年 12 月 19 日
未公知の企業情報の特異な動向を早期検知するためのユーザダイナミクス	電子情報通信学会 革新的無線通信技術に関する横断型研	2024 年 10 月 29 日

分析技術	究会 (MIKA),	
Classic と BLE-Advertisement を併用した Bluetooth MANET における通信の高速化の検証	電子情報通信学会 CQ 研究会	2024 年 9 月
パケットロス率計測に基づく動的な TCP コネクション分割機構の通信特性評価	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2024 年 7 月 29 日
電波強度差による Evil Twin 攻撃の成功率調査 ～ 負荷状態および接続要求 flood による成功率の変化 ～	情報処理学会, 第 106 回コンピュータセキュリティ・第 56 回セキュリティ心理学とトラスト合同研究発表会	2024 年 7 月 22 日
認証コード入力時の目の動きを利用した不正ログイン検知	情報処理学会, 第 106 回コンピュータセキュリティ・第 56 回セキュリティ心理学とトラスト合同研究発表会	2024 年 7 月 22 日
ネットワーク上の拡散方程式を利用したロードバランサ間の負荷分散方式の提案	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	2024 年 06 月 06 日
不均一なノード密度を持つマルチホップ無線ネットワークにおける自律分散スペクトルクラスタリング	電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会	2024 年 05 月 30 日