

形を変えながら動く 3次元物体の解析手法の提唱

—動くから形が変わるのか、形を変えることで動くのか—

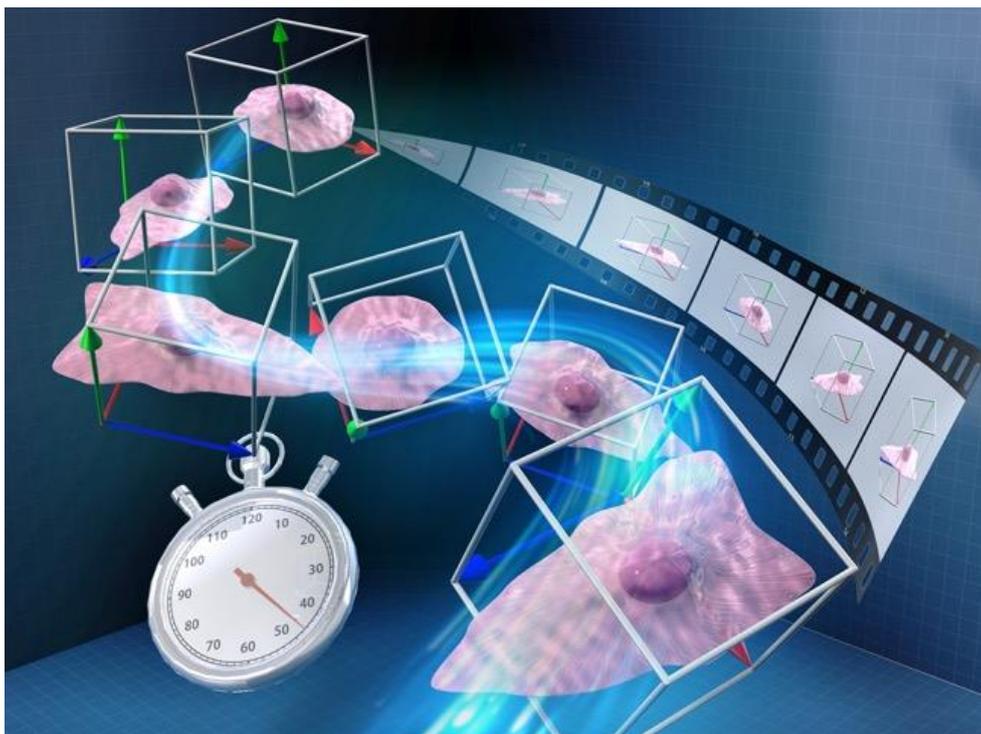
概要

京都大学大学院医学研究科統計遺伝学分野 Yusri dwi heryanto 博士と山田亮同教授は、変形しながら移動する3次元物体の、軌道と形とを経時的に計測し、形の変化と速度や軌道の変化との相互関係を解析するためのコンピュータソフトウェアを開発し発表しました。3次元物体の形はとらえどころがなく、形を定量的に捉えること自体も、困難な課題の一つですが、それについては、球面調和関数分解を用いた既存の方法を採用しました。他方、2つの三次元物体の形を比較することは、さらに難しい問題です。それは最適配置決定問題と呼ばれる問題です。

よく似た形をした2つの物体の形を比較するときに、比較しやすいように向きを揃えることができれば、形の異同を定量することは簡単ですが、どのような配置にすることが、比較するために最適であるかを定めることが難しいからです。Yusri 博士らは、この最適配置決定問題を解くのではなく、それを回避することで、形・変形・運動の統合解析手法の作成に成功しました。空間を移動している物体には進行方向、進行方向の曲がり方向、よじれ方向の3方向があります。この3方向を物体の形を評価する座標系として採用する用いることにより、物体の運動軌道に特有の配置を選ぶことができます。このように物体の軌道情報と直結した座標系を物体のその時々々の形評価用の座標系とすることで、最適配置決定問題を解くことなく、形の比較をするための座標系の取り方に根拠を与えました。

この当方解析手法により、物体が周囲環境から力を受けて、移動・変形する様子や、逆に、物体が自発的に動こうとしているときに、周囲環境との相互作用で変形・方向転換する様子を統計解析・シミュレーション解析・モデルフィッティングすることなどが可能になりました。Yusri 博士らは細胞の移動と変形のデータにこの方法を適用しましたが、世の中には、移動しながら変形する現象は多数あり、ライフサイエンス分野では、細胞内小器官・細胞・組織・臓器などへの応用が可能であり、物理学分野にも多くの応用例が考えられます。

本研究成果は、2021年3月26日に、英国誌「Open Biology」のオンライン版に掲載されました。



1. 背景

細胞の中には、感染部位などに向かって移動して身体防御の役目を果たすものがあります。そのとき、細胞は、直線的ではなく、速さと進行方向を変えながら進みます。また、その移動に際して、大きく形を変化させながら進みます。その軌道の複雑さと変形の複雑さとは、細胞が目的地に向かおうとする細胞の内在的な推進力の発生と、細胞周囲の環境である細胞外マトリックスの物理化学的性状と、細胞と細胞外マトリックスとの接触面との力学的関係とが合わさって決まる、複雑な仕組みになっていると考えられています。その推進力・変形・進行方向の変化を分子生物学・細胞生物学・生物物理学的に理解するためには、形・変形・軌道を統合して数理モデルで扱うことができる道具が必要です。

2. 研究手法・成果

物体の3次元画像を経時的に取得し、3次元物体を三角形メッシュで近似します。3Dアニメーションで用いられる手法と同じ手法です。三角形メッシュは、数学的に安定な方法で、半径が1の球に変形する方法が知られています。これにより、オリジナル3次元物体表面の各点の情報(x,y,z座標や曲率)が単位球面上に張り付けられます。球面上に張り付いたこれらのオリジナル物体の情報は球面上の値が作る模様(関数)となります。球面上の関数は、球面調和関数分解という手法により、数値の列にスペクトル分解されます。これはいわゆる関数をフーリエ変換することと同じようなことです。これにより、3次元物体の形を数値列として扱うことが可能になります。

他方、物体が移動するとき、重心に着目すると移動曲線が得られます。曲線上のいたるところに、進行方向・曲率変化方向・捩れ変化方向が定まっており、その3方向を曲線に張り付いた座標系とみなす方法が「動標構」として知られています。

形を比較するときには、この数値列スペクトルの違いを用いることができますが、この数値列は座標系の取り方によって変化してしまうという問題があり、それが形の比較、変形の定量を難しくしていました。Yusri博士らは、3次元物体の形を数値列に変換する際に、この動標構を使うことにより、物体の移動性質に従った座標は運動と共に起きる変形の定量に有用な座標系であると予想して、動標構に基づいた形評価スペクトルを取り出す方法を作成しました。

この方法を用いることにより、実際の移動・変形細胞の形の特徴と進行方向とに重要な関係があることを定量的に示すことに成功し、移動軌跡情報と動標構に基づいた形スペクトルとを用いることで、細胞を分類する性能が高くなることを確認しました。

3. 波及効果、今後の予定

3次元物体の形・変形・運動軌跡の統合定量解析が可能となったことから、細胞・細胞内小器官・組織等のライフサイエンスにおける変形移動を伴う諸物体の運動・変形の定量解析が可能になります。また、細胞等の物体が移動変形するデータを生物物理学的モデルに基づいてシミュレーションできますので、それと組み合わせることで、変形・運動解析のパターンから、モデルパラメータの推定を行う研究への転用も可能と思われます。

さらに、ライフサイエンスに留まらず、多くの物理現象にも解析の原理は利用可能であり、幅広い分野への応用も期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科研費助成事業(JP19J14816)、JST CREST「動く1細胞の「意思」を読み取る in vivo 網羅的動態・発現解析法の開発」および JST CREST「離散構造統計学の創出と癌科学への展開」の支援を受けて京都大学で実施されました。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Integrated Analysis of Cell Shape and Movement in Moving Frame（動標構を用いた細胞の形と動きとの統合解析）

著者：Yusri Dwi Heryanto, Chin-Yi Cheng, Yutaka Uchida, Masaru Ishii, Ryo Yamada

掲載誌：Biology Open (BiO)

リンク先：<https://bio.biologists.org/content/10/3/bio058512>