



## たかが曲線、されど曲線。曲線の応用が新技術を生む

1本の曲線によって2次元平面、さらに3次元以上の多次元空間をも埋め尽くすことができる「空間充填曲線」。ペアノ曲線、Z-order 曲線、モートン曲線など様々な種類があり、これまでデータ圧縮や画像処理、空間インデックスの作成などの応用研究がある。30年以上前から「画像処理」をテーマに研究を続けている大学院情報生産システム研究科の鎌田清一郎教授も、この空間充填曲線に着目。新たな画像処理アルゴリズムの開発に取り組んでいる。

### 国際標準方式より優れた方法論を見出すために

コンピュータの普及に伴い、デジタル通信やデータ蓄積などを目的として急速に重要性が高まった、デジタル画像圧縮の技術。特に、インターネット上のウェブサイトなどで画像情報が多用されるようになって以降は、JPEGやGIFなどの静止画像圧縮、MPEG-4による動画圧縮などの技術が相次いで規格化された。

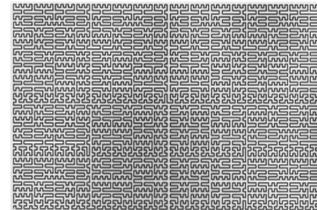
画像処理において、効率的な伝送・蓄積のために不可欠な技術である圧縮技術だが、例えばJPEGは、圧縮時に情報が失われるため画質が劣化するほか、いったん圧縮した部分は逆DCT変換を用いないと元に戻せないこと、透明部分や細かいディテールが多い画像には向いていないことなど、いくつかの弱点がある。MPEG形式による動画圧縮も同様だ。

そうした中で、30年以上にわたり画像処理分野の研究を続けている鎌田教授は、JPEG、MPEGなど現行の国際標準方式よりも優れた画像処理アルゴリズムの開発を目指している。「画像のイメージを大切にしたいという思いから、画像処理の研究に取り組むようになりました。そのために着目しているのが『空間充填曲線』の応用です」。

マイクロソフトが採用した画像圧縮法としては、画像をより小さな部分に分割し、それらの部分を再帰的に拡大縮小することで元の画像を表現する「フラクタル圧縮法」などがポピュラーだが、鎌田教授が注目しているのは、ペアノ曲線の一種である「ヒルベルト曲線」を応用した、非可逆性の画像情報圧縮手法だという。

1980年代に研究を始めて以降、

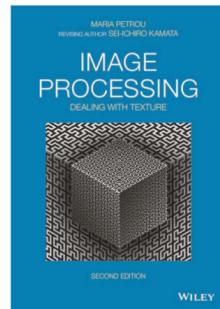
- (1) 3次元空間内のデータをヒルベルト曲線によって1次元データへと変換した後、得られた1次元データに対する時空間領域での処理を行う可逆性の動画圧縮法
- (2) カラー画像の輝度や色差情報をヒルベルト曲線で辿ることで近傍保存性の高い1次元データを得て、これに対し簡単な領域分割処理で近似直線を求めるカラー静止画像の圧縮法…など、複数の論文を発表している。



疑似ヒルベルト曲線（長方形）

「テレビ映像などで一般的に使われているラスター走査は、横方向に2次元面の画像をたどる手法なので、画像の局所的な特徴を捉えにくいという弱点があります。その点、空間充填曲線を効率よく作れば、細部まで走査できるので色々な画像の特徴が抽出できるのです。また、その特徴抽出を認識に用いれば、デコーダで逆DCT変換などの処理が必要なく、エンコーダと認識処理を連動させることができます。この技術のベース部分は、すでに監視カメラ映像から物体や人物を認識するシステムとして製品化されており、九州沖縄コミット、六本木ヒルズや東京ミッドタウンなど大型商業地、JRなどのいくつかの駅構内、などでも活用されてきたという」。

### 空間充填曲線を応用した暗号技術



曲線を応用した暗号技術で最も有名なのが楕円曲線暗号だ。世界的に有名になったフェルマー最終定理の証明に用いられている。これに対して、空間充填曲線は多次元平面上を埋め尽くす連続した曲線であり、超立方体領域の曲線パターンが空間上で繰り返し現れる特徴がある。そのため、多次元データを表現する際にも様々な曲線を生成するアルゴリズムを構築することが可能だ。同時に、多次元空間上で折れ曲がりながら1本の曲線として全域をカバーするので、様々な組み合わせ問題が考案できる。

鎌田研究室ではこれらの性質を暗号技術に活かし、効率的な暗号アルゴリズムの開発にも取り組んできた。「2次元の座標上に、アドレスシーケンスを作れるのがこの曲線の強み。もちろん、多次元空間の座標を発生させれば、多次元構造に拡張することも可能です」。

曲線上のアドレスを配置して、空間充填曲線を用いた暗号アルゴリズムは、科学技術振興機構・早稲田大学主催の新技術説明会で発表済。

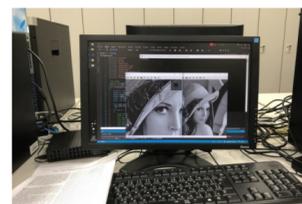
### ハイパースペクトル画像の解析に曲線を応用

鎌田研究室が研究に取り組む、曲線を応用した画像処理手法は、さらに拡がりを見せている。その1つが、宇宙産業での「ハイパースペクトル画像」分類への応用だ。工業分野では、異物・不適合品の検出やプラスチック素材等の選別、半導体ウェハの膜厚測定などに活用されているが、100バンド以上になる波長域ごとの画像を目的別に識別・分類する工程に、空間充填曲線などによるハイパースペクトル画像の部分走査と、エンコード及びデコード技術を用いる取り組みだ。

「例えば、人工衛星から撮影された地上のハイパースペクトル画像を、再帰型ニューラルネットワークとTransformerによってアスファルト部分、未舗装部分、樹木エリア部分といった具合に分類し、土地利用に活用するモデルを作ってみました」。目的に応じた曲線を発生させることで、縦・横方向などの様々なスキャンパターンを用いて推定することで、より精度を高められる。

「周辺の画素からターゲットとなる画素の輝度値を予測する、画像圧縮の考え方の応用なのです。実際にやってみると面白い結果が出たので、先ごろマレーシアで開催された画像処理に関する国際会議ICIPで発表しました」。

この研究に取り組み始めたきっかけは、画像認識やマシンビジョン等の研究で世界的に有名な、故マリア・ベトロ氏（インペリアルカレッジ・ロンドン）から曲線に関する共同研究を持ちかけられたことだという。「共同研究の道半ば、彼女は2012年に亡くなったのですが、その後、私が遺志を継ぐ形で専門書籍（右画像）を上梓しました」。「数学が好きな学生は、ぜひ当研究室を訪れてもらいたいものです。数学が好きで、曲線の理論を積極的に研究しているうちに、一般社会に還元できるアイデアが生まれた研究分野ですからね」。鎌田研究室の研究キーワードは、「たかが曲線、されど曲線」。まさに、曲線の応用から社会に役立つ技術を生み出す研究なのだ。



研究の様子