SSAアルゴリズムの拡張と3次元多角形メッシュへのロバストな電子透かしの埋め込み

RA　室谷 浩平

情報理工学系研究科数理情報学専攻

1　はじめに

これまで電子透かしを埋め込む対象となっていたものは，いわゆる古典的なデータ構造を持つもの（文書データ，2次元静止画，2次元動画，音声，楽曲など）が多かったため，その様なデータ構造を持つものに対しての研究は多くなされてきた．近年になって，3次元データ構造をもつ対象（3次元多角形メッシュ，3次元CADデータ等）がより一般的に使われるようになってきたため，この様なデータ構造を持つものに対しても電子透かしを埋め込むことが求められてきた．

本研究では，この様な要求に応えるために，3次元多角形メッシュに電子透かしを埋め込む新たな手法を構成した．この手法は，対象となるメッシュに平行移動，回転，一様拡大縮小の編集が行われても，安定的に透かしを取り出すことができる．さらには，透かしを破壊する目的で，一様なノイズを頂点座標に付加されても，透かしを安定に取り出すこともできる．

電子透かしをスペクトル係数に埋め込む電子透かしの技術では，何らかのスペクトル分解が必要となる．これまでの研究では，ラプラシアン行列を固有値分解したり，特定のクラスのメッシュに対してウェーブレット展開を行なったりして，電子透かしを埋め込むことに成功している．これに対して，我々は，基本SSAアルゴリズムを3次元多角形メッシュに適したものに拡張し，それを用いて，これまでの手法よりも幾つかの点で優れている透かしの埋め込み方法を提案した．

2　基本SSA

Singular-Spectrum Analysis（SSA）は，比較的新しい時系列解析の手法である．SSAは主に気象学や気候学，海洋学，非線型物理，信号処理の分野などに幅広く利用されている．SSAは，時系列データを意味のある時系列に分離することができるため，時系列からのトレンド・季節成分の分離，時系列の予測，構造変化の検出などの特徴検出の一般的な手法の一つとなっている．

基本SSAは，オリジナルの系列から自己相関行列を作り，その自己相関行列を固有値分解することによって，オリジナルの系列の分解を得るアルゴリズムである．自己相関関数のフーリエ変換はパワースペクトルになるという事実から，この系列の分解はスペクトル分解になっていることが分かる．このような特徴に加え，離散的な時系列データに対して基本SSAが用いられる背景には，フーリエ変換やウェーブレット変換で必要になる基底を，データから自動的に，必要な分だけ作成することができるところにある．

3　拡張SSA

前章で説明した基本SSAは1次元系列に適用する手法であるので，3次元多角形メッシュにそのまま適用するのは適切ではない．そのため，メッシュ間の接続構造を考慮した手法に拡張する．アルゴリズムの詳細は文献[2]を参考にして頂きたい．

基本SSAでは，時系列から作成された自己相関行列を固有値分解する事によって，スペクトル分解を実現していた．基本SSAを拡張するに当たり，この自己相関行列の作り方が問題になる．ここに，メッシュの接続構造を組み込んだ自己相関行列の構成の仕方の1例を示しておく．

まず，図1にあるように，メッシュのある1つの頂点に注目し，その頂点を自己相関をとる系列の1つ目の要素とする．次に，その頂点から枝n本分離れた頂点をnリングと呼ぶことにし，このnリングの重心を

自己相関をとる系列の $n+1$ つ目の要素とする．このようにして，メッシュの全ての頂点に対して系列を作り，それぞれの系列から相関行列を作成すると，この相関行列は自己相関行列になっている．このようにして，3 次元多面体メッシュをスペクトル分解するための自己相関行列を作成することができる．

3 次元多面体メッシュのような 2 多様体上に，2 パラメータで表されるグローバルなパラメタライゼーションをとるのは非常に困難である．そのため，任意のメッシュに対して，多次元のフーリエ変換やウェーブレット変換を用いることができなかった．しかし，この拡張 SSA は，3 次元多面体メッシュに対してグローバルなパラメタライゼーションをとる必要がないため，3 次元多面体メッシュと相性がよく，しかもロバストな手法であるといえる．

ラプラシアン行列を用いたメッシュのスペクトル分解法では，頂点数オーダーのランクを持つ行列を固有値分解する必要である．行列の固有値分解や特異値分解には，行列のランク数の多項式時間アルゴリズムが存在していないため，ここでの計算量が最もネックとなる．よって，固有値分解する行列のサイズを如何に小さくするかが問題になる．本手法は，自己相関行列を作る際に，どこまでリングを作るかで，行列のサイズを制御できる．このように，計算量の点でも本手法は優れていることがいえる．

本研究では，この拡張 SSA の分解アルゴリズムを利用して，ロバストな電子透かしの埋め込みに応用する．

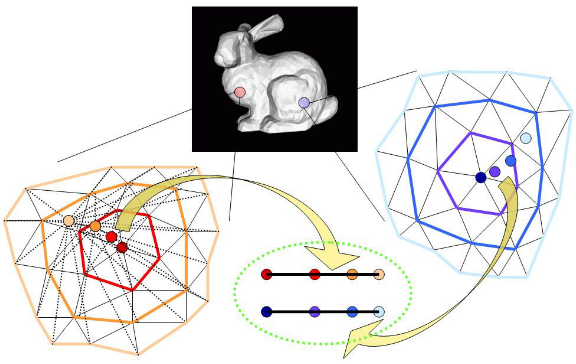

図 1. オリジナルメッシュと透かし入りのメッシュ．

4　スペクトル領域への電子透かし埋め込み

本手法では，拡張 SSA を用いて 3 次元多面体メッシュをスペクトル分解し，そのスペクトル係数に透かし情報を埋め込む．埋め込み方の詳細は，文献 [2] に譲る．

表 1 は，頂点座標に一様なノイズを乗せて埋め込んだ透かしがどれだけ取出せたかをみた実験結果である．γ はノイズの大きさを表すパラメータである．比較対象として，文献 [1] による基本 SSA を用いた手法とラプラシアン行列を用いた方法を用いた．拡張 SSA を用いた手法では，透かし情報を重ねずそのまま埋め込んだが，残りの 2 手法では同じ情報を 15 回重ねて埋め込んだ．それにも関わらず，透かしの頑強性に大きな差がみられない．それは，拡張 SSA を用いた透かしの埋め込み法は，リングの頂点の重心を取る操作によって，ノイズを打ち消し合っているからであると考えられる．スペクトル分解の前にノイズを打ち消すか，スペクトル分解の後にノイズを打ち消すかの違いはあるが，それによる頑強性の差はみられないといえる．よって，拡張 SSA を用いた電子透かし埋め込みは，冗長に情報を埋め込む必要がなく，かつ，前章で述べたように，計算コストも少なく済むので，有効な手法であるといえる．

表 1. 一様なノイズに対する頑強性．

"bunny"	$\gamma=1$	$\gamma=0.1$	$\gamma=0.01$
拡張 SSA	61.55%	96.16%	100.00%
基本 SSA	42.28%	90.94%	100.00%
ラプラシアン行列	64.62%	98.26%	100.00%

参考文献

[1] Murotani, K., and Sugihara, K., Watermarking 3D Polygonal Meshes Using the Singular Spectrum Analysis, *Proceedings of the 10th IMA International Conference on The Mathematics of Surfaces*, pp. 85-98, Leeds, UK, September 2003.

[2] 室谷 浩平，杉原 厚吉，SSA アルゴリズムを用いた 3 次元多角形メッシュへの電子透かしの埋め込み，暗号と情報セキュリティシンポジウム，仙台，2004.