

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Mass Spring Models for the Simulation of Deformable Objects
著者(和文)	MACIEJ KOT
Author(English)	Maciej Kot
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9660号, 授与年月日:2014年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:長橋 宏,熊澤 逸夫,小池 康晴,中村 健太郎,山口 雅浩
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9660号, Conferred date:2014/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	Maciej Kot		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	長橋 宏	教授	審査員	山口 雅浩	教授
	審査員	熊澤 逸夫	教授			
		小池 康晴	教授			
	中村健太郎	教授				

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Mass Spring Models for the Simulation of Deformable Objects (可変形状物体モデルのシミュレーションのためのばね質量モデル)」と題し、英文7章から構成されている。

第1章「Introduction (序論)」では、CGやVRの世界における柔軟物体の自然な振舞いの表現や力覚フィードバックにおける材質の表現などに対する要求の高まりを背景に、弾性特性を物理的に正しく表現する能力と使い易さを兼ね備えるモデル表現法が必要であると述べている。そして、本論文の目的が、CGの分野でよく用いられる質点ばねモデル(Mass Spring Models; MSM)において、物体を特徴づける弾性係数とモデルパラメータとの関係を明らかにするとともに、モデルの表現力をより一層高めるためのMSMの改良法を提案し、その有効性を示すことであると述べている。

第2章「Mass spring models (質点ばねモデル)」では、物体変形の基礎となる線形弾性理論について述べた後、質点とばねを連結したネットワークであるMSMとの関係について述べている。均質で等方性を有する物体においては、内部力が中心力のみで与えられると仮定した場合、そのポアソン比が1/4となることは連続体力学の分野では周知の事実である。このことを受けて、均質で等方性を有する物体の弾性論的特性を保存したMSM表現を実現する2つの方法、すなわち、立方格子MSM(cubic lattice MSM; cu-MSM)と不規則MSMについて述べている。そして、不規則(disordered)MSMの新たな表現法として、ランダムMSM(random MSM; ra-MSM)を提案し、その弾性論的解析を行っている。さらに、上記の弾性特性を持つ物体の一般的なMSM表現に関して、ヤング率とMSMネットワークを構成するばねの係数とその長さとの間の簡潔な関係式を導いたことで、効率的な弾性体のモデル設計が可能になったと述べている。

第3章「Model verification(モデルの検証)」では、cu-MSMおよびra-MSMの両モデルにおいて導いた弾性パラメータの関係式を検証するための数値計算を行い、理論的な予測値と十分に一致する結果が得られたと述べている。すなわち、cu-MSMについては、ばね定数の調整によってヤング率、ポアソン比とも一定に保ったまま、ノード間距離を変えることでモデル解像度を変化させることが可能であること、またra-MSMについても、ノード当りの平均連結数を変化させることで、ポアソン比を保ちつつヤング率を変化させることができることを示している。さらにra-MSMは、cu-MSMとほぼ同等の精度表現能力を持つだけでなく、モデルの連続的解像度表現を可能にすると述べている。

第4章「Extended mass spring models (拡張質点ばねモデル)」では、従来のMSMの制約が線形弾性理論およびネットワークのノード間の中心力による相互作用から生じていることを述べ、これら2つの制約を克服するためのMSMの改良法について述べている。新たな構造要素を追加することによってモデルの表現力を増すことも可能であるが、計算コストの増加とモデル表現の複雑化の要因となる。そこで、構造要素を追加せずに任意のポアソン比を実現できる、拡張されたMSM(extended MSM; eMSM)表現法を提案している。この方法は、粒子とキャリアの相互作用に基づく運動量の散乱を扱うparticle interaction model(粒子相互作用モデル)に基づく運動量の散乱機構をMSMネットワークに導入したもので、従来のMSMモデルに対して新たな1個のパラメータを追加するのみである。そして、弾性論的解析の結果として、ポアソン比は追加されたパラメータの関数として与えられることを示している。eMSMをベースとしたcu-eMSMとra-eMSMの双方についてポアソン比の理論的推測値との比較を行い、両モデルとも極めて高い一致度を示していると述べている。

第5章「Anti-aliasing (アンチエイリアス法)」では、弾性体のMSM表現を精緻化する方法として、画像の折り返し雑音を低減する手法であるアンチエイリアス法を3次元モデル表現に適用する方法に

ついて述べている。提案手法では、弾性体が cu-MSM による質点とばねのネットワークとして表現されているとき、その質量とばね定数を参照形状との重なり体積の端数に応じて調整する。この技術によって、cu-MSM に現れるステップ状の特徴が大幅に軽減されるため、物理的特性を保存した状態で低解像度なモデル表現が可能になると述べている。そして、アンチエイリアスを施したモデルの動的振舞いが、標準的な MSM によるモデルと比べて大幅に改善されることを実験により示している。

第6章「Aspects of dynamics of mass spring models(質点ばねモデルの動特性)」では、モデル表現における解像度の変化がモデルの動的特性に与える影響について論じている。すなわち、提案した eMSM により異なる解像度でモデル化した弾性体に対して、その動的振舞いを explicit time integration 法(陽解法)によってシミュレーションしている。その結果、異なる解像度で表された2つのモデルは様々な環境の下でも正確な振舞いをし、かつそれらの振舞いの間に大きな相違は見られないことを明らかにしている。さらに、異なる材質で構成された複合物体の衝突や摩擦応答についても実験を行い、いずれも正しく表現できることを示している。

第7章「Conclusions and final remarks(結論および最終所見)」では、本論文で得られた成果を総括するとともに、今後の課題について述べている。

以上を要するに、本論文は、CG や VR 分野で弾性体のモデル表現に用いられる質点ばねモデルにおけるモデル設計の効率化とモデル表現における弾性論的制約を解消するための方法を提案し、その有効性を示したものであり、工学上寄与する所が大きい。よって、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認められる。