

FPGA を用いた仮想レオロジー物体変形計算

○ 木村政文 徳本真一 平井慎一(立命館大学)

Computation of Deformation for Virtual Rheological Object on FPGA

*Masafumi Kimura, Shinichi Tokumoto and Shinichi Hirai (Ritsumeikan University)

Abstract - In this paper, we will present a method to implement the deformation computing for virtual rheological objects on FPGA. Computation of rheological object requires much time due to repetitive operations. It is necessary to construct a parallel computation and implement it on FPGA to meet requirements in time. First, we will choose rheological elements which are determined by the properties of rheological objects. Second, we will propose a method to construct a lattice model of rheological objects. Finally, an implementation of the computation for the deformation of rheological objects will be presented.

Key Words: FPGA, Virtual Reality, Rheological Objects, Modeling, Deformation Computing.

1. はじめに

レオロジー特性を示す物体として、我々の世界では生体組織や食品などが挙げられる。実世界にあるこれらのレオロジー物体を仮想世界の空間内に構築し、その空間内での操作者に現実感を与えるためには、変形および力覚情報を提示する必要がある。しかし、変形シミュレーションでは計算に時間を費やし、モデルの変形応答をリアルタイムで行うことが困難である。これは格子状に組まれたレオロジー要素において繰り返し計算を大量に行っているのが原因である。そこで本研究では、計算部分を並列化し、FPGA に実装することにより、計算処理を高速化する手法を提案する。

2. レオロジー要素の選択

力と変位の関係は、弾性要素と粘性要素の組み合わせで表される。これをレオロジー要素とよぶ。レオロジー物体の特性は、(1) 残留変位を有する、(2) 戻り変位を有することである。Fig.1 に示すレオロジー要素が、この条件を満たし、レオロジー物体のモデリングに適した最も簡単な力学要素となる。

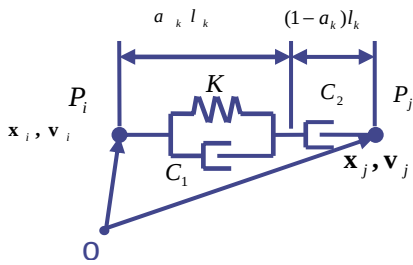


Fig. 1 Simplest element of rheological objects

3. レオロジー物体モデリング

Fig. 1 に示したレオロジー要素を定式化する。座標系の原点を 0 とする。要素の両端の座標を P_i 、 P_j とする。質点 P_i における位置、速度、質量をそれぞれ x_i 、 v_i 、 m_i とする。質点 P_j も同様に x_j 、 v_j 、 m_j とする。フォークト部のばね定数を K 、ダンパー定数を C_1 、フォークト部と直列に配置されたダンパーのダンパー定数を C_2 とする。さ

らにフォークト部の自然長を L_k とする。フォークト部の長ささとダンパー部の長さをそれぞれ $a_k l_k$ 、 $(1-a_k) l_k$ とする。フォークト部に作用する力の大きさ f_k は、

$$f_k = -K(a_k l_k - L_k) - C_1(\dot{a}_k l_k + a_k \dot{l}_k) \tag{1}$$

である。ダンパー部に作用する力の大きさは、

$$f_k = -C_2(-\dot{a}_k l_k + (1-a_k) \dot{l}_k) \tag{2}$$

である。ダンパー部とフォークト部に作用する力の大きさはそれぞれ等しいので、

$$\dot{a}_k = \frac{-K(a_k l_k - L_k) - (C_1 a_k - C_2(1-a_k)) \dot{l}_k}{(C_1 + C_2) l_k} \tag{3}$$

となる。またレオロジー部の速度は以下ようになる。

$$\dot{l}_k = \frac{(x_i - x_j) \cdot (v_i - v_j)}{l_k} \tag{4}$$

4. 格子モデル

三次元形状を表すために、格子モデルを導入する。格子モデルでは Fig. 1 に示した三要素レオロジーを格子状に組み合わせ物体を構築する。物体の自然形状を格子状に分割し、仮想レオロジー物体を表現する。このとき、面を構成する最小の単位は三角形であるので 3 つのレオロジー要素で表現することになる。このように質点と質点を結ぶレオロジー要素の組み合わせにより、格子モデルを実現する。レオロジー要素に順次番号を付け、第 k 要素を E_k とする。このレオロジー要素 E_k は両端に質点番号を持つ。片方の質点を始点、もう片方の質点を終点と決める。このことにより、質点に作用する力の正負を定めることができる。したがって、Fig. 1 において始点を P_i 、終点を P_j としたとき、三要素モデル E_k が始点 P_i に与える力は $f_k e_k$ であり、終点 P_j に与える力は $-f_k e_k$ である。ここで、 e_k は始点から終点に向かう単位ベクトルであり、以下の式で与えられる。

$$e_k = \frac{x_i - x_j}{l_k} \tag{5}$$

5. 並列変形計算

三要素モデルに作用する力は(2)(3)(4)(5)式を用いて、状態変数 X_i 、 V_i 、 X_j 、 V_j 、 a_k で計算することができる。三要素モデルの始点と終点の位置と速度から、 $f_k e_k$ と $-f_k e_k$ を計算する論理回路 E_k を、基本演算要素とする。質点 P_i を始点とする三要素モデルの集合を R_i 、質点 P_j を終点とする三要素モデルの集合を S_j とする。三要素モデルから質点に作用する力の総和は、

$$F_i = \sum_{k \in R_i} f_k e_k - \sum_{k \in S_i} f_k e_k \quad (6)$$

で表される。それぞれの質点に作用する力を個別に計算することにより、これらの計算は並列化することができる。

6. 物体変形計算の設計

本研究では Xilinx 社の FPGA を用いてプログラムの実装をおこなう。FPGA は 20 万ゲート Spartan-II を使用する。開発ツールは Foundation ISE とし、記述言語 Verilog-HDL とする。前述した基本演算要素 E_k を PCI バス上に配置された FPGA 上で実現し、CPU から渡された状態変数データを元に力を計算する。Fig.3 に三要素レオロジーモデル回路を示す。各モジュールは式(2)(3)(4)(5)ごとに分割している。Fig.4 に Schematic Functions を示す。

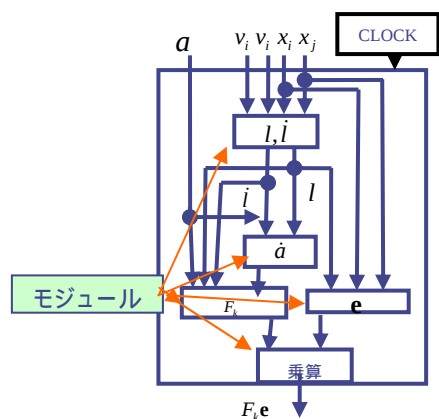


Fig.3 Program for Three element of Rheology model

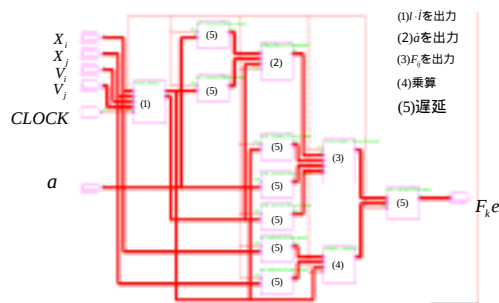


Fig.4 Schematic Functions

7. シミュレーション

Verilog-HDL で設計した三要素レオロジーモデル回路を用いてシミュレーションをおこなう。今回は 1 次元モデル

を使用した。この回路は Verilog - HDL の制約によりすべて固定小数で計算を行っている。今回のシミュレーションでは状態変数すべてを 16 ビット幅にし、上位 8 ビットを整数、下位 8 ビットを小数にしている。また、粘性係数 $C1, C2$ ともに 0.5、ばね係数を 2.5、レオロジー要素の自然長を L とした。出力結果は 16 進数で表現されている。シミュレーション値を $Fe(1)$ 、理論値を $Fe(2)$ とする。Table1 に結果を示す。結果より、シミュレーション値と理論値はほぼ同じ値を示していることが分かる。仮想レオロジー物体のモデリングでは必要以上の精度で挙動を再現するよりも応答性を重視する。よって、この回路を用いて FPGA 上にインプリメントを行う。

Table1 Simulation Result

V_i	1	5	-1	-1	1	0	0	0
V_j	0	0	0	0	0	5	-5	-1
X_i	1	5	-1	-5	-5	0	5	0
X_j	0	0	0	5	5	5	0	-1
a	1	1	1	1	1	5	-5	-1
Fe	07C0	0DC0	04C0	F984	FA01	E5C0	E840	540
$Fe(1)$	7.75	13.75	4.75	-6.484375	-5.99609375	-26.25	-23.75	5.25
$Fe(2)$	7.75	13.75	4.75	-6.5	-6	-26.25	-23.75	5.25

8. FPGA 実装

設計した三要素レオロジーモデル回路を Foundation ISE で論理合成した後、インプリメントを行った。結果として、スライスを 3900 個使用していることが分かった。1 つのスライスには Flip Flop と LUT がそれぞれ 2 個含まれている。Flip Flop は 4653 個使用されており、4 入力 LUT は 4314 個使用されている。Flip Flop と LUT の使用数だけ見ると Spartan-II に収まるが、タイミング制約や配置制約により多くのスライスを必要としていることにより、オーバーリソースとなった。

9. おわりに

格子点に作用する合力を並列に計算することにより、仮想レオロジー物体の変形を並列に計算する手法を示した。1 次元の三要素レオロジーモデル回路をシミュレーションし、ある程度の誤差を許容することによりこの回路でインプリメントすることを決定した。今後は、回路規模を縮小し実際に FPGA 上にダウンロードを行う。また、PCI バスと FPGA の連動を図ることにより、仮想レオロジー変形計算システムの構築を目指す。

参考文献

- 1) 徳本真一, 平井慎一, 形状制御のためのレオロジー物体の変形モデリング, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8, pp.87-94, 2001
- 2) 平井慎一, 徳本真一, 仮想レオロジー物体における変形計算, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, pp.295-296, 2001