

仮想レオロジー物体のモデリングおよび FPGA による実時間変形計算

Modeling of virtual rheological objects and realtime computation of their deformation on FPGA

学 友國誠至 (立命館大) 学 木村政文 (立命館大)
学 杉山勇太 (立命館大) 正 平井慎一 (立命館大)

Seiji TOMOKUNI, Ritsumeikan University, Nojihigashi1-1-1, Kusatushi, Shiga
Masafumi KIMURA, Ritsumeikan University, Yuuta SUGIYAMA, Ritsumeikan University,
Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

This paper describes the realtime computation for the deformation of virtual rheological objects on FPGA. Displaying tactile sensation requires to compute the deformation in high frequency. We will implement realtime computation of the deformation of large scale objects on an FPGA suitable for parallel computing. First, we will describe the simplified dynamic equations for computing the deformation of rheology objects. Second, we will outline the calculation of object deformation on an FPGA and will evaluate the performance of the calculation. Finally, we will discuss data transfer between a PC and an FPGA and will propose a better design for the realtime computation of the rheological deformation.

Key Words: Virtual Rheology, Deformation, Parallel Computing, FPGA

1 はじめに

近年, 力覚提示の分野における VR の進歩が目覚ましい. しかし仮想物体の対話操作において視覚提示が 30~60Hz 程度の時間分解能で行なわれるのに対し, 力覚提示を安定に行なうためには柔軟物において数 10~数 100Hz 程度の時間分解能が必要であり, その実現のためには仮想物体の変形計算を高速に行なう必要がある.

一方, ハードウェアの分野では FPGA と呼ばれる, 回路を書き換えることが可能な LSI が登場し, 年々回路規模を増している. この FPGA を用いて演算回路を設計することによって並列性の高いアルゴリズムを高速に計算することが可能である. 本報告では FPGA を用いた仮想レオロジー物体の実時間計算に関する報告を行なう.

2 レオロジー物体のモデル

レオロジー物体とは, 食品や生体組織, 粘土などに代表される柔軟物であり, 粘弾性物体と塑性物体の中間的な性質を示す物体である. レオロジー的性質を表現する一次元モデルとして Fig.1 に示す三要素モデルを用いる [1].

三要素モデルの長さおよび三要素モデルのフォークト部の長さをそれぞれ l , l_{voigt} とし, フォークト部の粘性係数および弾性係数を k_1, c_1 , ダンパ部の粘性係数を c_2 とする.

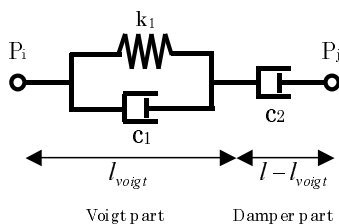


Fig. 1: Three element model

定数 $A = \left(\frac{-k_1}{c_1 + c_2} \right)$, 定数 $B = \left(\frac{-c_2}{c_1 + c_2} \right)$ において計算式の簡略化を行なうと, フォークト部の比率の変化および三要素モデルの発生する力は (1) 式および (2) 式で表される.

$$\dot{l}_{voigt} = A(l_{voigt} - L) + B\dot{l} \quad (1)$$

$$f = -c_2(\dot{l} - \dot{l}_{voigt}) \quad (2)$$

三要素モデルの両端には質点 P_i, P_j が繋がっており, 物体の変形は三要素モデルが発生する力による各質点の運動方程式に基づいて計算する. 物体は三角形要素あるいは四面体要素を組み合わせて表現し, 各要素の頂点に質点を配し, 頂点間を結ぶ稜線を三要素モデルとする.

3 三要素モデル計算回路の概要

本研究では完全並列ではなく, パイプライン処理を行なう回路を数個並列に動作させることで変形計算を行なう. 三要素モデルパイプライン処理回路の概要を Fig.2 に示す.

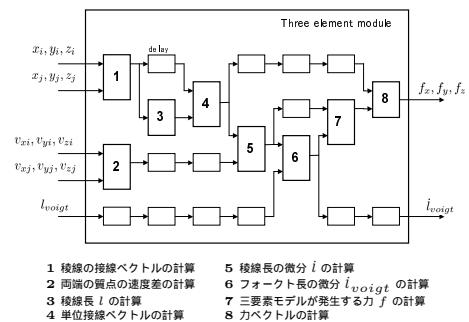


Fig. 2: Schematic computation module

本研究では FPGA として Xilinx 社の Virtex シリーズを対象とし, 開発言語として VerilogHDL を用いる. 三要素モデル計算回路は PCI バスによる PC との接続を想定する. 回路は PCI バスのクロックと同期し, 33MHz, 66MHz, 133MHz のいずれかの周波数で動作する. ここで回路の動作周波数と, 回

路規模およびレイテンシ (必要クロック数) はトレードオフの関係にある。設計した回路の配置配線および論理合成で得られた、動作周波数と回路規模およびレイテンシ、VirtexE シリーズの XCV2000E における回路使用率を Table1 に示す。

Table 1: Performance of module

動作周波数 [MHz]	77	125
レイテンシ	71	89
回路規模 [slices]	3259	3334
XCV2000E における回路使用率 [%]	16	17

4 三要素モデル計算回路の評価

ModelSim を用いて論理シミュレーションを行った。定数 k_1, c_1, c_2 はそれぞれ 0.5, 0.5, 2.3 とし, Table2 に示すデータを入力した。計算結果と理論値の比較を Table3 に示す。回路内では 16bit の固定小数点を用いているため出力結果と理論値との間に誤差が生じている。しかし、本研究ではリアリティよりも高速性を重視しているのでこれは許容できるものとする。

Table 2: Input data

x_i	y_i	z_i	v_{xi}	v_{yi}	v_{zi}	x_j	y_j	z_j	v_{xj}	v_{yj}	v_{zj}	l_{voigt}
1	2	3	4	5	6	6	5	4	3	2	1	7

Table 3: Error between result and theoretical value

	理論値	結果	絶対誤差	相対誤差 [%]
f_x	-1.3015	-1.3203	0.0188	1.4276
f_y	-0.7809	-0.7930	0.0121	1.5247
f_z	-0.2603	-0.2656	0.0053	2.0075
\dot{l}_{voigt}	-3.8811	-3.8750	0.0061	0.1578

5 処理速度および実現可能な物体規模の試算

三要素モデルの計算以外の処理を全て PC 側で行った場合について、理論値による PCI バス転送時間も含む処理時間を試算したところ、PC と比較してほとんど高速化していないことが分かった。これは PCI バスの転送速度がボトルネックとなっているためである。しかし、運動方程式、ルンゲクッタ回路および質点・稜線データを格納するメモリを FPGA 側に実装することで、計算ループ毎に質点・稜線のデータを PCI バスで転送する必要がなくなりこのボトルネックが解消されることが考えられる。VirtexII シリーズの XC2V6000 で試算した場合、FPGA 内部の RAM には、格子数 $10 \times 10 \times 10$ (質点数 1331, 稜線数 6930) の仮想レオロジー物体のデータが格納可能であり、その物体に対して一つの計算回路を 66MHz で動作させた場合の時間分解能を試算すると 1176Hz となる。AthlonXP 2400+ を搭載した PC で処理時間を測定したところ、1000Hz の時間分解能で計算できる物体の規模は $4 \times 4 \times 5$ (質点数 150, 稜線数 661) であった。1000Hz の時間分解能での変形計算を対象とした場合、計算回路の FPGA 化により 10.5 倍の稜線数を持つ物体が扱えるようになると試算される。

6 位相問題

一次元要素のトラス構造によるモデルでは、大変形の際に位相が崩れ、三角形や四面体などが反転することがある。その場合、元の形状に戻ろうとする復元力が逆向きとなるため、三角形や四面体が反転したままとなり、変形シミュレーションに不具合が生じる。この問題を解決するための位相保持の手法はいくつか存在する。我々のグループでは、質点と辺を繋ぐフォークトモデルによる位相保持アルゴリズムを PC 上に実装した [2]。またトラス構造でないモデルとして、三要素モデルを用いた局所形状保持 [3] によるレオロジー物体および、離散要素モデルによる仮想物体の PC 上でのシミュレーションを行っている。シミュレーション例をそれぞれ、Fig.3, Fig.4 に示す。

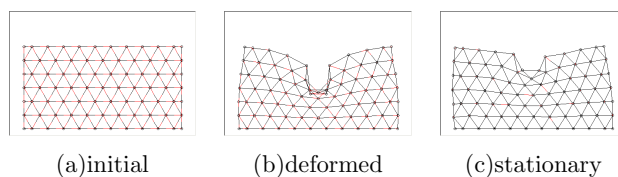


Fig. 3: Local shape maintaining model

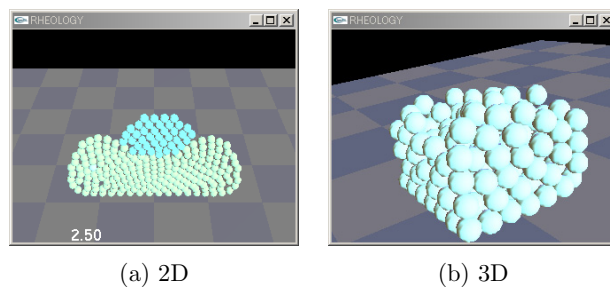


Fig. 4: Discrete element model

7 おわりに

本報告において三要素モデル計算回路のシミュレーションおよび計算速度・回路規模の試算を行い、FPGA による仮想物体の変形計算の高速化の可能性を示した。実機での動作については現在、小規模な FPGA における限定的なフォークトモデルの計算と PCI バスを用いたデータの送受信に成功しており、今後は大規模な FPGA 上への回路の実装および、実機によるリアルタイム変形計算を目指す。また、FPGA 上への位相保持アルゴリズムの実装可能性について検討する。

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] 木村政文, 杉山勇太, 友國誠至, 平井慎一, "仮想レオロジー物体の変形シミュレーション", 日本バーチャルリアリティ学会第7回論文集, pp183-186, 2002.
- [3] 宮崎慎也, 吉田俊介, 安田孝美, 横井茂樹, "局所形状保持に基づく仮想弾性物体モデルの提案", 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J82-A, No.7, pp.1148-1155, 1999.