論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 （ 池田 圭 ）	
論文題名	アクセラレータを用いたヒストグラム生成の高速化に関する研究

論文内容の要旨

ヒストグラム生成は医用画像処理，ネットワーク符号化および画像認識などのアプリケーションで広く用いられる重要な処理の一つである．一般に，ヒストグラム生成はメモリ集約型の処理であるため，高速化が求められる．そこで，近年はGPU (Graphics Processing Unit) やXeon Phiなどの高いメモリ性能を持つアクセラレータを用いて，ヒストグラム生成を高速化する研究が盛んである．これらのアクセラレータはメニーコアプロセッサを搭載し，多数のスレッドを同時実行することによりヒストグラム生成を並列処理する．

ヒストグラム生成の並列処理では，メモリ上のヒストグラムを更新するためにアトミック演算が必要である．しかし，スレッド間でアトミック演算による書き込み先が競合すると，一連の書き込みが逐次化され，実行効率が低下する．多数のスレッドを同時実行するアクセラレータでは，多数の競合が発生する可能性があるため，高速化を達成するためには，効率的な競合の削減が不可欠である．そこで，本研究では，メニーコアプロセッサを搭載するアクセラレータを用いたヒストグラム生成の高速化を目的として，(1) 特定のアクセラレータ向けに特化したヒストグラム生成の高速化および (2) アクセラレータを含む複数の計算環境におけるヒストグラム生成の高速化に取り組む．

本研究では，まず (1) 特定のアクセラレータ向けに特化したヒストグラム生成の高速化に取り組む．ここでは特に，CUDA (Compute Unified Device Architecture) を用いて，正規化相互情報量に基づく非剛体位置合わせを高速化する．この位置合わせでは微分計算および類似度計算のために，ヒストグラムを繰り返し生成するため，その高速化が必要である．一般に，CUDAを用いたヒストグラム生成の高速化では，GPUが持つ小容量かつ低レイテンシなオンチップメモリを活用した競合の削減が重要である．しかし，位置合わせにおいて生成するヒストグラムのサイズは，オンチップメモリの容量を上回っているため，その活用がむずかしい．そこで，提案手法は，位置合わせにおけるヒストグラム生成では更新領域に局所性があることを利用し，ヒストグラムのデータサイズを削減する．これにより，小容量のオンチップメモリを活用したヒストグラム生成を可能にした．さらに，高レイテンシなオフチップメモリの参照量を最小限に抑える工夫により，ヒストグラム生成を高速化した．実験では，512×512×296ボクセルの腹部X線CT画像を用いた肝臓の位置合わせにより，提案手法を評価した．結果として，位置合わせ全体では既存手法と比較して5倍以上の速度向上を得た．また，微分計算および類似度計算における結合ヒストグラム生成の実効メモリ帯域幅は，実験に用いたGPUのピークメモリ帯域幅の88%および46%に達した．したがって，提案手法により高い実行効率でヒストグラムを生成できた．

次に (2) アクセラレータを含む複数の計算環境におけるヒストグラム生成の高速化に取り組む．ここでは特に，OpenACC (Open ACCelaretor) を用いて記述したコードの性能可搬性を高める．アクセラレータを用いたヒストグラム生成において広く用いられる競合削減手法を，ヒストグラム生成のOpenACCコードに適用するためには，OpenACCディレクティブのみならず逐次コード部分の構造を書き換える必要がある．しかし，この書き換えにより，アクセラレータ以外の計算環境においてコードの実行性能が低下する可能性がある．すなわち，アクセラレータにおいて高い実行性能を得るための書き換えが，コードの性能可搬性を低下させる可能性がある．そこで，本研究ではヒストグラム生成を含むOpenACCコードに，競合削減手法を自動適用するオプティマイザを開発した．オプティマイザは与えられたコードからヒストグラム生成部分を抽出し，コードを自動的に書き換える．これにより，プログラマは計算環境ごとの性能最適化のために，コードを手動で書き換える必要がなく，オプティマイザを使用するか否かを選択するだけでよい．評価実験では，アクセラレータを含む複数の計算環境を用いて，4種類のアプリケーションの実行性能を計測した．結果として，オプティマイザの使用により，コードを手動で書き換えることなく各計算環境において高い実行性能を得られた．すなわち，ヒストグラム生成を含むコードの性能可搬性を高めることができた．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名（　池田　圭　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	萩原　兼一
	副 査　教授	増澤　利光
	副 査　教授	松田　秀雄
	副 査　准教授	伊野　文彦

論文審査の結果の要旨

本研究は、メニーコアプロセッサを搭載するアクセラレータを用いたヒストグラム生成の高速化に関するものである。ヒストグラム生成はメモリ集約型の処理であり、多くのアプリケーションの性能ボトルネックとなっている。また、そのスループットは計算環境のメモリ性能により決まる。そのため、CPUよりも高いメモリ帯域幅を持つアクセラレータを用いた高速化が効果的である。しかし、ヒストグラム生成におけるメモリ参照パターンは一般に不規則であるため、アクセラレータの性能を最大限に活用するためには工夫が必要である。本研究は、ヒストグラム生成の高速化を目的として、（1）特定のアクセラレータ向けに特化した高速化および（2）アクセラレータを含む複数の計算環境における高速化に取り組んでいる。

まず（1）では、アクセラレータとしてNVIDIA社のGPU（Graphics Processing Unit）を用いて、正規化相互情報量に基づく非剛体位置合わせを高速化する。正規化相互情報量に基づく非剛体位置合わせでは、ヒストグラム生成が性能ボトルネックである。この場合の課題は、生成するヒストグラムのサイズがGPUの持つ高速なオンチップメモリの容量を上回っているため、ヒストグラム生成にオンチップメモリを活用することが難しいことである。そこで、位置合わせにおけるヒストグラム生成に、更新領域の局所性があることに着目し、ヒストグラムのデータ構造を再構成する。これにより、ヒストグラムのデータサイズを削減し、オンチップメモリを活用したヒストグラム生成を可能にする。さらに、比較的低速なオフチップメモリの参照量を最小限に抑える工夫により、ヒストグラム生成を高速化する。実験では、512×512×296ボクセルの腹部X線CT画像を用いた肝臓の位置合わせにより、提案手法を評価した。結果として、位置合わせ全体では既存手法と比較して5倍以上の速度向上を得た。また、ヒストグラム生成の実効メモリ帯域幅は、実験に用いたGPUのピークメモリ帯域幅の88%に達した。

つぎに（2）では、アクセラレータ向けのプログラミング言語であるOpenACC（Open ACCelerator）を用いて記述したヒストグラム生成コードの性能可搬性を高める。アクセラレータを用いたヒストグラム生成において広く用いられる高速化手法であるヒストグラムの複製手法を、ヒストグラム生成を含むOpenACCコードに適用するためには、OpenACCディレクティブのみならず逐次コード部分を書き換える必要がある。この書き換えにより、アクセラレータ以外の計算環境においてコードの実行性能が低下する可能性がある。すなわち、アクセラレータにおいて高い実行性能を得るための書き換えが、コードの性能可搬性を低下させる可能性がある。そこで、ヒストグラム生成を含むOpenACCコードに、複製手法を自動適用するオプティマイザを開発する。オプティマイザは与えられたコードからヒストグラム生成部分を抽出し、コードを自動的に書き換える。これにより、プログラマは計算環境ごとの性能最適化のために、コードを手動で書き換える必要がなく、オプティマイザを使用するか否かを選択するだけでよい。評価実験では、アクセラレータを含む複数の計算環境を用いて、4種類のアプリケーションの実行性能を計測した。結果として、オプティマイザの使用により、コードを手動で書き換えることなく各計算環境において高い実行性能を得られた。すなわち、ヒストグラム生成を含むコードの性能可搬性を高めることができた。

これらの研究成果は、並列処理分野において有用なものであり、汎用性を持つものである。よって、博士（情報科学）の学位論文として価値のあるものと認める。