

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	菅野 裕揮
論文題目	マルチコアプロセッサを用いた実時間物体認識システムに関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>近年様々な機器において、高精度な物体認識処理が必要とされつつあり、さらに実時間での処理を実現する試みがなされている。一般に、高精度な物体認識処理ほど多くの計算量を要するため、単一プロセッサ上でのソフトウェアによる実装では、しばしば処理時間や消費電力等の制約下で十分な性能を得ることが困難となっている。そのためマルチコアプロセッサや専用ハードウェアによる物体認識処理の高速化が強く求められている。</p> <p>本研究の目的は、単一プロセッサシステムでは不可能であった実時間での高精度な物体認識システムの構築に向けて、マルチコアプロセッサの性能を引き出すための物体認識システムの実装手法、および物体認識システムを効率よく実装するためのマルチコアプロセッサアーキテクチャの要件を明らかにすることである。</p> <p>本研究ではまず、マルチコアプロセッサの 1 つである Cell Broadband Engine (Cell/B.E.) への並列実装を検討した。Cell/B.E. における各プロセッサコアはキャッシュを持たず、DMA 転送命令をユーザプログラム中で明示的に発行することでメモリにアクセスする。物体認識処理の典型的なメモリアクセスパターンを検討するため、画像処理ライブラリの 1 つである OpenCV の関数群を Cell/B.E. 向けに再実装し、性能を評価した。元画像に縮小処理を施すことでメモリアクセスの局所性を高められることを利用して、DMA 転送命令と算術演算命令の並列発行を可能とし、メモリアクセス時間を隠蔽する手法を提案した。</p> <p>次に、上記ライブラリを用いて物体認識処理を実装することで、並列化に適する物体認識アルゴリズムの検討を行った。一般に物体認識処理は、画像中から対象物体を検出する処理と、検出された対象を複数フレームにわたって追跡する処理から構成される。Haar-like 特徴を用いた物体検出手法とカラーヒストグラムを用いたパーティクルフィルタに基づく物体追跡手法を実装し実行時間を分析することで、処理ごとのアーキテクチャ適性を明らかにした。検出処理のように、入力画像を順次走査する処理では、将来アクセスされるメモリアドレスとデータ量をあらかじめ決定できるため、DMA 転送命令を投機的に発行することでメモリアクセスとデータ処理の並列性を高めることが出来る。一方、追跡処理のように、フレーム毎に参照アドレスやデータ量が動的に変化する処理では、DMA 転送命令の投機発行が難しく、Cell/B.E. の持つ並列性を十分には活用できないことが分かった。Graphics Processing Unit (GPU) はキャッシュを持っているため、こうした不規則なメモリ参照を効率よく実行できると考えられる。また GPU は、組込み向け等の小規模な構成から数百のコアを集積する大規模な構成まで広範なスケラビリティを持つことから、大規模構成ではより高い性能を実現できる可能性がある。そこで次に、物体検出処理と追跡処理の GPU 向け並列実装について検討した。</p>			

物体検出処理については、CoHOG アルゴリズムによる物体検出手法に着目した。CoHOG は歩行者検出手法の中で現在最も精度が高い手法であるが、計算量が非常に多く、最新のプロセッサでもその実時間処理は困難である。本研究では、GPU が局所的なメモリアクセスを最適化できる点に着目した。CoHOG の並列化可能性を 3 通り指摘し、これらを実際にも実装評価することで、ピクセル毎の細粒度の並列化が、メモリアクセスを局所化でき、GPU の構成に最も良く適合することを明らかにした。本方式による GPU 実装は、最新のプロセッサでの実装と比較して 76 倍高速であり、QVGA 画像の検出処理を最大 16.5 fps で処理できる。本実装による GPU の計算資源使用率は 62.5% であり、本質的に避けられないキャッシュミスのペナルティを考慮すると、ほぼ最大限に計算機資源を活用できていることを確認した。

物体追跡においては、パーティクルフィルタを基に、物体の色と形情報を組み合わせることで追跡精度をさらに向上させる手法を提案した。それぞれの情報を相補的に用いることで、色情報のみを用いる既存手法では追跡に失敗するシーンにおいても、正確に歩行者を追跡可能とした。本提案手法をパーティクル毎に GPU に並列実装することで、単一プロセッサでは 8.2fps であった追跡処理を最大 72.6 fps で処理可能とした。本実装では、GPU のキャッシュを活用してパーティクルフィルタにおける不規則なメモリアクセスを隠蔽することで、大幅な高速化を実現した。

メモリアクセス手段が DMA 転送のみの Cell/B. E. では並列性を高めることが困難な追跡処理を、GPU 実装ではキャッシュメモリにより高速化できた。しかし、GPU は DMA 転送命令を持たないため、物体検出処理時の順次走査によるメモリアクセスの際に、キャッシュミスによる性能の低下が避けられなかった。現在の GPU のアーキテクチャに DMA 転送命令に類する機構、例えばキャッシュの明示的なプリフェッチ機能を追加することで、物体検出処理でのキャッシュミスを低減し、物体認識処理をさらに 1.6 倍高速化できることを示した。

本研究では、マルチコアプロセッサの使用とデータ構造の工夫によるメモリアクセスの最適化により、単一プロセッサシステムに対し物体検出処理では 76 倍、物体追跡処理では 8 倍以上高速な物体認識システムを実現した。本システムを利用することで、例えば QVGA 画像、15fps の一般的な監視カメラにおいて、十分な処理速度と認識精度での物体認識が実現可能となった。さらに処理速度を向上させるには、キャッシュと DMA 転送の両方の機能を備えたマルチコアプロセッサが有効である。

(続紙 2)

本論文は「マルチコアプロセッサを用いた実時間物体認識システムに関する研究」と題し、8章から構成されている。車載や監視カメラ等、民生機器に組込んで使用する物体認識処理を例題として、マルチコアプロセッサシステム上での実時間画像処理を実現するための実装手法、および画像処理に適するマルチコアプロセッサのアーキテクチャについて論じている。

第1章では、物体認識処理システムに求められる性能、およびマルチコアプロセッサ上でこれを実現することの必要性を簡潔にまとめている。続いて第2章では、物体認識処理を物体検出と追跡処理に分類し、それぞれ最新のアルゴリズムを整理しまとめている。第3章では、本論文において実装例として用いる二つのマルチコアプロセッサ Cell Broadband Engine (Cell/B.E.) と Graphics Processing Unit (GPU) のアーキテクチャについて説明している。

第4章では、画像処理ライブラリ OpenCV の Cell/B.E. に対する並列実装を通じ、キャッシュ機構を持たないアーキテクチャ上においてメモリアクセス時間を効果的に隠蔽できる方式を提案している。第5章では、前章で作成した並列ライブラリを用いて、Cell/B.E. を搭載する機器上での物体認識システムを構成している。本システムの処理時間分析により、並列性を更に高めて性能を向上するには、例えば、データの参照局所性を有効に活用し、また語境界に依存しないロード・ストア機構が必要であること、を指摘している。

第6章では、上記参照局所性の活用と語境界への非依存性を実現している GPU に着目して、高精度な物体検出アルゴリズムの並列実装を行ない、高い検出精度と実時間性を実現している。第7章では、色情報のみに基づく既存の物体追跡手法を改良して、色情報と形状情報とを相補的に用いる手法を提案し、物体追跡精度を高めた。さらに提案手法を GPU 向けに並列実装して、実時間処理を実現している。こうした最新の物体認識処理は、データに対する順次アクセスとランダムアクセスの双方を含む。このため、画像処理向けのマルチコアプロセッサでは、いずれのアクセスも高速に処理するハードウェア機構を備えることが有効である、との知見を得ている。

本論文により得られた成果と今後の展望は、第8章にまとめられている。

本論文では、画像処理における広く応用可能な性能向上手法を提案し、具体的なアーキテクチャに実時間物体認識システムを実現することにより提案手法を実証している。さらに、実装時に得た知見から、画像処理に適するマルチコアプロセッサのアーキテクチャを提案している。実時間物体認識システムの多様な機器への展開を可能とし、また効率の良いマルチコアプロセッサの発展に大きく寄与するものであり、情報学の発展に資するところが少なくない。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年2月23日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。