

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500034

研究課題名（和文）高位合成向け非メモリアクセス領域抽出

研究課題名（英文）Extracting The Regions with No Memory Access
for High-level Synthesis

研究代表者

滝本 宗宏（TAKIMOTO MUNEHIRO）

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：00318205

研究成果の概要（和文）：

主メモリへのアクセスを低減する手法として、同じ配列を参照するロード命令を連続するように集約し、キャッシュのヒット率を向上させる手法と、プログラム全体からループの繰返しを含めた配列アクセスをレジスタに置き換える大域スカラ置換を実現した。これらの手法を実現する上で必要な解析を効率的に行える、大域値番号付けを用いた要求駆動型部分冗長除去法を実現し、さらに、この要求駆動型の考え方を部分無用コード除去に応用した、要求駆動型部分無用コード除去法を実現した。

研究成果の概要（英文）：

In order to decrease the number of memory accesses, we have implemented a technique aggregating array references in continuous for improving cache-efficiency, and a technique applying the scalar replacement, which replaces array references with register references over some iterations of a loop, to an entire program. Also, in order to improve the efficiency of these techniques, we have developed the demand-driven partial redundancy elimination based on the global value numbering, and then have developed the demand-driven partial dead code elimination applying the demand-driven property to the partial dead code elimination.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			0
年度			0
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：コンパイラ，高位合成，コード最適化，静的単一代入形式，網羅型データフロー解析，要求駆動型データフロー解析，キャッシュ効率化，大域値番号付け

1. 研究開始当初の背景

システム・オン・チップの進歩によって、振舞い記述からハードウェアを自動的に合成する**高位合成 (high-level synthesis)** が注目されている。当該研究代表者は、科研費基盤研究(C)において、並列化アプローチに基づく**高位合成器をコンパイラ共通基盤 COINS** に組み込む研究を行ってきたが、本処理系は、従来の同種の多くの研究と同じく**メモリアクセスを生じない関数**に適用することを仮定していた。しかしながら、関数のインライン展開や別名解析に基づく変数のレジスタ化を進めても、多くの関数は、メモリアクセスを取り除くことができないことが分かってきた。そこで、本研究では、メモリアクセスを生じない領域（以降、**非メモリアクセス領域**と呼ぶ）をより拡張した上で関数として抽出し、その関数の内側と外側で階層型の命令スケジューリングを実現することを目指す。本研究は、現在の共通基盤を次の点で拡張する。

(1) load 命令と store 命令の移動

冗長な load 命令と store 命令を除去する手法に、load 命令をプログラムの実行と逆向き（以降、後向きと呼ぶ）に移動し、store 命令をプログラムの実行の方向（以降、前向きと呼ぶ）に移動する方法がある。この手法は、非メモリアクセス領域を拡張する効果がある。本研究では、冗長性の除去と移動を同時に行うことができる**部分冗長除去 (partial redundancy elimination, 以降 PRE と呼ぶ)** と、逆向きの PRE を用いる。PRE を応用すると命令スケジューリングも実現できることから、非メモリアクセス領域の拡張と

同時に命令スケジューリングを行えるようにする。最終的には、プログラム全体を解析しなければならない PRE を要求駆動型のアルゴリズムにすることによって、効率的な解析を実現するとともに、**投機的な移動**を扱えるようにすることで、さらに広い非メモリアクセス領域を実現する。

(2) プログラムスライシングに基づくプログラム片抽出

(1)で得られた結果を基に、各 store 命令ごとに load 命令に到達するまでのプログラムスライス計算する。さらにスライスのうち、入口が1つで出口も1つ（single entry single exit, 以降 **SESE** と呼ぶ）の最大領域を抽出する。この際、1つの関数として抽出することにする。

(3) 抽出関数の命令スケジューリング

抽出した関数は、**副作用をもたない**ので、他の命令と同様にスケジューリングすることができる。このとき、**クローンコード**の解析を行うと、抽出関数同士の冗長性が見つけられる可能性があり、PRE に基づく命令スケジューリングの再適用が有効である可能性がある。

(4) 高位合成

抽出関数ごとに高位合成を行う。他のプログラムは、汎用プロセッサで実行するために、抽出関数の呼出し点で、合成回路に必要なデータを転送し、その結果を得るようにコード生成を行う。

2. 研究の目的

当該研究代表者は、現在、関数単位で適用する**高位合成共通基盤**を開発している。本研究では、本共通基盤を、**より小さいプログラム片**に適用できるように拡張する。高位合成には、メモリアクセスを生じない関数について適用する手法が多いが、様々な変換を用いても、メモリアクセスを生じない関数を多く生じることは難しいことが分かってきた。本研究では、次のような拡張を行う。

- 1) 関数内で、**load 命令**と **store 命令**を移動し、メモリアクセスを生じない領域を拡張する。
- 2) **プログラムスライシング**を用いて、依存ごとに関連する命令群を抽出し、関数化する。
- 3) 抽出関数内と、その関数を1命令とみなした関数外との**階層型命令スケジューリング**を行う。

3. 研究の方法

基本的な流れは次のとおりである。

- 1) 文献調査：投機的な **PRE**、**SESE** 領域、プログラムスライシングを用いたマルチスレッド実行についての文献を調査する。
- 2) 要求駆動型 **PRE**に基づく **load/store** 命令の移動を実現する。
- 3) プログラムスライシングに基づいて計算した非アクセス領域を関数として抽出する。
- 4) 抽出した関数の要求駆動型 **PRE** による命令スケジューリングを実現する。
- 5) ループについての投機的移動と、プロファイリングに基づく投機的移動を実現して、非メモリアクセス領域の拡張を行う。
- 6) 時間に余裕があれば、クローンコード解析を実現して、抽出関数の冗長性を扱う。
- 7) 成果の発表を行う。

4. 研究成果

(1) 大域値番号付けに基づく要求駆動型部分冗長除去法

PRE は、その適用によって、部分冗長な式を除去するだけでなく、字面からは分からなかった部分冗長な式を明らかにする副次的効果をもっている。この **PRE** の適用によって生じる副次的効果を反映させるためには、**PRE** の複数回の適用が必要である。しかしながら、**PRE** は、プログラム全体を解析する網羅型データフロー解析に基づいているので、**PRE** の複数回適用は、コストが高いことが問題であった。

解析コストを抑えながら副次的効果を反

映する手法の一つに、滝本らが提案した要求駆動型データフロー解析を用いて解析範囲を限定した要求駆動型 **PRE** がある。要求駆動型 **PRE** を要求駆動型コピー伝播とともに、開始点に近いものから順に、各式に適用することによって、多くの副次的効果を反映させることができる。しかしながら、要求駆動型のコピー伝播は、変数の生存期間を伸長する傾向があり、レジスタ圧力を高めるので、レジスタスピルを生じさせる可能性があった。

本手法は、演算子とオペランドの変数という式の字面で冗長な式を検査する代わりに、演算子とオペランドの値番号によって式を検査するので、コピー伝播による字面の変形を行うことなく副次的効果を反映することができる。

本手法を **COINS** の最適化器として実現し、ベンチマークプログラムに適用して効果を調べたところ、従来の副次的効果を反映させる手法よりも、目的コードの実行効率を向上させることに成功した。現在、本手法を用いて、ループの繰返し間で同じ値を保持する配列参照を同じレジスタで置き換えるスカラ置換の実現を進めている。本手法によって、任意の制御構造をもつループを含め、プログラム全体に対して、スカラ置換が実現できる。

(4) 要求駆動型部分無用コード除去法

部分無用コード除去 (**PDE**) は、実行経路によっては無用であるが、その他の経路では無用でない代入文を除去する手法である。**PDE** は、その適用の結果として、**PRE** の場合とよく似た副次的効果を生じる可能性がある。そのため、**PDE** の繰返し適用が効果的であるが、**PRE** の場合と同様に網羅型データフロー解析に基づいた解析法を用いているので、解析コストが高いという問題があった。

本手法は、**PDE** を要求駆動型データフロー解析によって実現し、終了点に近い代入文から順に適用することによって、解析コストを抑えながら、多くの副次的効果を反映させる。

本手法を **COINS** 上に実現し、ベンチマークプログラムに適用したところ、**PDE** を1回適用する解析コストで、多くの副次的効果を反映させることができることを確認した。

(5) ロード命令集約によるキャッシュヒット率向上手法

現在の多くのコンピュータは、高速な CPU

と低速な主メモリによって構成されており、プログラムの実行中に主メモリにアクセスするロード命令が実行されると、プログラムの実行効率が低減される可能性がある。そこで、多くのCPUには、キャッシュメモリが備えられており、ロード命令を実行する際は、まず、キャッシュメモリにアクセスアドレスの値が保持されていないかチェックする。一旦、主メモリへのアクセスが生じると、アクセス箇所の近傍の値がキャッシュメモリにコピーされる。次にロード命令が実行される際に、キャッシュメモリにアクセスアドレスの値が見つかりキャッシュがヒットすれば、ロード命令は、主メモリにアクセスすることなく効率的に実行できる。一方、キャッシュにアクセスアドレスの値が見つからずキャッシュミスすれば、主メモリへのアクセスが生じ、実行が非効率になる。

本手法は、同じ配列にアクセスするロード命令が連続して実行されるように集約することで、キャッシュのヒット率を向上させる。このロード命令の集約は、PRE の同じ値を生成する式を解析する過程を、同じ配列にアクセスするロード命令を解析するように置き換えることで実現する。本手法は、Lazy Code Motion のアルゴリズムを採用しているので、集約が可能でなければ、プログラムの変形は行わない。また、集約が可能であった場合でも、不要な巻上げを避ける効果がある。

本手法を COINS の最適化器として実現し、ベンチマークプログラムに適用して効果を調べたところ、キャッシュのヒット率を向上できることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 澄川靖信, 滝本宗宏: 効率的な要求駆動型部分冗長除去, 情報処理学会論文誌: プログラミング, 掲載予定, (2013年), 査読有り
- ② 澄川靖信, 滝本宗宏: 配列の次元を考慮した大域ロード命令集約, 信学技報, 電子情報通信学会, Vol. 112, No. 164, SS2012-29, pp. 115-119, (2012年7月), 査読無し
- ③ Takimoto, M.: Demand-driven Partial Dead Code Elimination, IPSJ Transactions on Programming Vol. 5, No. 1, pp. 9-16, (Mar. 2012). 査読有り

[国際会議プロシーディングス] (計1件)

- ① Sumikawa, Y. and Takimoto, M.: Global Load Instruction Aggregation Based on Code Motion, Proc. of IEEE International

Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming, PAAP' 12, IEEE Computer Society, pp. 149-156, (Dec. 2012). 査読有り

[学会発表] (計4件)

- ① 澄川靖信, 滝本宗宏: スピルコストを考慮した部分冗長除去, 情報処理学会第75回全国大会講演論文集, 情報処理学会, Vol. 2013, No. 1, pp. 345-346, (2013年3月8日) 仙台.
- ② 澄川靖信, 滝本宗宏: 質問伝播に基づく大域ロード命令集約, 第54回プログラミングシンポジウム, 情報処理学会, pp. 19-26, (2013年1月11日), 強羅.
- ③ 澄川靖信, 滝本宗宏: 効率的な要求駆動型部分冗長除去, 情報処理学会第74回全国大会講演論文集, 情報処理学会, Vol. 2012, No. 1, pp. 427-429, (2012年3月6日), 名古屋.
- ④ 澄川靖信, 滝本宗宏: コード移動に基づく大域ロード命令集約, 日本ソフトウェア科学会第28回大会講演論文集, 日本ソフトウェア科学会 (2011年9月29日), 那覇.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

滝本 宗宏 (TAKIMOTO MUNEHIRO)
東京理科大学・理工学部・准教授
研究者番号: 00318205