

データフローグラフに基づく 部分的冗長計算除去の拡張

6 G-1

滝本宗宏 原田賢一
慶應義塾大学理工学部

1 はじめに

冗長計算の除去は、コード最適化において重要な課題であり、ループの内部からの冗長計算の除去は実行時の計算量の軽減に大きく貢献する。冗長計算の除去だけでなく、除去できないものでも、より計算量の少なくなる場所に計算を移動する手法として、MorelとRenvoiseの部分的冗長計算(partial redundant computation)の除去[MR]がある。この手法はループ外コード移動、共通部分式の除去などを同時に行える強力なものである。

近年、このMorelとRenvoiseの手法を拡張しようとする研究が盛んである。この中で、式が生成する値に注目し、同じ値を生成する式を検出することによって、冗長計算の認識レベルを上げようとする試みがある。

本研究では、フローグラフからデータ依存グラフのみを取り出し、データフローモデルを用いずに、同じ値を生成する定義を粗に結び合わせたデータフローグラフを構築する手法を提案する。この手法を用いることによって過去の同様な研究[RWZ][SKR]よりも強力かつ効率的に最適化を行うことができる。

2 SSA 最小被覆

記号評価(symbolic evaluation)の中に被覆(cover)[RL]という考え方があり、式中のオペランドに対する定義のうち最も初期(支配関係において)の点を源泉(origin)[RL]とよぶことにする。同じ値を計算する式 t_1 と t_2 に関して、もし t_1 の源泉が t_2 の源泉を支配するならば、 t_1 は t_2 を被覆するといひ、 t_1 は t_2 の被覆であるという。この被覆関係のうち支配関係において最小、つまり開始点にもっとも近いものを最小被覆(minimal cover)と呼ぶ。最小被覆には様々なクラス(minimal fixed coverなど)が存在するが、本研究では新たに、静的単一代入グラフに基づくSSA最小被覆を導入する。

2.1 静的単一代入形式(static single assignment form)

本研究の基礎となるデータ構造として、データ依存表現である静的単一代入形式[RWZ][RWZ]を用いる。静的単一代入形式は、各変数の使用される値が唯一の定義から到達するように変数名を付け変えた構造を持つ。最も特徴的な部分は、異なった定義を結び付ける ϕ 関数である。 ϕ 関数は、名前の付け変えによって生じた変数どうしを結び合わせるもので、データが最も初期に合流する基本ブロックにおいて定義される。

本研究は、この静的単一代入形式の定義と使用を辺で結び合わせることによって構成できる静的単一代入グラフ(static single assignment graph)に基づいている。

2.2 SSA 最小被覆(ssa minimal cover)

ある式 e について、そのオペランドを、オペランドの変数を定義している式によって置き換えてできる e' は e を被覆する。これを繰り返して被覆を計算していくと、オペランドが異なったプログラム点から合流してくる点まで被覆を計算することができる。この計算は、式がプログラム点を上昇していく過程と考えると、上昇の限界といふことができる。この点における e の被覆をSSA最小被覆と呼び、この点のことを e のSSA誕生点と呼ぶことにする。プログラム中に存在する式(定義)は静的単一代入グラフにおいて一つの節に対応付けられるのでSSA最小被覆は、 e に当たる静的単一代入グラフ節の最も近い子孫である ϕ 関数のうち、支配関係において、最も開始点から遠いものによって支配されている節によって定義できる。

3 多重被覆と相互被覆リンク

3.1 多重被覆(multi-cover)

SSA最小被覆は、そのSSA誕生点を越えて定義されることはないが、他の被覆の集まりとしてSSA最小被覆を被覆するものを考えることができる。これを多重被覆と呼ぶ。ある定義 v (静的単一代入グラフの節 v に当たる)のSSA最小被覆 $\psi_{SSA}(v)$ において、その誕生点に当たる ϕ 関数への静的単一代入グラフ辺を ϕ 関数の後続節に結び直すことによって容易に計算すること

Extention of Partial Redundance Elimination based on Data Flow Graph

Munehiro Takimoto, Ken'ichi Harada
Keio University

3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223, JAPAN

ができる。 ϕ 関数は定義されるフロー節の先行節から値を引数に持つため、多重被覆がもとのSSA最小被覆と同じ値を持つのは明らかである。

3.2 相互被覆リンク (inter-cover link)

あるSSA最小被覆 $\psi_{SSA}(v)$ とその多重被覆 $\psi_{SSA}(u_i)$ ($\{i | i = 1, \dots, \psi_{SSA}(v)\}$ の誕生点の先行節数) において、 v と各 u_i を結ぶリンクを相互被覆リンクとよぶ。多重被覆はこの相互被覆リンクを利用するとすべての静的単一代入グラフ節の多重被覆をランクの低い方から順に計算することができる (新しく生成された節についても再帰的に多重被覆を計算する)。つまり $\psi_{SSA}(v)$ の多重被覆を計算する際には、 v のオペランド (静的単一代入グラフでは後続節) が相互被覆リンクで接続されている節をオペランドとする節を u_i とすればよい。当然この v と u_i も相互被覆リンクで結ばれ、さらに上のランクの計算に使用される。相互被覆リンクがオペランドに存在しないときには次の操作を行う。

1. オペランドが ϕ 関数なら、その ϕ のオペランドをオペランドとして持つ u_i とリンクする。
2. さもないければ、 v と同じオペランドを持つ u_i とリンクする。

3.3 相互被覆リンクによる静的単一代入グラフの還元

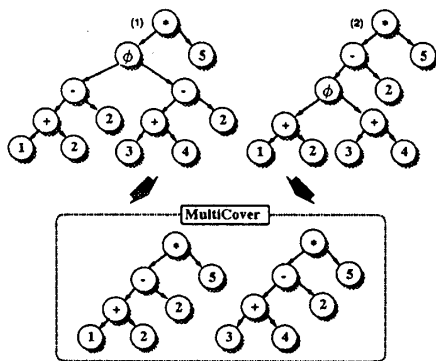


図 1: 分配性問題の解決

静的単一代入グラフによる被覆の発見は、その制御フローの欠除から、データフローモデルという分配性を保存することが難しい。これはデータの合流場所がどのランクにおいて行われているか (どのランクに ϕ 関数があるか) によるが、多重被覆を計算することで、合流による制限を取り除くことができる。

各 ϕ 関数の存在するフロー節に関して、同じ多重被覆を持つ静的単一代入グラフ節を一つに合体させていき、これを同じ多重被覆を持つ節が存在しなくなるまで反復すると、分配性を満たす形で、同じ値を計算す

るSSA最小被覆をグループ化することができる (一致 (congruence) [AWZ]) する被覆は前もって合体させておくことにより計算量を抑えることができる)。

4 データフローグラフの構築

同じSSA最小被覆を持つ定義をリンクしていくことによって、同じ値の流れを表現するグラフを構築することができる。この際につくられるリンクは、前もって計算されている相互被覆リンクにより、異なったSSA最小被覆相互に結合されプログラム全体規模のものになる。この際、データフローにおいてフローグラフと同じ性質をもたせるために、各SSA最小被覆に対する定義が互いに合流するフロー節 (前向きと後向きの両方) も一緒にリンクしなければならない。このデータの合流節は静的単一代入形式の構築の際に使用する手法 (支配前線 (dominance frontier)) によって計算することができる。

このデータフローグラフ上で Morel と Renvoise のデータフロー式に基づいて解析することにより、冗長計算と計算の挿入されるべき場所を決定することができる。

5 まとめ

過去の同様な最適化を行う手法に [AWZ] の研究と [SKR] の研究が存在する。[AWZ] は $O(CNE)$ の計算量ですが、構造化されたプログラムに限られていた。[SKR] は任意のプログラムに対して適用可能であるが、 $O(C^2N^2)$ の計算量がかかる。本研究の手法を用いると、任意のプログラムに対して [AWZ] と同様の計算量で終了することができる。

参考文献

- [AWZ] B. Alpern, M. N. Wegman, and F. K. Zadeck. Detecting equality of variables in programs. In Proceedings 15th ACM POPL, 1988, 1-11.
- [MR] E. Morel, and C. Renvoise Global optimization by suppression of partial redundancies. CACM 22, No.2 1979, 96 - 103.
- [RL] J. H. Reif and H. R. Lewis. Symbolic evaluation and the global value graph. Conf. Rec. 4th ACM POPL, 1977, 104 - 118.
- [RWZ] B. K. Risebom, M. N. Wegman and F. K. Zadeck. Global value numbers and redundant computations. In Proceedings 15th ACM POPL, 1988, 12 - 27.
- [SKR] B. Steffen, J. Knoop and O. R uthing. The value flow graph: A program representation for optimal program transformations. In Proceedings 3rd ESOP, Copenhagen, Denmark, Springer-Verlag, LNCS 432 1990, 389 - 405.