

佐藤 真琴^{1),2)}、和田 清美^{1),2)}、飯塚 孝好^{1),2)}、菊池 純男^{1),2)}

1) アドバンスド並列化コンパイラ研究体、 2) (株) 日立製作所システム開発研究所

1. はじめに

手続き間自動並列化コンパイラ WPP (Whole Program Parallelizer) [3]は手続き呼出しを含む多くのループを並列化可能だが、WPP が並列化できないループに対して十分な解析情報をユーザに提示していない。Aivi (Analysis Information Visualizer) [3]は、WPP の解析結果をグラフィカルに表示するツールである。本報告では、Aivi の特徴と手続き呼出しを含むループの並列性を調べる方法を述べる。

1. 最も時間のかかるループの検出。
2. そのループの外側ループの検出。
3. 外側ループ群中、最も効率的な並列ループの検出。

図 1: 手続き間並列化チューニング方法。

2. 手続き間並列化チューニング方法

図 1 は手続き間並列化チューニング方法を示す。プログラムをチューニングする時、実行データを収集して最も時間のかかるループ等を検出することが多い (ステップ 1)。一般に、外側にあるループを並列化した方が実行性能が良いので、並列化チューナには指定ループの外側ループを検出する機能が必要となる (ステップ 2)。手続き間並列化ではこの検出は簡単ではない。指定ループが外側ループを持つか否かは手続き呼出し列に関係し、外側ループを含む手続きはしばしば異なるファイルにあるからである。

次に、こうして得た外側ループに対して、データ依存関係を調べ、なるべく外側で、効率良く並列化できるループをさがす (ステップ 3)。コンパイラが明確に並列化不能と判定した場合を除くと、ループが自動並列化できない原因は、コンパイラがデータ依存を精度良く解析できないことにある。ユーザはそれらの不明確なデータ依存をチェックし、ループ

並列性を判定しなければならない。そのためには、手続き境界を超える場合でもデータ依存位置が検出できる機能が必要である。

また、Aivi は WPP が自動生成する OpenMP プログラムをチューニングするツールであり、ループに対する解析情報の表示等は、OpenMP プログラムから指示できるのが望ましい。

図 2 は、以上の要件をまとめたものである。他ツール [1] [2]では手続き間並列化チューニングを考慮していないため、これらの機能はみられない。

1. 与えられたループの外側ループを手続き境界を越えて検出すること。
2. あるデータ依存の依存元と依存先を手続き境界を越えて検出すること。
3. 自動生成された OpenMP プログラム上で解析情報を表示すること。

図 2: 手続き間並列化チューナに対する要件。

3. Aivi の特徴

Aivi は、コールグラフ、入力プログラム表示、OpenMP プログラム表示、解析情報表示の、4つのウィンドウから成る。これらは以下の特徴を持つ。

- (1) **コールグラフ**. ループ・そのネスト・手続き呼出しを、各々、四角形・インデント・三角形でグラフのノード上に実行順に表示する。これから手続き内の外側ループと呼び出し元手続きが分る。
- (2) **フィルタリングプログラム**. OpenMP プログラム表示ウィンドウは、手続きの開始・終了、ループ、手続き呼出し点等の、並列化に関連する文のみ取り出して表示できる。これから手続き呼出し点やそれを含むループがすばやく検出できる。
- (3) **配列参照リージョン**. 解析情報表示ウィンドウでは、ループ、手続き、手続き呼出し点で配列参

* Analysis Information Visualizer Aivi

Makoto SATOH, Kiyomi WADA, Takayoshi Iitsuka, and Sumio KIKUCHI

1) Advanced Parallelizing Compiler Project, 2) Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.

照リージョンの表示ができる。

- (4) **インライン展開**. プログラム表示ウィンドウで、手続き呼出し点直後に呼び出し先のプログラムを挿入して表示できる. これにより手続き境界をまたがって配列参照リージョンの比較ができる.

アルゴリズム 1 は、上記の 4 機能を用いて、図 2 の要件が実現できることを示す.

アルゴリズム 1.

1. コールグラフ上で、与えられたループ L の呼出し元手続きを検出する.
2. 呼出し元手続き上で、フィルタリングプログラムにより、呼出し点とそれを含むループ (L の外側ループ) を検出する.
3. L の外側ループの一つに対して依存情報を表示し、1 つの配列を選択する.
4. ループ L、その内側ループや手続き呼出し点でのその配列の参照リージョンを比較し、手続きやループレベルでその配列のデータ依存元と依存先を決定する.
5. 手続き呼出し点が依存元か依存先なら、インライン展開表示により、呼出し元プログラム中に呼出し先プログラムも表示して、呼出し先プログラムにも 4 を適用する.

このアルゴリズムにより、ループを並列化できない原因であるデータ依存元と依存先の範囲を段階的に縮小できる. これを段階的検出方法と呼ぶ. これは以下の特徴を持つ.

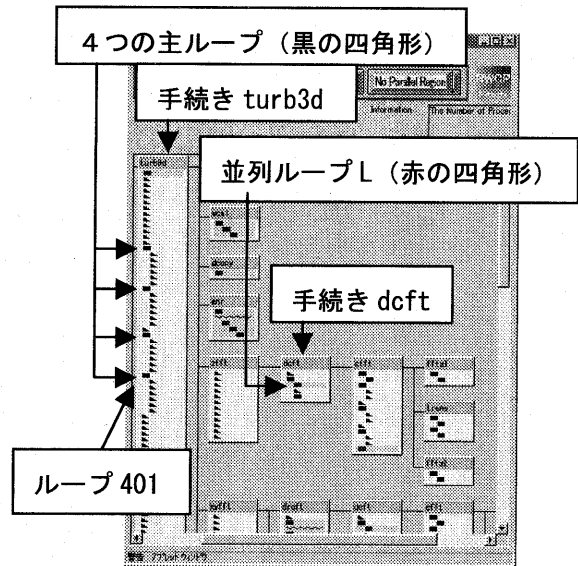
- 各段階で表示する依存の数が比較的少なくユーザの心理的負担が少. これは、ユーザ指定の手続き等で生じる依存のみ表示するためである.
- データ依存解析時の比較回数が少なく高速. これは、データ依存がないとわかった手続きは解析対象外にできるからである.

4. ケーススタディ

Aivi を SPECfp95/turb3d に適用した. 手続きクロウニングオプションは指定しなかった.

図 3(a) はコールグラフを示す. 4 つの主ループは並列化されてない (4 つの黒の四角形). 手続き dcft の内側並列ループ L (実際は赤の四角形) の外側ループに対して並列化を試みる. 呼出し元手続き turb3d のフィルタリングプログラムより最外側ループの 1 つがループ 401 と特定できる. このループから配列参照リージョンの比較を開始し、dcft 内の最外側ループでは配列 X 等の配列参照リージョンが

不確定と分かる (図 3b). こうして手続き間で、ループレベルでデータ依存位置が決定できた.



(a) turb3d に対するコールグラフ

X 等のリージョンは不確定 (UNDEF)

Value	Name	Is Defined	Is Used	Value Attr	Access Type	Array Dim 1	Array Dim 2
RA	possibly loop-carried	Y	Y	serial	live	(EMPTY)	(12*N)
RA	possibly loop-carried	Y	Y	serial	kill	(12*N)	(12*N)
RA	possibly loop-carried	Y	Y	serial	mod	(12*N)	(12*N)
RA	possibly loop-carried	Y	Y	serial	use	(12*N)	(12*N)
RA	possibly loop-carried	Y	Y	serial	use	(EMPTY)	(12*N+1)
RA	possibly loop-carried	Y	Y	serial	live	(EMPTY)	(12*N)
V	possibly loop-carried	Y	N	serial	kill	(12)	(1<UNDEF)
V	possibly loop-carried	Y	N	serial	mod	(12)	(1<UNDEF)
V	possibly loop-carried	Y	N	serial	live	(EMPTY)	(1<UNDEF)
X	null	N	Y	shared	use	(12)	(1<UNDEF)
X	null	N	Y	shared	use	(12)	(1<UNDEF)
X	null	N	Y	shared	live	(EMPTY)	(1<UNDEF)

(b) dcft の最外側ループでの配列参照リージョン

図 3 : Aivi の SPECfp95/turb3d への適用例.

5. おわりに

コンパイラ解析情報ビジュアライザ Aivi を試作し、手続き境界を越えてデータ依存元と依存先を手続きまたはループレベルで検出する段階的方法を提案した. SPECfp95/turb3d に対してその有効性を示した. 今後は、呼出し先手続きのデータ依存位置を文レベルで自動検出する機能等を実現していく予定である.

謝辞

本研究の一部は新技術情報処理機構の委託を受けて行なった.

参考文献

[1] Johnson 他 "Computer Aided Parallelization Tools (CAPTools) User Manual", <http://capttools.gre.ac.uk>.
 [2] S. -W. Liao 他, "SUIF Explorer: An Interactive and Interprocedural Parallelizer", PPoPP'99.
 [3] M. Satoh 他, "Interprocedural Parallelizing Compiler WPP and Analysis Information Visualization tool Aivi", EWOMP 2000.