5E-2

FORTRAN最適化の強化
ー多重ループ内の配列多重添字解析方式ー

石田 和久[1] 金田 泰[2]

(1)日立製作所 ソフトウエア工場 (2)同 中央研究所

1．はじめに

プログラムのベクトル化や最適化を行なうためには、プログラム中の２つの配列参照における添字の挙動を解析し、その重なりの有無を明らかにする必要がある。これを添字解析と呼ぶ。今回、従来より一般的、かつ強力に行なうことができる多重ループ内の配列多重添字解析方式を開発したのでそれについて報告する。

2．規準インダクション変数

配列添字の解析をより一般的に行なうために、第一に規準インダクション変数を導入した。 ここで規準インダクション変数とは、初期値０，増分値１，の仮想的なインダクション変数のことである。規準インダクション変数は多重ループ中の各ループに対して１つずつ設ける。通常のインダクション変数は、この規準インダクション変数を用いて表現することができる。

第二に、配列参照における添字の標準形表現を導入した。ここで添字の標準形表現とは、多重ループ内の配列参照に対して、その添字を規準インダクション変数の定数係数の線型結合の形で表現したものである。標準形表現を求めることを標準化と呼ぶ。

多重ループ内の配列の各次元の添字は、

$$C0 + \sum_{L:ループ} C_L * I_L \quad (C0,\ C_L：定数)$$

という形に標準化される。ここに I_L はループＬに対する規準インダクション変数である。

配列参照の添字を標準化することにより、配列参照の添字の挙動をコンパイル時に評価し易くなる、すなわち、２つの配列参照の添字を一般的な比較方式により比較することができる。

図１を用い配列参照の添字の標準化の例をしめす。

配列参照②，⑤，⑦における添字の標準形表現はそれぞれ

$4 * I_{L1}$，$2 + 8 * I_{L1}$，$7 + 16 * I_{L1} + 3 * I_{L2}$

となる。

```
       j = 0                    ①
       DO 10 k1 = 1, N          (ループL1)
         A(j) =....             ②
         j = j+1                ③
         i = j                  ④
         DO 20 k2 = 1, N        (ループL2)
           m = 2*j
           A(m) =....           ⑤
           i = i+1              ⑥
           A(3*i+j)=.....       ⑦
20       CONTINUE
         j = j+3                ⑧
10     CONTINUE
```

図1 基準インダクション変数による添字標準化

標準化処理では、次のような情報も解析しており、従来より強力な添字解析を実施している。

（１）インダクション変数ｊの初期値は０である。：①

（２）ループＬ1におけるインダクション変数ｊの定義は２箇所ある。：③と⑧

（３）インダクション変数ｉの初期値はループＬ1のインダクション変数ｊである。：④

3．ループ依存性情報

ベクトル化などの最適化を行なう場合、ループ内の２つの配列参照が、

（ａ）ループの同一の繰り返しにおいて、同一アドレスを参照するか否か。

（ｂ）ループの異なる繰り返しにおいて、同一アドレスを参照するか否か。

という情報が重要である。 これらの情報をループ依存性情報と呼ぶ。ループ依存性情報とは、２つの配列参照の同一アドレスの参照が、「必ず生じる」のか、あるいは、「生じる可能性がある」のか、及び、それが「ループの何回の繰り返し後において生じる」のか、についての性質であり、正確には、以下の（１），(２)，(３)の３つの性質からなる。 ここに、Ｌはループ、Ｕ、Ｖは、Ｌ内の配列の参照を表わし、ｎは ループＬの何回の繰り返し後に、ＵとＶが同一アドレスを参照するのかを表わす負でない整数である。

（１）ＵとＶのＬに関するループｎ回完全一致性。

これは、「Ｕが参照したアドレスを、Ｖが ループＬのｎ回後の繰り返しにおいて 必ず参照する」という性質である。

（２）ＵとＶのＬに関するループｎ回一致可能性。

これは、「Ｕが参照したアドレスを、Ｖが ループＬのｎ回の繰り返し後に 参照する可能性がある」 という性質である。逆に言えば、「ｎ回後の繰り返しにおいて、必ず異なるアドレスを参照するとは言えない」という性質である。

（３）ＵとＶのＬに関するループｎ回以上一致可能性。

これは、「Ｕが参照したアドレスを、Ｖが ループＬのｎ回以上の繰り返し後に 参照する可能性がある」 という性質である。逆に言えば、「ｎ回以上のすべての繰り返しにおいて、必ず異なるアドレスを参照するとは言えない」という性質である。

図２に、上記情報の例を示す。図２－Ａ に対しては、Ｕ1で参照したアドレスを、Ｖ1が ループＬ1の１回の繰り返し（次の繰り返し）で 必ず参照するから、Ｕ1とＶ1の Ｌ1に関するループ１回完全一致性は真となる。 図２－Ｂ では、Ｕ2で参照したアドレスを、Ｖ2が ループＬ2の０回の繰り返し（同じ繰り返し）において、ｊ＝１ なら参照し、ｊ＞１ なら参照しない。

An analyzer of multi-dimensional array subscripts in multi-nested loops

Kazuhisa Ishida[1] Yasusi Kanada[2]

(1) Software Works,Hitachi Ltd. (2) Central Research Laboratory,Hitachi Ltd.

従って、U2とV2の L2に関するループ0回完全一致性は偽となり、ループ0回一致可能性は真となる。 図2－C では、$j \geq 1$ であるから、U3で参照したアドレスをV3がループL3の0回以上の繰り返し後において参照することはない。従って、U3とV3の L3に関するループ0回以上一致可能性は偽となる。

```
      DO 10 i = 1, N              (ループL1)
        A(i) =...                 (U1)

10      ...= A(i-1)               (V1)
```

A. ループ1回完全一致性が真の例

```
      DO 20 i = 1, N              (ループL2)
        A(i) =...                 (U2)
        DO 20 j = 1, N
20        ...= A(i+j-1)           (V2)
```

B. ループ0回一致可能性が真の例

```
      DO 30 i = 1, N              (ループL3)
        A(i) =...                 (U3)
        DO 30 j = 1, N
30        ...= A(i+j)             (V3)
```

C. ループ0回以上一致可能性が偽の例

図2 ループ依存性情報

4.添字比較方法

ループ依存性情報は、配列参照の添字の標準形表現を比較して求める。 すなわち、ループL'内の配列の2つの参照UとVの添字がそれぞれ、

$$C0+\sum_{L:\text{ループ}} C_L * I_L$$
$$D0+\sum_{L:\text{ループ}} D_L * I_L$$
($C0$, C_L, $D0$, D_L : 定数)

と標準化されているとき、0以上の整数nに対して、

(1) 次の(1-1)、(1-2)、(1-3) 全てが成立すれば、
UとVの L' に関するループn回完全一致性は真となる。
(1-1) $C0=D0+D_{L'}*n$
(1-2) $C_L=D_L$　　(L : L'と等しいループ 又は L'の外側ループ　)
(1-3) $C_L=D_L=0$　(L : 上記以外のループ)

(2) 次の (2-1)、または、(2-2)が 成立すれば、
UとVの L' に関するループn回一致可能性は、偽となる。
(2-1) $C0>D0+D_{L'}*n$ かつ $C_L \geq D_L$ かつ $C_{L''}*D_{L''}=0$
(Lは全てのループ)
(L'' : L'と異なり、かつ L'の外側ループでないループ)
(2-2) $C0<D0+D_{L'}*n$ かつ $C_L \leq D_L$ かつ $C_{L''}*D_{L''}=0$
(Lは全てのループ)
(L'' : L'と異なり、かつ L'の外側ループでないループ)

(3) 次の (3-1)、または、(3-2)が 成立すれば、
UとVの L' に関するループn回以上一致可能性は、偽となる。
(3-1) $C0>D0+D_{L'}*n$ かつ $D_{L'} \leq 0$ かつ $C_L \geq D_L$ かつ $C_{L''}*D_{L''}=0$
(Lは全てのループ)
(L'' : L'と異なり、かつ L'の外側ループでないループ)
(3-2) $C0<D0+D_{L'}*n$ かつ $D_{L'} \geq 0$ かつ $C_L \leq D_L$ かつ $C_{L''}*D_{L''}=0$
(Lは全てのループ)
(L'' : L'と異なり、かつ L'の外側ループでないループ)

実用上特に有用な性質は、完全一致性が真であること、および、一致可能性が 偽であることである。多くの場合、上記 (1),(2),(3)によりループ依存性情報を求めることができるが、求められない場合には、2つの添字の標準形表現が等しいとして Diophantus 方程式をたて、その解の挙動を調べることによって ループ依存性情報を求めるようにしている。

図3のプログラムを例として、添字比較方法を説明する。配列Aの参照U，Vの添字の標準形表現はそれぞれ、

$(1+I_{L1},\ 2+I_{L1}+I_{L2})$，
$(2+I_{L1}+I_{L3},\ 1+I_{L1})$

となる。一次元目どうし、及び、2次元目どうしに、上記 (3) の (3-2) を適用すれば、UとVの L1 及び L2 に関するループ0回以上一致可能性が、ともに偽となり、VとUの L1 及びL2 に関するループ1回以上一致可能性は、ともに偽となることがわかる。

これらのループ依存性情報を、データ依存グラフにおける言葉に翻訳すれば、UからVへのフロー依存、及び、VからUへの逆依存は、ともに存在しないということになることを付記する。

```
      DO 10 k = 1, N              (ループL1)
        DO 20 i = k+1, N          (ループL2)
          A(k,i) = T              (U)
          DO 30 j = k+1, N        (ループL3)
30          S = A(j,k)            (V)
20      CONTINUE
10    CONTINUE
```

図3 添字比較の例

5．おわりに

多重ループ内の多重添字に対する、一般的な解析方式を開発した。本方式により、従来より一般的かつ強力な配列添字解析が可能となる。その結果、ベクトル化率の向上や、最適化の強化を図ることが可能となった。

参考文献

金田 他：Ｆｏｒｔｒａｎ最適化の強化－大域配列データフロー解析法－，情報処理学会第３２回全国大会，４Ｆ－３
梅谷 他：内蔵ベクトル演算機能のための自動ベクトルコンパイラ方式，情報処理，Ｖｏｌ．２４，Ｎｏ．２ ｐ２３８－ｐ２４８ （Ｍａｒ．１９８３）．