В области программного обеспечения разработаны внутренние уровни для комбинаций 8-битовых и 16/32-битовых микропроцессоров со специализированными арифметическими процессорами, созданы расширенные Ассемблеры для 8-битовых и 16/32-битовых микропроцессоров. Существующие трансляторы Фортран и F77 снабжены библиотечными пакетами для управления специализированными арифметическими процессорами.

Все эти работы направлены на создание мощных прикладных систем автоматизации в разных областях научных исследований и народного хозяйства. Разработаны система анализа состава газов в реальном масштабе времени для конверторного производства стали, система адаптивного управления процессом сгорания угля в парогенераторе ТЭС; ведутся работы по созданию систем машинной графики, обработки изображений и т. д.

Создание технических и программных средств управления специализированными арифметическими процессорами дает возможность повысить вычислительную мощность магистрально-модульных систем автоматизации и в результате расширить сферу их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тренев А.** Система КАМАК // Автоматика и изчислителна техника.— София.— 1982.— № 6.
2. **Челебиев А.** Арифметические модули ЦЛАНП // II Междунар. симп. «Автоматизация и научное приборостроение, 83».— Варна, 1983.
3. **Trenev A., Varbova R., Njagolov A.** Autonomous arithmetic module for microcomputer configurations // II Symposium on Microcomputer and Microprocessor Applications "Microprocessor's 85".— Budapest, 1985.
4. **Аврамов И., Няголов А., Атанасова Л.** Подход при вычислении арифметических выражений в микрокомпьютерных системах // I Междунар. симп. «Автоматизация и научное приборостроение, 81».— Варна, 1981.
5. **Танева П., Вербова Р.** Арифметика с плавающей запятой на уровне Ассемблера для микрокомпьютерной системы ИНТЕРЛАБ // II Междунар. шк. по АНИ.— Пущино, СССР, 1985.
6. **Вербова Р., Няголов А.** Алгоритмический язык FORTRAN с библиотекой плавающей арифметики для МСА ЦЛАНП 0270, расширенной специализированным арифметическим модулем // III Междунар. симп. «Автоматизация и научное приборостроение, 85».— Варна, 1985.

Поступила в редакцию 23 декабря 1986 г.

УДК 681.3 : 621.3

Ю. Н. МАТВЕЕВ, Е. Ф. ОЧИН

(Ленинград)

ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЕРАЦИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ВЫРАВНИВАНИЯ ГИСТОГРАММЫ В МАТРИЧНОМ ПРОЦЕССОРЕ

Еще в первых исследованиях по обработке изображений с помощью ЭВМ было установлено, что матричные процессоры, структура которых отображает структуру обрабатываемых данных, могут стать мощным средством обработки изображений [1]. К настоящему времени разработан и изготовлен ряд матричных процессоров таких, как ILLIACIII, CLIP4, DAP [2], MPP [1], ПС-3000 и другие. Основной проблемой при их использовании является разработка алгоритмов и соответствующих программ, эффективно реализуемых этими матричными процессорами.

В ряде исследований показано, что наиболее эффективно на матричных процессорах реализуются операции обработки двумерных массивов данных, обладающих свойством локальности: свертка с малоразмерным ядром, операции клеточной логики [1] и другие. В данной статье предлагается расширить класс задач, решаемых матричными процессорами, за счет реализации такой широко используемой операции нелинейной обработки изображений, как скользящее выравнивание гистограмм (СВГ) [3]. Традиционный алгоритм СВГ требует выполнения последовательной по своей природе операции формирования гистограмм фрагментов изображения, что вызывает трудности с распараллеливанием процесса вычислений. Авторами предложен новый параллельный алгоритм СВГ [4], позволяющий легко реализовать эту операцию на матричном процессоре.

Предположим, что изображение $0 \leqslant D(x, y) < 1$ дискретизовано в виде матрицы размером $I \times J$ точек и квантовано на 2^L уровней, т. е.

$$D_{i,j} = \sum_{l=1}^{L} 2^{-l} d_{i,j,l},$$

где $d_{i,j,l} \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$. Глобальная гистограмма элементов изображения представляет собой табличную функцию

$$H(m) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} 1\left(D_{i,j} = m2^{-L}\right),\ 0 \leqslant m < 2^L, \tag{1}$$

здесь

$$1\left(D_{i,j} = m2^{L}\right) = \begin{cases} 0, \ D_{i,j} \neq m2^{-L}; \\ 1, \ D_{i,j} = m2^{-L}. \end{cases}$$

Определим нелинейное табличное преобразование T следующим образом:

$$D'_{i,j} = T\left(D_{i,j} 2^L\right), \tag{2}$$

где

$$T(k) = \left[\frac{1}{IJ} \sum_{m=0}^{k} H(m)\right],\ 0 \leqslant k < 2^L,$$

$[\cdot]$ — операция округления до ближайшего целого. Можно показать, что с помощью такого преобразования выполняется глобальное выравнивание гистограммы [5], т. е.

$$H'(m) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} 1\left(D'_{i,j} = m2^L\right) \approx \text{const},\ \ 0 \leqslant m < 2^L.$$

В случае локального выравнивания гистограммы изображение разбивается на фрагменты, в общем случае неперекрывающиеся, затем для каждого фрагмента строится своя гистограмма и выполняется соответствующее нелинейное преобразование элементов этого фрагмента. Большое практическое значение имеет скользящее выравнивание гистограммы, когда для каждой точки $(i, j) \in I \times J$ изображения по площади фрагмента размером $(2M+1)\times(2N+1)$ вычисляется своя локальная гистограмма

$$H_{i,j}(p) = \sum_{m=-M} \sum_{n=-N}^{N} 1\left(D_{i-m,j-n} = p2^{-L}\right),\ 0 \leqslant p < 2^L, \tag{3}$$

и соответствующее табличное преобразование

$$T_{i,j}(k) = \left[\frac{1}{(2M+1)(2N+1)} \sum_{p=0}^{k} H_{i,j}(p)\right], \tag{4}$$

по которому, в свою очередь, выполняется преобразование этой точки изображения:

$$D'_{i,j} = T_{i,j}\left(D_{i,j} 2^L\right). \tag{5}$$

Можно показать, что преобразование

$$D'_{i,j} = \left[\frac{1}{(2M+1)(2N+1)} \sum_{m=-M}^{M} \sum_{n=-N}^{N} \varphi\left(D_{i-m,j-n} \leqslant D_{i,j}\right)\right], \tag{6}$$

где $\varphi = (D_{i-m,j-n} \leqslant D_{i,j}) = \sum\limits_{p=0}^{D_{i,j}} 1\left(D_{i-m,j-n} = p2^{-L}\right) = \begin{cases} 0, & D_{i-m,j-n} > D_{i,j}; \\ 1, & D_{i-m,j-n} \leqslant D_{i,j}, \end{cases}$

эквивалентно последовательности преобразований (3)—(5). Основным достоинством представления (6) является возможность распараллеливания алгоритма СВГ.

В отличие от традиционного алгоритма СВГ, состоящего в последовательном вычислении преобразований (3) и (4) для каждого фрагмента изображения, в предложенном алгоритме операция СВГ выполняется только за один просмотр изображения и не требует формирования гистограмм фрагментов. Операция (6) распараллеливается аналогично операции свертки с малоразмерным ядром.

Операцию сравнения φ в формуле (6) можно заменить на операцию выделения знака разности сравниваемых чисел

$$\varphi(D_{i-m,\,j-n} \leqslant D_{i,\,j}) = \overline{\operatorname{sgn}(D_{i,\,j} - D_{i-m,\,j-n})},$$

и, следовательно, алгоритм вычисления (6) можно записать таким образом:

для всех $(i,\,j) \in I \times J$ **выполнить параллельно:**
    для $l = 1 \ldots \ulcorner \log_2(2M+1)(2N+1) \urcorner$ **цикл:**
        $y_{i,\,j,\,l} := \varnothing;$
    конец цикла;
конец выполнить параллельно;
для $m = -M \ldots M$ **цикл:**
    для $n = -N \ldots N$ **цикл:**
        для всех $(i,\,j) \in I \times J$ **выполнить параллельно:**
            $p_{i,\,j} := 1;\ b_{i,\,j} := d_{i-m,\,j-n};$
            для $l = L \ldots 1$ **шаг** -1 **цикл:**
                $q_{i,j} := \varnothing;\ b'_{i,j} := \overline{b_{i,j,l}};$
                $c_{i,j} := d_{i,j,l} \wedge b'_{i,j};\ q_{i,j} := q_{i,j} \vee c_{i,j};$
                $c_{i,j} := p_{i,j} \wedge d_{i,j,l};\ q_{i,j} := q_{i,j} \vee c_{i,j};$
                $c_{i,j} := p_{i,j} \wedge b'_{i,j};\ q_{i,j} := q_{i,j} \vee c_{i,j};$
                $p_{i,j} := q_{i,j};$
            конец цикла;
            для $l = \ulcorner \log_2(2M+1)(2N+1) \urcorner \ldots 1$ **шаг** -1 **цикл:**
                $q_{i,j} := y_{i,j,l} \wedge p_{i,j};$
                $y_{i,\,j,\,l} := y_{i,\,j,\,l} \oplus p_{i,\,j};\ p_{i,\,j} := q_{i,\,j};$
            конец цикла;
        конец выполнить параллельно;
    конец цикла;
конец цикла;

В этом алгоритме $Y = [y_{i,\,j}]$ — преобразованное изображение с выровненной гистограммой; $P = [p_{i,\,j}]$ — матрица переносов; $Q = [q_{i,\,j}]$ — матрица переполнения; $B = [b_{i,\,j}]$ — матрица промежуточного изображения, полученного из исходного путем сдвига его элементов на m и n отсчетов по координатам i и j соответственно; $B' = [b'_{i,j}]$, $C = [c_{i,\,j}]$ — бинарные матрицы промежуточных результатов; $\ulcorner \cdot \urcorner$ — операция округления до ближайшего большего целого; $\oplus$ — операция «исключающее ИЛИ».

Как следует из приведенного алгоритма, операция СВГ сводится к параллельному выполнению ряда логических операций над разрядными срезами исходного изображения. Это позволяет вычислять операцию СВГ на матричных процессорах, процессорные элементы которых реализуют функционально полную систему логических операций, а также имеют между собой связи в окрестности фон Неймана [1, с. 4—6] (т. е. с четырьмя ближайшими соседями по координатам i и j) для получения сдвинутых изображений.

В результате время выполнения операции СВГ на матричном процессоре по приведенному параллельному алгоритму равно $T_м = [q + (2M + 1)(2N + 1)(9L + 3q + 2)]t$, где $q = \ulcorner \log_2(2M+1)(2N+1) \urcorner$; t — время вычисления одной арифметико-логической операции. Операция (6) выполняется одновременно для всех $P \times R$ точек изображения, где $P \times R$ — число процессорных элементов матричного процессора. Если $P < I$, $R < J$, то обработка изображения ведется по блокам размерностью $P \times R$, имеющим области перекрытия из $2M$ строк при сдвиге по координате i и из $2N$ столбцов при сдвиге по координате j. Следовательно, время преобразования изображения размерностью $I \times J$ на матричном процессоре из $P \times R$ процессорных элементов равно $T_{свг} = prT_м$, где $p = \left\lceil \frac{I - 2M}{p - 2M} \right\rceil$, $r = \left\lceil \frac{J - 2N}{R - 2N} \right\rceil$. Так, при $I = J = 1024$, $M = N = 15$, $L = 8$ и $P = R = 128$, $t = 10^{-7}$ с время $T_{свг} \approx 1{,}2$ с. Для сравнения время преобразования изображения с теми же характеристиками по рекуррентному алгоритму СВГ [3] на однопроцессорной ЭВМ с быстродействием 1 млн опер./с равно $T_{свг} \approx 318$ с, т. е. в 265 раз больше.

Таким образом, выполнение операции скользящего выравнивания гистограммы на матричном процессоре позволяет значительно уменьшить время обработки при решении задач улучшения качества изображений, характеризующихся наличием нелинейных искажений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Денисов В. М., Матвеев Ю. Н., Очин Е. Ф.** Принципы организации систем обработки изображений на базе клеточной логики // Зарубеж. радиоэлектрон.— 1984.— № 1.
2. **Головкин Б. А.** Параллельные вычислительные системы.— М.: Наука, 1980.
3. **Кронрод М. А.** Несколько задач обработки изображений // Вопр. кибернетики: Иконика, цифровая обработка и фильтрация изображений.— 1978.— Вып. 38.
4. **Матвеев Ю. Н., Очин Е. Ф.** Нелинейное преобразование видеосигнала на основе алгоритма скользящей эквализации гистограмм // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1985.— № 1.
5. **Вудс Р. Э., Гонсалес Р. С.** Цифровые методы улучшения изображений в реальном времени // ТИИЭР.— 1981.— Т. 69, № 5.

Поступила в редакцию 3 февраля 1986 г.

УДК 681.513

В. И. МЕЛЕШКО, Т. В. ТКАЧЕНКО

(Харьков)

ФАКТОРИЗОВАННЫЕ РЕКУРРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Введение. При решении задач идентификации динамических объектов с коррелированными шумами традиционный метод наименьших квадратов [1, 2] дает смещенные, неустойчивые оценки. Смещенность возникает из-за того, что шумы и выходные переменные, рассматриваемые в разные отсчеты дискретного времени, являются коррелированными. Численная неустойчивость объясняется наличием как в методе наименьших квадратов, так и в его рекуррентной модификации, известной как фильтр Калмана, трансформации Гаусса, заключающейся в использовании дисперсионной матрицы при вычислениях.

Один из эффективных методов получения несмещенных оценок в задачах динамической идентификации — метод инструментальных пере-