

16. Selwyn W. H. Experiments on the nature of grains // *Photogr. J.*— 1939.— N 8.
 17. Иванов А. П., Лойко В. А. Оптика фотографического слоя.— Минск: Наука и техника, 1983.

Поступила в редакцию 28 апреля 1987 г.

УДК 621.344.3

Р. В. БОЙКО, В. А. КОМАРОВ, В. Г. КРАСИЛЕНКО

(Винница)

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ МОМЕНТНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Повышение быстродействия и эффективности при определении геометрических признаков изображений, особенно полутоновых, является актуальной задачей, поскольку цифровая обработка изображений с помощью универсальной ЭВМ требует больших временных затрат. Известен ряд операций вычисления геометрических моментных признаков, с помощью которых описывается любое изображение [1 — 4]. Попытки увеличить скорость определения моментных признаков путем замены операций умножения операциями сложения при использовании специальных алгоритмов эффективны лишь для частных случаев (случай определения «центра тяжести» изображения и др.) [2]. Они не пригодны для вычисления ряда моментных признаков за время телевизионного кадра. Метод определения «центра тяжести», описанный в [3], свободен от операции умножения, но за время одного кадра вычисляется лишь координата по одной оси.

В настоящей работе развивается подход к вычислению моментных признаков изображения, упрощающий процесс вычисления. Сущность данного подхода рассмотрим на примере определения моментных признаков первого порядка M_{10} и M_{01} для пространственно дискретизированных двухградационных изображений. Пусть входное изображение S описывается двумерной функцией

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } B(x, y) \in S; \\ 0, & \text{если } B(x, y) \notin S, \end{cases}$$

или бинарной матрицей B_0 с элементами, принимающими два значения. Тогда моментные признаки M_{10} и M_{01} определяются следующими выражениями:

$$M_{00} = \|B_0(x, y)\|;$$

$$M_{01} = \sum_{x,y=1}^{n,m} B_0(x, y) x = \|B_{\Phi}^{01}\|;$$

$$M_{10} = \sum_{x,y=1}^{n,m} B_0(x, y) y = \|B_{\Phi}^{10}\|,$$

где $\|A\|$ — евклидова норма матрицы A ; B_{Φ}^{01} ; B_{Φ}^{10} — матрицы, которые можно представить в виде произведения матриц

$$[B_{\Phi}^{10}] = [B_0] [\Phi]; [B_{\Phi}^{01}] = [\Phi] [B_0],$$

здесь Φ — пространственная матрица преобразований, являющаяся диагональной матрицей, каждый элемент которой принимает значение, соответствующее номеру столбца

$$\Phi = \begin{bmatrix} 00 \dots 0 & & & & \\ 01 \dots 0 & & & & \\ 002 \dots 0 & & & & \\ \dots & & & & \\ 00 \dots n-1 & & & & \end{bmatrix}.$$

Пространственная матрица преобразований Φ фактически есть математический аналог пространственного фильтра, который по заданному закону производит преобразование светового потока, проходящего через него. В то же время матрицу Φ можно представить как сумму вырожденных диагональных единичных матриц h_i , диагональные элементы которых могут принимать лишь два значения — «0» и «1»:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{\log_2 N} [h_i] a_i,$$

где N — размер матрицы; a_i — скаляр, зависящий от выбранного основания счисления, причем для двоичной системы $a_i = 2^{i-1}$, а сами матрицы будут иметь следующий вид (например, для случая $N = 8$):

$$h_1 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 01000000 \\ 00000000 \\ 00010000 \\ 00000000 \\ 00000100 \\ 00000000 \\ 00000001 \end{bmatrix}; \quad h_2 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00100000 \\ 00010000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000010 \\ 00000001 \end{bmatrix}; \quad h_3 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00001000 \\ 00000100 \\ 00000010 \\ 00000001 \end{bmatrix}.$$

Причем вырожденные элементы диагонали, принявшие нулевое значение, зависят от позиции и связаны с номером столбца выражением

$$]n/a_i[\text{ — четное число,}$$

где $]B[$ — выделение целой части числа B , а $n = 0; N \div 1$; элементы, принявшие единичное значение в диагонали матрицы, связаны, в свою очередь, с номером столбца выражением

$$]n/a_i[\text{ — нечетное число.}$$

Поэтому формулы для определения моментных признаков изображения можно записать как

$$\begin{aligned} M_{10} &= \|B_0\Phi\| = \sum_{i=1}^{\log_2 N} a_i \|B_0 h_i\|; \\ M_{01} &= \|\Phi B_0\| = \sum_{i=1}^{\log_2 N} a_i \|h_i B_0\|. \end{aligned} \quad (1)$$

Из анализа (1) видно, что $a_i B_0 h_i$ есть не что иное, как часть изображения B_0 , другая часть которого (вернее, полосы шириной a_i) удалена.

Таким образом, очевидно, что изображение $B_0\Phi$ (сумму элементов которого необходимо найти) может быть представлено суммой бинарных изображений, полученных из исходного B_0 , являющегося по сути бинарными срезами, так как вес каждого элемента в i -м бинарном изображении $[B_0 h_i]$ соответствует a_i , т. е. весу двоичного кода. Поэтому вычисление момента M_{10} и M_{01} сводится к формированию таких бинарных изображений с последующим получением подсчитанных сумм с требуемым весом.

Для определения моментов более высоких порядков необходимо последовательно применять пространственную матрицу Φ требуемое число раз в соответствующих операторах. Так, например, моментные признаки M_{11} , M_{20} , M_{02} , M_{21} , M_{12} и т. д. определяются как

$$\begin{aligned} M_{11} &= \|(\Phi B_0)\Phi\| = \|\Phi(B_0\Phi)\|; \\ M_{20} &= \|(B_0\Phi)\Phi\| = \|B_0\Phi^2\|; \\ M_{02} &= \|\Phi(\Phi B_0)\| = \|\Phi^2 B_0\|; \end{aligned}$$

$$M_{12} = \|\Phi^2 B_0 \Phi\|;$$

$$M_{21} = \|\Phi B_0 \Phi^2\|$$

или в общем случае

$$M_{\alpha,\beta} = \|\Phi^\beta B_0 \Phi^\alpha\|. \quad (2)$$

Учитывая, что матрица

$$\Phi = \sum_{i=1}^{\log_2 N} a_i [h_i],$$

а α и β — целые натуральные числа: $\alpha, \beta \in 1 \dots k$, выражение для мат-

$$[\Phi]^k = \sum_{j=1}^{\log_2 N} a_{jk} [h_{jk}],$$

где a_{jk} — число, определяющее вес матрицы (скаляр), которая также имеет вид диагональной h_{jk} с заменой некоторых единиц на нули. Она получена путем перемножения матриц k в различных сочетаниях. Например, для момента второго порядка $k=2$ матрицы размером $N=8$ вырожденные единичные матрицы будут иметь следующий вид:

$$\begin{array}{l}
 h_1 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 01000000 \\ 00000000 \\ 00010000 \\ 00000000 \\ 00000100 \\ 00000000 \\ 00000001 \end{bmatrix}; \quad h_2 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \end{bmatrix}; \quad h_3 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000010 \\ 00000000 \\ 00000000 \end{bmatrix}; \\
 h_4 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00010000 \\ 00000000 \\ 00000100 \\ 00000000 \\ 00000000 \end{bmatrix}; \quad h_5 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00001000 \\ 00000100 \\ 00000000 \\ 00000001 \end{bmatrix}; \quad h_6 = \begin{bmatrix} 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000000 \\ 00000010 \\ 00000000 \\ 00000001 \end{bmatrix}.
 \end{array}$$

Отсюда следует, что для вычисления моментных признаков более высокого порядка необходимо из исходного изображения выделить в соответствии с матрицами h_{jk} отдельные фрагменты $B_{\text{фр.}y} = B_0 [h_{jk}]$ или $B_{\text{фр.}x} = [h_{jk}] B_0$, а затем определить интегральный сигнал в каждом выделенном фрагменте. Это можно осуществить с помощью коммутаторов аналоговых и цифровых сигналов в зависимости от формы представления изображения [5, 6]. Причем для бинарных изображений интегральный сигнал в каждом выделенном фрагменте — это его площадь, а для полутоновых — суммарный световой поток фрагмента. Полученные интегральные сигналы (цифровые коды в накапливающих сумматорах, напряжения на выходах аналоговых интеграторов) формируются одновре-

$$\int_0^1 \int_0^1 B(x, y) X^\alpha Y^\beta dx dy \text{ или } \sum_{i,j=1}^{\dots} B_{ij} t^{\alpha j \beta},$$

явно включающих операции умножения, возведения в степень и суммирования, может быть преобразован так, что операции умножения заменяются операциями выделения и формирования пространственных фрагментов, интегральные сигналы от которых затем суммируются с учетом весовых коэффициентов. Последние операции легко выполняются всего за несколько тактов, что значительно повышает быстродействие при вычислении моментных признаков изображений.

Рассмотрим возможные структурные схемы устройств для быстрого параллельного определения совокупности моментных признаков изображений. На рис. 1 изображена обобщенная структурная схема устройства для решения поставленной задачи на основе предложенного подхода. Блок формирования фрагментов изображения (БФФр) формирует совокупность требуемых фрагментов путем пропускания исходного изображения $B_0(x, y)$ через соответствующие фильтры, формирование фрагментов может быть выполнено также с помощью оптоэлектронных регистров сдвига (ОЭРС) картинного типа, как показано на рис. 2. На оптический вход первой матрицы проецируется входное изображение и подаются тактовые сигналы синхронизации лишь на некоторую совокупность строк, столбцов или фрагментов, выделяя тем самым необходимые фрагменты и сдвигая их потом в ОЭРС. Формирование фрагментов можно также осуществить с помощью матричного перемножителя [7], который, перемножая матрицы B_0 и h_j , записывает результаты, полученные в каждом j -м такте, в ОЭРС, как показано на рис. 3. Отличие в формировании фрагментов обуславливает различные параметры и характеристики этого блока. Формирование фрагментов чисто оптическими методами обладает высоким быстродействием, но трудно реализуемо. Формирование фрагментов с помощью схемы на рис. 2 и 3 удобно осуществлять для бинарных изображений, причем для схемы на рис. 2 время формирования зависит от числа фрагментов и составляет один такт для каждого из них. Для схемы на рис. 3 время формирования одного фрагмента производится за N тактов, где N — размерность квадратной матрицы, но эта схема обладает универсальностью и может легко перенастраиваться на любой вид пространственной матрицы h_j и в общем случае матрицы преобразования Φ^k .

Для источников изображений с последовательным выводом видеосигнала (телевизионные камеры, самосканирующие фотоприемные матрицы, ОЗУ за исключением ОЗУ страничного типа) БФФр является, в сущности, коммутатором, осуществляющим подачу цифровых или аналоговых сигналов на входы соответствующих каналов. На выходе каждого канала формируется моментный признак путем интегрирования (суммирования) сигналов в результате сканирования фрагмента с последующим сложением

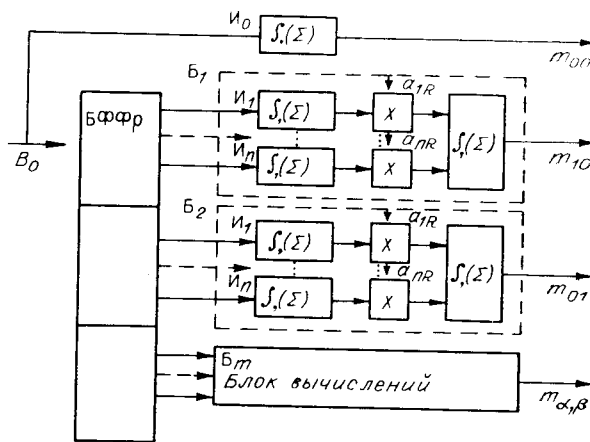


Рис. 1. Обобщенная структурная схема устройства

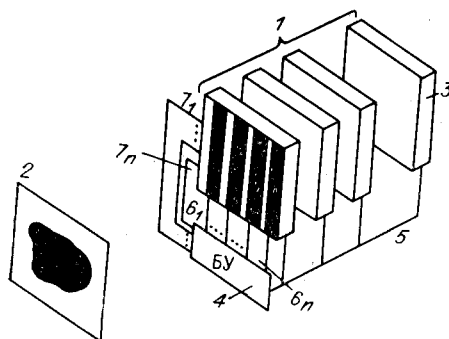


Рис. 2. Формирователь фрагментов изображения параллельного типа:

1 — оптоэлектронный регистр сдвига картинного типа; 2 — источник входного изображения (страничная память на основе матрицы оптических триггеров); 3 — матрица оптоэлектронных D-триггеров с оптическими входами-выходами; 4 — блок управления; 5 — шина общей синхронизации сдвига; $6_1 - 6_n$, $7_1 - 7_n$ — электроды выбора фрагментов (соответственно столбцовых и строчных)

накопленных сигналов с учетом весовых коэффициентов. Причем интеграторы могут быть как с пространственным интегрированием (преимущественно для систем с параллельным вводом изображений и формированием фрагментов), так и с временным (накапливающие сумматоры для предварительно оцифрованного видеосигнала или интегрирующие операционные звенья для аналогового сигнала).

Синхронизацию и управление коммутаторами БФФр легко выполнить с помощью ПЗУ, счетчиков или ОЗУ в режиме ПЗУ для повышения быстродействия, а также специальных генераторов со многими выходами. Необходимо отметить, что накапливающие сумматоры при обработке бинарных изображений фактически сводятся к обыкновенным счетчикам и процесс формирования интегральных сигналов вида $\|h_i^k B_j^k\|$ заканчивается по мере последовательного ввода изображений с видеодатчика. Общее время вычисления всех моментов, включая и моменты высокого порядка, не превышает 1 мс. Другими словами, данный метод вычисления моментных признаков позволяет работать с системами в реальном масштабе времени. Кроме того, он значительно уменьшает время ориентации, центрирования объектов в системах технического зрения, в робототехнике, в навигационных следящих системах.

Нетрудно видеть, что дальнейшего повышения быстродействия при использовании предложенного подхода можно добиться в том случае, если, наряду с разработкой оптоэлектронных регистров сдвига изображений картинного типа, позволяющих хранить, считывать и формировать соответствующие фрагменты (за один такт — один фрагмент),

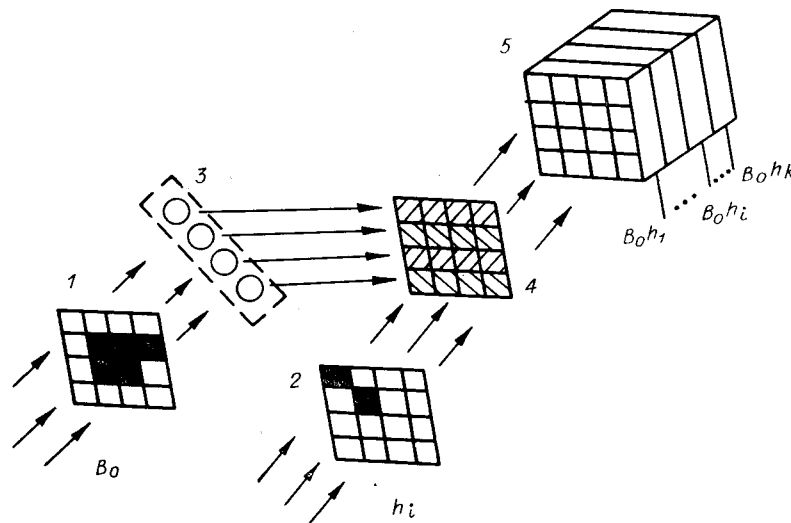


Рис. 3. Оптоэлектронный матричный перемножитель:

1, 2 — оптоэлектронные двумерные регистры сдвига с параллельным вводом-выводом; 3 — линейка фотодетекторов; 4 — матрица оптоэлектронных затворов (ключей), выполненная в виде набора строчных электрически управляемых транспарантов; 5 — оптоэлектронный регистр сдвига картинного типа (матрица оптоэлектронных счетчиков)

удастся разработать цифровые высокоточные пространственные интеграторы (определители площади бинарного изображения или нормы матрицы) и устройства для поэлементного сложения n бинарных матриц. Однако не следует забывать, что выигрыш по быстродействию будет эффективен лишь тогда, когда аппаратные затраты растут более медленно, чем падает время обработки.

На основе предложенного метода было реализовано устройство, позволяющее определять координаты центра тяжести изображения в стробирующем окне размером 32×32 элемента разложения. Функциональная схема устройства представлена на рис. 4. Она содержит телевизионную камеру на базе ПЗС-матрицы 1, устройство выделения окна стробирования 2, быстродействующий параллельный АЦП 3, блоки накапливающих сумматоров 4, блок комбинационных сумматоров 5, устройство управления накапливающими сумматорами 6 и микроЭВМ 7. При помощи устройства выделения окна стробирования задаются координаты расположения окна на телевизионном растре и его размер. Видеосигнал с передающей телевизионной камеры поступает на параллельный АЦП 3 и в моменты совпадения текущих координат развертки с заданными координатами окна стробирования потактово оцифровывается. В накапливающих сумматорах происходит сложение оцифрованного видеосигнала следующим образом: в блоке 4₀ потактово, в блоках 4₁ и 4₂ по сигналам с устройства управления накапливающими сумматорами 6. Затем после прохождения разверткой окна стробирования в комбинационных сумматорах 5 происходит сложение интегральных сумм, полученных в накапливающих сумматорах $M_{\text{Фр}}(x)$; $M_{\text{Фр}}(y)$, поразрядно сдвинутых между собой. Вычисленные статические моменты записываются в микроЭВМ 7, где происходит определение координат центра тяжести изображения по формулам

$$X_{\text{цт}} = M(x)/S_0; \quad Y_{\text{цт}} = M(y)/S_0,$$

где $M(x)$, $M(y)$ — статические моменты инерции относительно осей X и Y соответственно; S_0 — интегральная яркость изображения.

В устройстве применялась промышленная телевизионная камера КТ2, быстродействующий АЦП 1107ПВ1, счетчики К155ИЕ7, комбинационные сумматоры К155ИМ3, сдвиговые регистры К155ИР13, микроЭВМ «Электроника 60».

Проведенные испытания показали, что устройство позволяет определять координаты центра тяжести изображения в темпе телевизионного кадра с точностью до одного элемента разложения по обеим координатам.

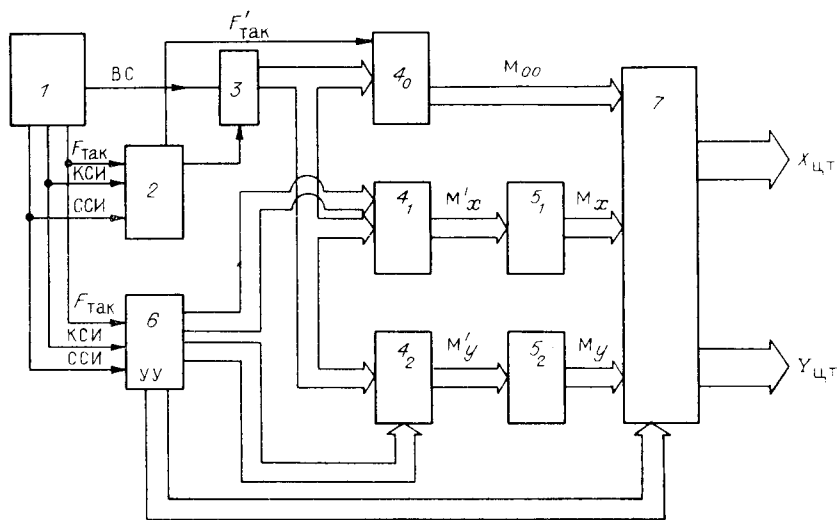


Рис. 4. Устройство определения координат центра тяжести изображения

- Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: III Всесоюз. сов.— Барнаул: АлтПИ, 1986.— Ч. I.
3. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков В. П. и др. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации.— М.: Радио и связь, 1986.
 4. Жаботинский Ю. Д., Исаев Ю. В. Адаптивные промышленные роботы и их применение в микроэлектронике.— М.: Радио и связь, 1985.
 5. Красиленко В. Г., Подорожнюк В. А., Колесницкий О. К. Принципы построения оптоэлектронных процессоров для обработки изображений // Оптические сканирующие устройства и измерительные приборы на их основе: III Всесоюз. сов.— Барнаул: АлтПИ, 1986.— Ч. I.
 6. А. с. 1262571 СССР. Оптоэлектронный сдвигающий регистр/В. М. Свищ.— Опубл. 27.09.86. Бюл. № 37.
 7. Красиленко В. Г., Подорожнюк В. А., Заболотная Н. И. Матричный оптоэлектронный процессор // Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: IV Всесоюз. сов.— Барнаул: АлтПИ, 1987.— Ч. II.

Поступила в редакцию 29 февраля 1988 г.

УДК 681.51 : 007.5

М. Я. ЖИТОМИРСКИЙ, В. М. ЛИСКИН, А. А. МАЙСТРЕНКО,
В. П. МАШТАЛИР, Е. П. ПУТЯТИН

(Харьков)

АЛГОРИТМЫ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1. Развитие в последнее десятилетие микропроцессорной технологии дало толчок к созданию эффективных методов и малогабаритных систем цифровой обработки визуальной информации в реальном масштабе времени. При разработке подобных систем (например, телевизионных автоматов промышленных роботов) возникает необходимость синтеза алгоритмов анализа последовательностей быстроменяющихся во времени видеок кадров [1]. На практике можно считать, что различие информации в изображениях в основном индуцируется изменением взаимного расположения объекта и видеодатчика, т. е. движением самого объекта и (или) датчика изображений.

Традиционный подход к обработке последовательностей изображений заключается в анализе пар видеок кадров, полученных в фиксированные моменты времени, и определении трансформаций, связывающих изображения наблюдаемого объекта. На некотором интервале времени эти деформации, как правило, достаточно адекватно описываются группами геометрических преобразований плоскости (поля зрения видеодатчика). Данному подходу свойствен значительный объем вычислительных затрат. Хотя в его рамках и удается достичь требуемого быстродействия, приходится понижать разрешающую способность телевизионных автоматов и ограничиваться лишь самыми простыми видами геометрических преобразований, что в конечном итоге снижает надежность функционирования вычислительных комплексов в целом.

Перспективным направлением совершенствования цифровых телевизионных автоматов является разработка алгоритмов, учитывающих особенности динамики последовательностей изображений [2]. В упрощенном виде постановка задачи заключается в следующем.

Пусть B_t — изображение некоторого движущегося объекта в момент времени t . Изображение B_0 считаем эталонным. В зависимости от