

4. Акаев А., Майоров С. А., Смирнов Н. А. Голографические оперативные 3У— состояние и перспективы развития.— «Зарубеж. радиоэлектроника», 1975, № 5, с. 57, № 6, с. 80.
5. D'Auria L., Huignard J. P., Spitz E. Experimental holographic read-write memory using 3-D storage.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 4, p. 808.
6. Микаэлян А. Л., Бобринев В. И. Голографические системы памяти.— В кн.: Оптические методы обработки информации. Л., «Наука», 1974.
7. Stroke G. W. A reformulated general theory of holography.— In: Symp. of Modern Opt. N. Y., 1967.
8. Морозов В. Н. К теории голограммы с кодированным опорным пучком.— «Квант. электроника», 1977, т. 4, № 8, с. 1694.
9. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. Под ред. Пестрякова В. Б. М., «Сов. радио», 1973.
10. Coillier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. H. Optical holography N. Y.— L., Acad. Press, 1971.
11. Huffman D. A. The synthesis of linear sequential coding network. In information theory. N. Y., Acad. Press, 1956, p. 77—95.
12. Norman S. L. Dye — induced stabilization of bleached holograms.— "Appl. Opt.", 1972, vol. 11, N 5, p. 1234.
13. Membrey F., Duvernoy J. Reconnaissance d'une forme et determination de ces dimension an mogen d'un filtre-hologramme a adaptation multiples.— "Nouv. Rev. Optique", 1973, t. 4, N 2, p. 88.
14. Harmuth H. F. Transmission of information by orthogonal functions. Berlin, Heidelberg, N. Y., 1970.
15. Васильев А. А., Вашурин П. В., Компанец И. Н. Фазовые управляемые транспаранты в когерентно-оптических устройствах, реализующих преобразования Уолша и Гильберта.— «Квант. электроника», 1977, т. 4, № 9, с. 1917.
16. Stiffler D. D. Synchronization of telemetry codes.— "IRE Trans.", 1962, vol. SET-8, N 2, p. 112.
17. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971.
18. Хурин Я. И., Яковлев В. П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. М., Физматгиз, 1962.
19. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М., «Сов. радио», 1971.
20. Inokuchi S., Morita Y., Sakurai Y. Optical pattern processing utilizing nematic liquid crystals.— "Appl. Opt.", 1972, vol. 11, N 10, p. 2223.

Поступила в редакцию 24 марта 1978 г.

УДК 681.335 : 681.372.58

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ

(Новосибирск)

ТАБЛИЧНЫЙ МЕТОД ПОИСКА КООРДИНАТ ФРАГМЕНТА НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Задача поиска координат фрагмента на изображении решается при создании систем обработки фотоснимков, навигации летательных аппаратов, ввода данных в ЭВМ, информационного поиска и т. п.

Некоторые из существующих методов поиска основаны на использовании оптических корреляторов. Применение таких устройств эффективно тогда, когда в составе корреляторов имеются параллельные устройства ввода изображений и в качестве метрики можно использовать скалярное произведение. Коррелятор с позиционным кодированием [1] позволяет вычислять более широкий класс метрик, однако требует применения параллельных устройств ввода.

В настоящей работе предложен табличный метод решения задачи поиска и указаны пути его оптико-электронной реализации. Метод рассчитан на использование в системах поиска вводных устройств сканирующего типа, наиболее часто встречающихся в практике, и не зависит

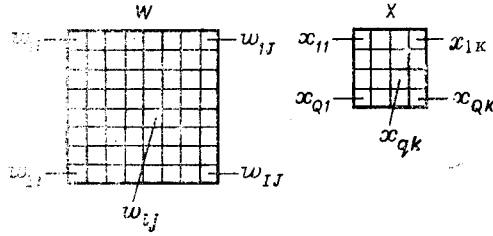


Рис. 1.

от вида применяемой метрики, которая может быть линейным или нелинейным функционалом.

Пусть задана матрица-«эталон» W с элементами w_{ij} , $i=1, 2, \dots, I$, $j=1, 2, \dots, J$, и матрица-«фрагмент» X с элементами x_{qk} , $q=1, 2, \dots, Q$, $k=1, 2, \dots, K$, причем $Q < I$, $K < J$. Для наглядности матрицы W и X показаны на рис. 1. На эталоне W требуется

найти координаты фрагмента размерности $Q \times K$, наиболее близкого фрагменту X . Метрикой является функционал

$$\Psi_{\eta\xi} = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \Phi(w_{q+\eta-1, k+\xi-1}, x_{qk}), \quad (1)$$

где η, ξ — координаты текущего фрагмента W' размерности $(Q \times K)$ на эталоне W , сравниваемого с заданным фрагментом X той же размерности; $\Phi(\cdot)$ — функциональное преобразование, определенное на одноименных элементах фрагментов W' и X .

Модификациями функционала (1) являются часто используемые в практике принятия решений метрики:

$$\Psi_{\eta\xi} = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K w_{q+\eta-1, k+\xi-1} x_{qk}; \quad (2)$$

$$\Psi_{\eta\xi} = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K |w_{q+\eta-1, k+\xi-1} - x_{qk}|; \quad (3)$$

$$\Psi_{\eta\xi} = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K (w_{q+\eta-1, k+\xi-1} - x_{qk})^2; \quad (4)$$

$$\Psi_{\eta\xi} = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K P(x_{qk}/w_{q+\eta-1, k+\xi-1}), \quad (5)$$

отличающиеся видом функции $\Phi(\cdot)$. В последнем случае $\Phi(\cdot) = P(\cdot)$ — вероятность появления элемента со значением x_{qk} при условии, что одноименный ему элемент имеет значение $w_{q+\eta-1, k+\xi-1}$.

В общем случае $\eta=1, 2, \dots, I$, а $\xi=1, 2, \dots, J$. Это отражает тот факт, что максимально возможное количество положений эталона W относительно фрагмента X равно $I \times J$. Однако нас интересуют только те положения, при которых фрагменты эталона W имеют размерность $Q \times K$ и не менее. Количество таких положений (и, следовательно, фрагментов)

$$R = I' \times J' = (I - Q + 1)(J - K + 1). \quad (6)$$

Соседние фрагменты отличаются одним столбцом или одной строкой.

Таким образом, задача поиска координат фрагмента сводится к вычислению R однородных функционалов (1), характеризующих близость (расстояние) фрагмента X к R «полным» фрагментам эталона W , где R определяется соотношением (6). Если функционал (1) представлен выражением (2) или (5), то ближайшим к фрагменту X будет фрагмент W' с максимальным значением функционала; если же выражением (3) или (4), то с минимальным значением. Индексы функционалов с экстремальными значениями однозначно определяют искомые координаты.

Сложность задачи заключается в том, что даже при сравнительно небольших размерностях эталона и фрагмента число функционалов, подлежащих вычислению, является довольно большим. Действительно, если $I=J=100$, а $Q=K=32$, то $R=69 \times 69 = 4761$. Каждый из них требует выполнения 1024 преобразований вида $\Phi(\cdot)$ и 1024 операций сложения.

Покажем возможность решения этой задачи табличным способом. Этот способ основан на том, что каждый из элементов фрагмента X принимает одно из значений натурального ряда чисел: $0, 1, 2, \dots, x, \dots, x_{\max}-1$. Поэтому, если положить $x_{qk}=x$, можно заранее вычислить значения функции $\Phi(\cdot)$ при всех значениях индексов η и ξ и образовать таблицу из $I \times J$ положительных чисел:

$$\begin{aligned} \Phi_{q+\eta-1, k+\xi-1}/x_{qk} &= x, \\ \eta &= 1, 2, \dots, I, \quad \xi = 1, 2, \dots, J. \end{aligned} \quad (7)$$

То же сделаем для остальных возможных градаций элемента x_{qk} . В результате получим x_{\max} сдвинутых таблиц вида (7). Параметры сдвига: $(q-1), (k-1)$. Эти таблицы на рис. 2 выделены жирными линиями. Пунктирными линиями обозначены исходные положения тех же таблиц для случая $a=k=1$. Интересующая нас область сдвигов, при которых должны вычисляться функционалы вида (1), заштрихована и обозначена символом Ω .

По условию задачи входным является фрагмент X . Элемент x_{qk} конкретной реализации фрагмента X характеризуется фиксированным численным значением x и номером qk . С численным значением этого элемента однозначно связана таблица вида (7), а с его номером — положение этой таблицы относительно области Ω . Фрагмент X содержит $Q \times K$ элементов. Поэтому R функционалов вида (1) можно вычислить за $Q \times K$ последовательных циклов, выполняя на каждом из них следующие действия:

- 1) ввести текущий элемент x_{qk} заданной реализации фрагмента X и составить пару (x, qk) ;
- 2) по значению x выбрать соответствующую элементу x_{qk} таблицу из $I \times J$ чисел и сдвинуть ее на $q-1, k-1$ позиций в системе координат (η, ξ) ;
- 3) числа таблицы, попадающие в область Ω , запомнить и поэлементно суммировать с теми, которые получены на предыдущих шагах.

Результат суммирования на элементах области Ω за $Q \times K$ циклов будет соответствовать значениям R искомых функционалов.

Указанная последовательность действий сравнительно просто реализуется в аналоговом процессоре, структура которого показана на рис. 3, а, где 1 — странично-организованная оптическая память (ОП), 2 — фоточувствительная интегрирующая среда, 3 — устройство управления. ОП в этом случае используется для хранения в аналоговом виде таблиц (7). Расположение отсчетов в странице совпадает с размещением чисел в таблице; количество страниц x_{\max} ; требуемый объем ОП $x_{\max} IJ$ отсчетов. Если, например, $x_{\max}=16-32$, то при указанных ранее значениях I, J объем памяти равен $(1,6-3,2) \times 10^5$ отсчетов.

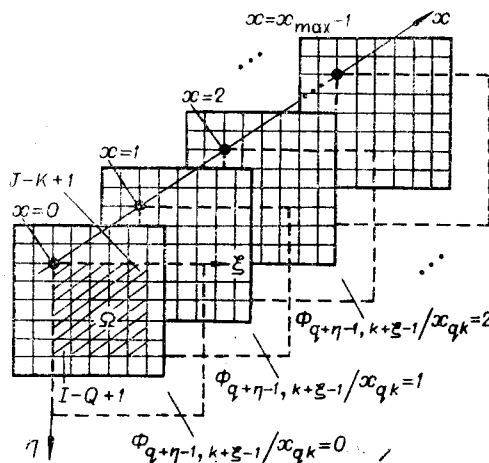


Рис. 2.

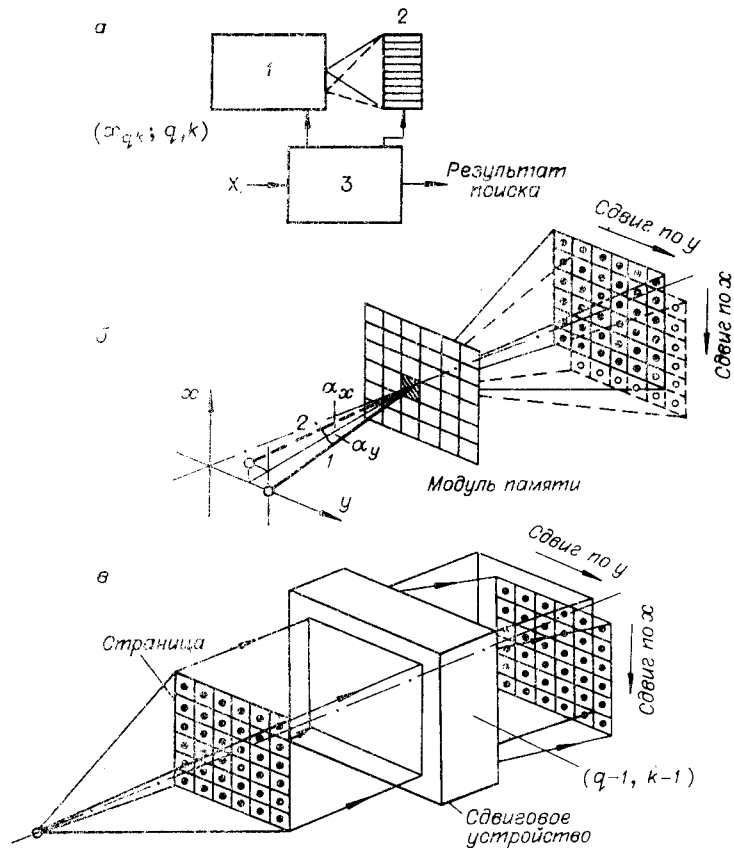


Рис. 3.

Пусть количество таблиц, соответствующих одному эталону, не превышает количества ячеек в строке (столбце) модуля памяти. Тогда по остальным строкам (столбцам) этого модуля могут быть размещены таблицы, соответствующие другим эталонам. Если S — количество возможных эталонов, то объем ОП должен быть равен $SIIx_{\max}$.

Доступ ячейкам памяти может быть обеспечен с помощью систем адресации считывающего пучка на основе дефлектора или матрицы (линейки) излучателей (светодиодов, полупроводниковых лазеров). Адрес ячейки определяет численное значение элемента x_{qk} и текущий номер s ($s=1, 2, \dots, S$) эталона.

Сдвига изображения восстановленной страницы в плоскости интегрирующей среды на $Q \times K$ позиций можно добиться за счет усложнения системы адресации ОП или за счет установки между ОП и интегрирующей средой специального параллельного сдвигового устройства.

В первом случае система адресации должна обеспечивать не только геометрическое переключение считывающего пучка, но и двухкоординатное изменение углового положения этого пучка на каждой из позиций в соответствии с координатами $q-1, k-1$. Этот принцип иллюстрирует рис. 3, б, где показаны положения восстановленных страниц для исходного 1 и отклоненного 2 считывающих пучков. Примеры систем адресации с геометрическим и угловым отклонением пучка света описаны в работах [2, 3]. Если ОП является голографической, то ограничение в количестве сдвигаемых позиций может произойти из-за недопустимых гео-

метрических искажений восстанавливаемых из памяти страниц данных и изменения их яркости.

Во втором случае страница данных получает сдвиг $q-1$, $k-1$ при прохождении сдвигового устройства, например электронно-оптического преобразователя с ортогональными отклоняющимися пластинами, как показано на рис. 3, в.

В качестве интегрирующей среды можно применить реверсивный фотоматериал или матрицу фотоприемников с накоплением заряда. Подтверждение находим, в частности, в работе [4], где экспериментально осуществлен простейший итерационный алгоритм формирования функции пропускания двумерного фильтра, обеспечившего классификацию изображений двух классов. Реверсивной фотосредой служил фотохромный материал органического происхождения. Внимания заслуживают также среды типа PROM. На их основе можно решить не только задачу накопления страниц данных, восстанавливаемых из ОП, но и задачу нахождения координат элементов с экстремальными значениями. В последнем случае может быть использована известная методика выделения эквиденсит [5]. Наконец, хорошие перспективы имеют ПЗС-матрицы. В настоящее время созданы ПЗС-матрицы размером 64×64 , 128×128 и более элементов [6].

Основные препятствия на пути применения реальных интегрирующих сред возникнут из-за нелинейности характеристик «пропускание (преломление) — экспозиция» и ограниченного линейного диапазона. Если числа таблиц (7) также принимают x_{\max} градаций, то максимальное число, которое может быть получено в процессе интегрирования, $T_{\max} = x_{\max} QK$. При $x_{\max} = 16-32$, $Q=K=32$ $T_{\max} \sim (16-32) 10^3$. Минимальное значащее число будет определяться пороговой чувствительностью фотосреды или фотоприемника E_{\min} . Следовательно, линейный участок характеристики среды должен иметь диапазон порядка $(T_{\max}-1)E_{\min}$. Снижение требований к диапазону линейности может быть получено при решении задач поиска с метриками вида (3), (4). В этом случае на линейном участке характеристики должен вычисляться только близкий к относительному минимуму поддиапазон чисел.

Время вычислений в аналоговом табличном процессоре можно ориентировочно оценить по формуле

$$t_b = QK(\Delta t_n + \Delta t_p),$$

где Δt_n — время переключения пучка света и сдвига изображения страницы, а Δt_p — время накопления заряда на интегрирующем фотоприемнике. Если $\Delta t_n + \Delta t_p = 20 \cdot 10^{-6}$ с, что является реальным, то при $Q=K=32$ время вычислений составит $20 \cdot 10^{-3}$ с. Для сравнения укажем, что при решении данной задачи на ЭВМ с временем выполнения одной элементарной операции $\cdot 5 \cdot 10^{-6}$ с на вычисления необходимо затратить не менее $RQK\Delta t \sim 25$ с.

Таким образом, к достоинствам процессоров рассматриваемого типа можно отнести высокую производительность, независимость структуры и характера вычислений от вида функционала и возможность ввода данных об исходном фрагменте X (включая его гибкую предварительную обработку) на уровне электрического сигнала (кода). Необходимы исследования возможностей их эффективной реализации. Отметим, что данный подход позволяет рассмотреть варианты табличных поисковых процессоров с цифровым кодированием и цифровой обработкой данных.

* Сюда входит время выполнения одного преобразования $\Phi(\cdot)$ и время одного сложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нежевенко Е. С., Потатуркин О. И. Метод реализации нелинейных операторов средствами когерентной оптики.— «Автометрия», 1979, № 1, с. 127.
2. D'Auria L., Huignard J. P., Slezak C. S., Spitz E. Experimental holographic read-write memory using 3-D storage.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 4, p. 808—814.
3. Carlsten W. John. Holographic digital data processing system with sequential data storage and retrieval.— Пат. США 340-173LM (G11c13/04, G02B27/38), № 4034355, заявл. 5.05.75, опубл. 5.07.77.
4. Нежевенко Е. С., Салов Г. И., Твердохлеб П. Е., Уманцев Г. Д. Линейный адаптивный классификатор оптических изображений.— «Автометрия», 1971, № 3, с. 82—84.
5. Lipson S. G., Nisenson P. Imaging characteristics of the Itek PROM.— "Appl. Opt.", 1974, vol. 13, N 9, p. 2052—2060.
6. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. М., «Сов. радио», 1976.

Поступила в редакцию 18 августа 1978 г.

УДК 535.317.2 : 531.715.2

С. В. МИХЛЯЕВ, Ю. В. ЧУГУИ

(Новосибирск)

ОПЕРАТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ДОПУСКОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ФОРМЫ ИЗДЕЛИЙ

Введение. Как известно, контроль формы изделий оптическими приборами (проекторами, микроскопами) сводится к визуальному сравнению оператором увеличенного изображения изделия с некоторым эталоном в виде чертежа поля допусков, воспроизводящим минимальные и максимальные размеры изделия [1]. В связи с возрастающими требованиями к производительности и точности контрольных операций и многообразием форм и размеров контролируемых объектов возникает задача оперативного формирования указанных полей допусков. Существующие методы их изготовления (на оргстекле, фотопластинках, кальках) не отвечают этим требованиям. Они предполагают использование дорогостоящего оборудования (координатных машин, графопостроителей) либо высококвалифицированного ручного труда и не отличаются большой производительностью. Кроме того, получаемые чертежи в процессе эксплуатации быстро изнашиваются и подвержены деформациям, а процесс контроля изделий с их помощью практически не поддается автоматизации.

В данной работе впервые исследуется возможность оперативного формирования полей допусков средствами когерентной оптики на основе применения эталонных (или номинальных) изделий. Это достигается с помощью фильтра пространственных частот в обычной когерентно-оптической системе фильтрации [2]. При помещении на вход этой системы эталонного изделия (рис. 1, а) на ее выходе формируется контурное изображение в виде поля допусков (рис. 1, б). Выполняемое при этом линейное преобразование можно свести к двум операциям, первая из которых обеспечивает получение контура (границы) объекта, а вторая — расщепление его на два компонента, соответствующих внешнему и внутреннему контурам поля допусков (см. рис. 1, б). Исходя из этого ниже рассматриваются два метода синтеза фильтров, называемых в дальнейшем расщепляющими. Анализируются различные способы их реализации, приводятся результаты экспериментов.

Первый метод синтеза фильтров. В этом случае передаточная функция фильтра определяется из условия расщепления тестового объекта в виде одномерного края (полуплоскости).