

Е. С. НЕЖЕВЕНКО, В. И. ХОЦКИН
(Новосибирск)

ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОГЕРЕНТНО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Существует широкий класс задач распознавания, в которых вычисление решающей функции распознавания производится путем вычисления функции взаимной корреляции обрабатываемого изображения (как правило, предварительно преобразованного) с несколькими двумерными функциями, которые будем называть эталонными. К такой процедуре приводит задача разбиения изображений на несколько классов, лингвистический подход к распознаванию, когда класс представляется в виде простых структур (фоном), и вообще все случаи, когда в решающей функции в качестве признаков могут быть использованы отсчеты функции взаимной корреляции. Кроме того, указанным путем можно обеспечить инвариантность результата распознавания к повороту, масштабу и другим преобразованиям.

При решении на ЭВМ такие задачи требуют больших временных затрат, поэтому представляет огромный интерес применение для этой цели когерентно-оптических вычислительных устройств (КОВУ), потенциально превосходящих по быстродействию ЭВМ.

Выделим две противоположные по способу получения решающей функции группы КОВУ. В устройствах первой группы (к ним относится известный коррелятор Вандер Люгта [1]) параллельно обрабатываются все точки входного изображения, но перемножается оно только с одной эталонной функцией. Для вычисления всей решающей функции требуется либо сменить голографический фильтр, либо использовать матрицу фильтров, сканируя по ней световой луч (в обоих случаях в каждом фильтре записана лишь одна эталонная функция), либо на одном фильтре записывать несколько эталонных функций на разных несущих. Поскольку последние два способа при большом количестве эталонных функций применять нерационально, так как они приводят к необходимости работы оптической системы в косых пучках с большими углами наклона, проанализируем лишь первый способ. Быстродействие системы с механической сменой фильтра можно оценить следующим образом. Пусть входное изображение содержит M^2 информативных точек и для каждой точки требуется вычислить K эталонных функций, ΔT_0 — время считывания одной точки в выходной плоскости, ΔT_m — механическая постоянная устройства (в параллельном анализе это время смены фильтров). Тогда время обработки одного изображения

$$T_{\text{пр}} = M^2 \Delta T_0 + K \Delta T_m. \quad (1)$$

Заметим также, что информация в выходной плоскости должна считываться с помощью фотоматрицы, способной разрешать M^2 точек, что для реальных значений M ($\sim 10^3$) трудно выполнимо.

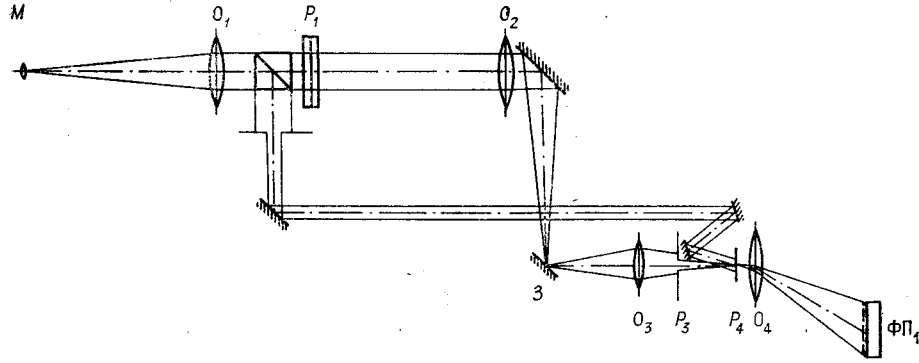
При последовательном анализе все точки входного изображения обрабатываются последовательно во времени, но вычисляется сразу несколько составляющих решающей функции, записанных на голографическом фильтре на разных несущих частотах [2]. Время анализа в этом случае

$$T_{\text{пс}} = M^2 \Delta T_m + K \Delta T_0. \quad (2)$$

Таким образом, из выражений (1) и (2) видно, что параллельный анализ целесообразно применять при больших M и малых K , а последовательный — при больших K и малых M . Однако в большинстве реальных задач M и K достаточно велики ($M \sim 10^3$, $K \sim 10$) и время распознавания с помощью параллельных и последовательных методов имеет порядок секунд. Поэтому для уменьшения времени обработки входной информации целесообразно скомбинировать эти два способа. Для этого предлагается в корреляторе оставить параллельность лишь по одному измерению (т. е. последовательно перебирать M столбцов по M точек в каждом).

На рисунке приведена схема параллельно-последовательного коррелятора, который позволяет решать задачу распознавания двумерных изображений по нескольким эталонным функциям при сравнительно небольших затратах времени. Рассмотрим его работу. Плоская волна, сформированная коллиматором, модулируется изображением $f(x, y)$, записанным на фотопленке. Для устранения фазовых шумов, обусловливаемых колебаниями толщины пленки, она помещена в иммерсию. Затем световое распределение проходит через объектив O_2 в плоскости Фурье которого находится качающееся зеркало Z , причем ось вращения этого зеркала совпадает с центром Фурье-распределения. На зеркале Фурье-спектр функции, равный

$$\mathcal{F}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{j(nx+vy)} dx dy, \quad (3)$$



домножается на фазовый множитель $e^{j\alpha(t)u}$, где $\alpha(t)$ — величина смещения изображения при повороте зеркала.

В плоскости изображения системы объективов O_2, O_3 помещается щель P_3 , ширина которой l равна наибольшей протяженности (по координате x) области определения эталонной функции. После этой щели световое распределение имеет вид

$$f[x+\alpha(t), y] \text{rect}[x/l]. \quad (4)$$

При качании зеркала через щель будут проходить различные части изображения и попадать на согласованный фильтр P_4 , который имеет вид

$$\Phi^*(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N \varphi_i^*[x+i\Delta x, y] e^{j(ux+vy)} dx dy, \quad (5)$$

где $\varphi_i(x, y)$ — i -я эталонная функция.

После перемножения Фурье-спектра функций (4) и (5) получаем

$$R(u, v) = \mathcal{F}(u, v) e^{j\alpha(t)u} \Phi^*(u, v). \quad (6)$$

Объектив O_4 производит обратное преобразование Фурье, и в плоскости $\Phi\Pi_1$ получаем распределение света в виде

$$r(\xi, \eta, t) = \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \text{rect}\left[\frac{x+\alpha(t)}{l}\right] \varphi_i^*(x-\xi+i\Delta x, y-\eta) dx dy. \quad (7)$$

Если считывание этой функции производить через систему узких щелей, в идеале — через маску с функцией пропускания

$$T(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^N \delta(\xi - i\Delta x),$$

то световые распределения после щелей будут представлять собой N световых полос, разнесенных на расстояние Δx друг от друга с амплитудами

$$r_i(\eta, t) = r(\xi, \eta, t) T_i(\xi, \eta) = \int_{-l/2}^{l/2} f(x, y) \varphi_i^*(x-\alpha(t), y-\eta) dx dy,$$

которые являются кросс-корреляциями функций $f(x, y)$ и $\varphi_i(x, y)$, причем в связи с тем, что щель P_3 неподвижна, корреляционные функции на выходе системы локализируются в одном и том же месте, что позволяет применить линейки неподвижных фотосчитывателей, число фотоэлементов в которых выбирается из требований точности считывания.

Одним из вариантов вышеизложенной схемы является устройство, в котором вместо сферических объективов O_3 и O_4 используется анаморфотная оптика. В этом случае O_3 производит по координате v проектирование Фурье-спектра с зеркала $З$ на фильтр,

а по координате u — обратное преобразование Фурье, т. е. получаем

$$\mathcal{F}(x, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(u, v) e^{jux} du. \quad (8)$$

Соответственно на фильтре записывается функция

$$\Phi^*(x, v) = \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_i^*(x + i\Delta x, y) e^{iv y} dy. \quad (9)$$

В выходной плоскости, следовательно, световое распределение будет иметь вид

$$r(x, y) = \text{rect}\left[\frac{x + \alpha(t)}{l}\right] \sum_{i=1}^N \Phi_i^*(x + i\Delta x, y - \eta) f(x, \eta) d\eta, \quad (10)$$

т. е. по координате y получаем нужную нам функцию корреляции, а по координате x проектируется входное изображение, выделенное щелью P_3 . Это позволяет использовать недифрагмированные фотосчитыватели на выходе, так как роль диафрагмы выполняет проекция щели P_3 , в то время как в схеме без анаморфотной оптики, где по координате x получается также функция корреляции, приходится сильно ее дифрагмировать, чтобы выделить один отсчет этой функции. Таким образом, на выходе имеется значительный выигрыш по интенсивности.

Таким образом, описанные системы позволяют вычислять кросс-корреляцию функций $f(x, y)$ и $\Phi_i(x, y)$, $i=1, \dots, N$, причем по координате y сдвиг происходит в пространстве, как в обычных оптических корреляторах, а по координате x — во времени. Время обработки всей функции $f(x, y)$ по эталонным функциям $\Phi_i(x, y)$

$$T_{\text{пп}} = M\Delta T'_m + K\Delta T_p.$$

На первый взгляд при близких значениях M и K оно совпадает с выражением (1) для параллельного коррелятора, однако если учесть, что ΔT_m — время смены фильтра, а $\Delta T'_m$ — время поворота на один шаг легкого зеркала, установленного в Фурье-плоскости изображения, то $\Delta T_m \gg \Delta T'_m$ и соответственно $T_{\text{пр}} \gg T_{\text{пп}}$.

В заключение еще раз перечислим преимущества параллельно-последовательного способа распознавания изображений:

1. Способ позволяет за короткое время вычислить кросс-корреляционные функции изображения $f(x, y)$ с эталонными функциями $\Phi_i(x, y)$. Так, при размерности $f(x, y)$ $M \times M = 10^3 \times 10^3$ и числе эталонных функций $K = 10^2$ время вычисления кросс-корреляционных функций имеет порядок десятков миллисекунд.

2. При использовании этого способа резко облегчается считывание кросс-корреляционных функций: вместо матрицы плотно упакованных фотоприемников размерностью $M \times M$ в выходной плоскости устанавливается K линеек с M элементами разрешения в каждой.

3. Вместо трудоемкой процедуры смены фильтров, необходимой в параллельном способе, здесь требуется лишь качание вокруг одной оси легкого зеркала, что намного снижает требования к точности механических узлов системы.

При всех перечисленных достоинствах система сохраняет все преимущества когерентно-оптических систем: возможность предварительной обработки изображения, записи на фильтре знакопеременных функций и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Vander Lugt, F. B. Rots, A. Klooster. Character-reading by optical spatial filtering.— In: Optical and Electrooptical Information Processing, 1965, p. 125—141.
2. Ф. Ф. Веряскин, Л. В. Выдрин, В. Т. Давыдов, Т. Н. Мантуш, Е. С. Нежевенко, Б. Н. Панков, П. Е. Твердохлеб. Оптико-электронный процессор для распознавания изображений.— «Автоматика», 1975, № 3, с. 73—77.

Поступило в редакцию 15 июня 1976 г.