

УДК 004.932.2:004.93'1

**В. А. Гороховатский**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
проспект Ленина, 14, 61166 Харьков, Украина

## **Иерархии признаков в структурных методах анализа изображений**

*Обсуждаются вопросы обработки информации в интеллектуальных системах компьютерного зрения. С целью повышения эффективности анализа предложен иерархический подход к построению признаков и мер для сопоставления структурных описаний. Приведены результаты экспериментов.*

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, структурные методы распознавания изображений, характерные признаки, иерархия, отношения, помехозащищенность.

### **Введение**

Формально систему распознавания  $\mathfrak{R}$  можно представить в виде пары  $\mathfrak{R} = \langle \varphi, \varpi \rangle$ , где  $\varphi, \varpi$  — функции формирования и обработки альтернатив распознаваемых классов объектов [1]. Значения альтернатив включают числовую оценку принадлежности к  $j$ -му классу и отражают значение меры подобия с эталоном. Эффективным путем построения систем признаков и мер подобия при структурном распознавании изображений является формирование иерархий характерных признаков (ХП) [2]. Основа построения иерархий — применение пространственных и атрибутивных отношений на множестве ХП, представляющем описание изображения [3–7].

Цель работы — обобщение принципов, формализация моделей построения, а также исследование свойств иерархий на множестве ХП. Задачи исследования — анализ эффективности применения иерархий, изучение модификаций методов распознавания с применением иерархических систем признаков.

### **Построение и применение иерархий на множестве характерных признаков**

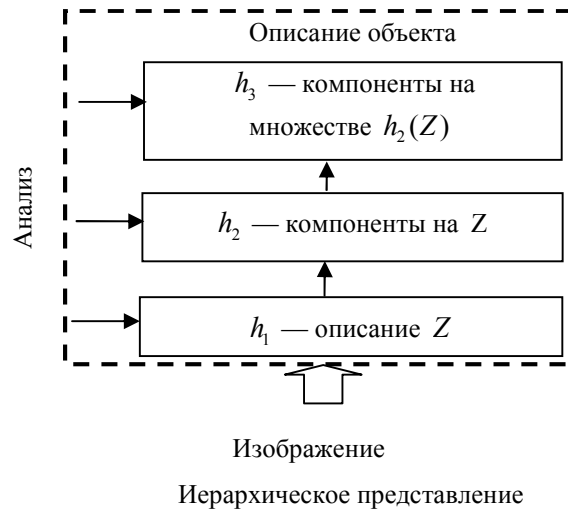
Мера подобия  $\mathcal{D}(Z_1, Z_2)$  между описаниями  $Z_1, Z_2$  визуальных объектов отражает степень эквивалентности двух конечных мультимножеств  $Z_1, Z_2$ ,  $Z_1 = \{z_1^i\}_{i=1}^{s(1)}$ ,

© В. А. Гороховатский

$Z_2 = \{z_2^i\}_{i=1}^{s(2)}$ , где  $s(1), s(2)$  — мощности (число элементов) множеств  $Z_1, Z_2 \subseteq \mathcal{U}$ ,  $z_j^i \in \mathcal{U}$ ,  $\mathcal{U}$  — некоторый универсум ХП, отождествляемый с векторным пространством  $R^n$  [2]. Конкретно ХП — это конечномерный вектор значимых откликов локального фильтра.

Иерархию  $H(Z)$  применительно к описанию  $Z$  можно представить как конечное множество  $H(Z) = (h_1, \dots, h_m)$ , где  $m$  — число уровней;  $h_k = \varphi(h_{k-1})$ ,  $k > 1$ ;  $\varphi$  — функция перехода от уровня к уровню, реализующая процесс «группирования» или отбора ХП нижнего уровня [4, 5]. Случай  $k = 1$  соответствует исходному описанию  $Z$  (см. рисунок). Одним из вариантов построения  $H(Z)$  для множества ХП есть формирование уровней  $h_k$ , исходя непосредственно из множества  $Z$ . В таком случае  $h_k = \varphi_k(Z)$ , и иерархия определяется функциями  $\varphi_k$ . Как правило, процесс сопоставления описаний осуществляется на равноценных уровнях. В результате мера подобия  $\mathcal{G}[H(Z_1), H(Z_2)]$  иерархических описаний представляется композицией  $f$  результатов сравнения для систем признаков отдельных уровней:

$$\mathcal{G}[H(Z_1), H(Z_2)] = f(\mathcal{G}_1[h_1(Z_1), h_1(Z_2)], \dots, \mathcal{G}_m[h_m(Z_1), h_m(Z_2)]) . \quad (1)$$



Формирование иерархии для описаний изображений, как правило, связано с построением компонент из ХП. Компонентное представление путем иерархического/стратифицированного описания обладает одновременно свойствами целостности и детализации и позволяет анализировать объект на соответствующем уровне абстрагирования. Для каждой страты существуют характерные особенности, законы и принципы, отражающие ее свойства при распознавании независимо от других страт. В то же время в рамках иерархии описание каждого последующего уровня основано на данных предыдущего уровня. Анализ и сопоставление описаний может осуществляться как независимо по уровням, так и с использованием обобщенной меры подобия, включающей множество описаний разных уровней. Элементы описания разных уровней могут иметь как однообразный тип

построения, так и зависеть от уровня. В результате распознаваемый объект представляется как многоэлементная совокупность компонент, для которых вычисляется значение вектора признаков. Выбор способов вычисления дескрипторов и формирования компонент в значительной мере задает свойства классов объектов в плане их разделения. Отношения на множестве ХП дают возможность анализировать сочетания признаков, которые в информационном плане часто более значимы для распознавания, чем сами признаки. Никаких требований на способ построения компонент не накладываем, в частности, допускается их пространственное пересечение. ХП характеризуют свойства изображения объекта в конкретных точках и независимо отражают особенности пространственных образований пикселей. Компоненты отражают связь ХП и могут быть зависимы между собой.

Учитывая, что элементы описания  $Z$  содержат информацию о координатах и значении ХП, то варианты иерархии  $H(Z)$  предполагают пространственную (в плане координат) и/или дескрипторную (в плане значений ХП) группировку элементов, которая может быть реализована, в частности, путем применения отношений [3]. Один из вариантов — построение системы глобальных признаков по структурным описаниям  $Z_1, Z_2$  и, соответственно, вычисление (1) как подобия для самого высокого уровня представления

$$\mathcal{G}[\cdot] = \mathcal{G}_m[h_m(Z_1), h_m(Z_2)]. \quad (2)$$

Вычисление подобия (1), (2) по сравнению с традиционным вычислением сходства, например, с применением корреляционного подхода, обладает тем важным преимуществом, что в процессе формирования уровней и при вычислении подобия между описаниями на уровнях иерархии появляется возможность селекции ложных ХП путем введения логической обработки при построении функции  $\varphi$  и анализе значений  $\mathcal{G}_k$ .

## Примеры иерархий

Иерархия может быть построена как на предварительном этапе распознавания (например, путем осуществления кластеризации на множествах  $Z_1, Z_2$ ), так и непосредственно в процессе сопоставления описаний путем отбора схожих элементов множеств (или компонент из элементов).

**Пример 1.** При преобразованиях видеообъектов, описываемых действием аффинной группы, для множества координат элементов из описания  $Z$  применим отображение  $Z \rightarrow W$  и построим множество  $W = \{(\xi, \eta)\}$ ,  $\xi, \eta \in R^1$ , пар аффинных инвариантов [1], которые являются иерархическими признаками для распознавания. Каждый элемент  $(\xi, \eta) \in W$  в соответствии с теорией инвариантов формируется путем представления точки в базисе из трех координат, фактически представляет собой инвариантное геометрическое отношение и с точки зрения иерархии принадлежит уровню  $h_2$  описания (см. рисунок). На основе уровня  $h_2$ , полученного таким образом, в работе [4] предложено формирование уровня  $h_3$  путем построения отношений для элементов из  $h_2$ . Результат иерархического представ-

ления описывается отображением  $Z \rightarrow W \rightarrow R_W$ , где  $R_W$  — отношение на  $W$ . Представленная иерархия основана на пространственных отношениях элементов из  $Z$ , так как опирается только на информацию о координатах.

**Пример 2.** Перейдем от множества  $Z$  к совокупности пар  $Z^2 = \{(z^i, z^k) \mid i \neq k\}$ ,  $z^i \in Z$ ,  $z^k \in Z$ . Реализуем процедуру вычисления подобия при сопоставлении структурных описаний в виде голосования пар  $(z^i, z^k)$ . Голос пары фиксируется, если предикат

$$\Psi[\rho(z_1^i, z_2^k), \rho(z_1^p, z_2^q), \delta] = \begin{cases} 0, & [\rho(z_1^i, z_2^k) \leq \delta] \& [\rho(z_1^p, z_2^q) \leq \delta] \\ 1, & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

принимает нулевое значение, где  $i, p$  — номера элементов из  $Z_1$ ;  $k, q$  — из  $Z_2$ ;  $\rho: \mathcal{U} \times \mathcal{U} \rightarrow [0, 1]$  — нормированная метрика на  $\mathcal{U}$ ;  $\delta$  — порог эквивалентности для значений ХП. Одновременное выполнение двух неравенств в (3) соответствует отношению на множестве значений пар ХП. Здесь метрику  $\rho$  можно понимать как в смысле значений ХП, так и в плане их координат. Учитывая, что значения ХП, как правило, вычисляются инвариантным образом к некоторой группе преобразований, а координатные отношения требуют вычисления дополнительных инвариантов для этой группы, предикат типа (3) чаще используется в пространстве значений ХП. Предикат (3) обобщается на случай большей арности (3, 4 и т.д.), его можно также использовать совместно с признаками аффинных инвариантов из примера 1.

**Пример 3.** Применим иерархический анализ непосредственно при вычислении мер подобия вида (1). Один из вариантов — обработка в соответствии с некоторой процедурой совокупности значений меры подобия, вычисленной на предыдущем уровне [2, 7]. Вариант меры представим как

$$\mathcal{G}[\cdot] = \Psi_m[\Psi_{m-1}[\dots \Psi_1[\{\mathcal{G}_{1pq}(z_1^p, z_2^q)\}]\dots]], \quad (4)$$

где  $\{\mathcal{G}_{1pq}(\cdot)\}$  — множество значений меры подобия  $\mathcal{G}_1$ , полученных на первом уровне;  $\Psi_m, \Psi_{m-1}, \dots, \Psi_1$  — процедуры построения и обработки значений мер на соответствующих уровнях, которые в общем случае различаются для разных уровней. Мера (4) позволяет не только устранять влияние пространственных помех с применением логической обработки  $\Psi_i$ , но и целенаправленно управлять формированием меры подобия на этом уровне. Как правило, на первом уровне (описание  $Z$ ) в качестве меры используется метрика  $\rho(z_1^i, z_2^j)$ , что обеспечивает однозначность установления соответствий ХП [2]. На последующих уровнях метрические свойства не всегда удается сохранить из-за сложности построения и вида логической обработки  $\Psi_i$ . Одним из вариантов обработки  $\Psi_i$  может быть сжатие описания [7].

## Эффективность применения иерархий. Выводы

Геометрические и комбинаторные структуры на множестве ХП повышают достоверность распознавания за счет более точной аппроксимации объекта. Информативность иерархических признаков, как правило, существенно выше. Применение иерархии в целом улучшает интегральные свойства сопоставления в плане устойчивости к влиянию аддитивных помех на изображение, уменьшая в то же время возможности по селекции пространственных помех типа фона и наложений. Это объясняется тем, что признаки высоких уровней строятся на основе сочетаний и могут включать ложные элементы. Если исходить из назначения мер вида (1) и (4) именно для селекции пространственных помех, то при формировании и сопоставлении иерархий можно рекомендовать применение двух- или трехместных отношений (не выше).

Эффективность иерархических признаков по сравнению с традиционными подходами подтверждается более низким показателем вероятности ложной тревоги при распознавании [2, 6], что снижает общую вероятность ошибки. Полученные в эксперименте для реальных баз данных предельные соотношения сигнал-шум, при которых обеспечивается вероятность правильного распознавания выше 0,95, составили: для традиционного метода — 5,5; для метода с использованием пар — 1,4. Это подтверждает более высокую помехозащищенность при применении иерархий.

Другим критерием может быть достоверность решения, оцениваемая усредненным отношением локального максимума голосов к глобальному (для правильного решения) при распознавании в условиях помех. Типичные отношения составляют: для одиночных ХП — 0,88; для пар — 0,58; для триад — 0,39. Этим подтверждается эффективность признаков высоких уровней, так как для пар и триад показатель достоверности выше.

Введение иерархического анализа несколько увеличивает вычислительную сложность обработки. Использование отношений при построении иерархии приводит к росту базового числа признаков, которые можно применить при распознавании. Например, мощность множества пар элементов, принадлежащих симметричному бинарному отношению  $R_A$  на множестве  $A$ , определяется числом сочетаний  $n_R = C_n^2 = n(n-1)/2$ , где  $n$  — мощность  $A$ . Величина  $n_R$  в  $(n-1)/2$  раза больше числа элементов исходного множества. Еще большее число элементов по отношению к исходному множеству содержат множества отношений с арностью 3 или 4. Однако наши исследования показали, что путем построения подмножеств иерархического описания удается сократить объем вычислений по сравнению с традиционным подходом в 2–3 раза без существенного снижения показателя помехозащищенности [4, 7].

Применение иерархий на структурном описании визуальных объектов позволяет улучшить эффективность распознавания в плане влияния пространственных помех. Впервые показано, что иерархии признаков улучшают гибкость, универсальность анализа и повышают достоверность распознавания за счет более точного представления объекта в сформированном описании. Предложены и изучены варианты иерархий с применением пространственных и атрибутивных отношений, а также применения иерархических мер подобия описаний.

Практически важным является получение предпочтительных характеристик распознавания по сравнению с известными методами в зависимости от способа построения и сопоставления иерархий, что говорит о целесообразности их применения в задачах компьютерного зрения.

Перспективы исследования состоят в разработке подходов адаптации вида иерархического представления и анализа в зависимости от разновидности и уровня помех.

1. *Шапиро Л.* Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман [пер. с англ. А.А. Богуславского; под ред. С.М. Соколова]. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с.

2. *Гороховатский В.А.* Структурное распознавание изображений на основе моделей голосования признаков характерных точек / В.А. Гороховатский, Е.П. Путятин // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10. — № 4. — С. 75–85.

3. *Гороховатский В.А.* Применение отношений на множестве характерных признаков изображений при распознавании на основе голосования / В.А. Гороховатский // Бионика интеллекта. — 2008. — № 1(68). — С. 87–93.

4. *Гороховатский В.А.* Иерархия пространственных отношений структурных признаков в задачах сопоставления визуальных объектов / В.А. Гороховатский // Системи управління, навігації та зв'язку: зб. наук. пр. — К.: ЦНДІ навігації і управління. — 2008. — Вип. 3(7). — С. 85–89.

5. *Месарович М.* Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. — М: Мир, 1973. — 344 с.

6. *Гороховатський В.О.* Дослідження завадостійкості методів зіставлення множин структурних елементів / В.О. Гороховатський, Р.В. Гребінник // Штучний інтелект. Інтелектуальні системи (ШІ-2008): 9-та міжн. наук.-техн. конф. — Донецьк–Кацивелі, 22–27 верес. 2008 р. — Донецьк: ППШ «Наука і освіта». — 2008. — Т. 1. — С. 301–305.

7. *Гороховатский В.А.* Иерархические меры в структурном распознавании изображений с применением сжатия описаний / В.А. Гороховатский, Р.В. Гребинник // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2009. — Т. 11, № 3. — С. 26–33.

Поступила в редакцию 13.09.2010