УДК 621.32

МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ОБЪЕКТОВ

К.С. Смеляков
(представил д.т.н., проф. Е.П. Путятин)

Предложен подход к решению задачи идентификации нерегулярных изображений. Описаны основы модели анализа изображений, обеспечивающей адаптацию нерегулярных объектов по геометрическим и цветовым параметрам.

1. Суть проблемы. При разработке систем автоматизации обработки видеоинформации возникает задача анализа цветных изображений с целью выделения объектов, некоторые геометрические и цветовые параметры которых могут быть заранее неизвестны или варьироваться в достаточно широких пределах. Такие задачи возникают, например, при выявлении и подсчете числа солнечных пятен, типа и плотности облачного покрова, при поиске месторождений по снимкам земной поверхности. При этом само изображение сцены задается функцией яркости на дискретном поле, в узлах которого задана векторная функция, определяющая яркость по трем цветам. Это приводит к необходимости разработки такой модели анализа изображений, которая обеспечивала бы адаптацию на сцену по геометрическим и цветовым параметрам изображения. Построению основ такой модели и подхода к решению соответствующей задачи идентификации нерегулярных изображений и посвящена данная работа.

2. Основные элементы модели. На плоскости с системой координат $\mathbf{\Sigma = \{O; x, y\}}$ имеется несколько односвязных замкнутых областей $\mathbf{F_0}, \mathbf{F_1}, \ldots, \mathbf{F_n}$, границы которых представлены простыми замкнутыми линиями $\mathbf{L_i}$ $\mathbf{(i = 1, 2, ..., n)}$. Эти области удовлетворяют условиям:

$$\mathbf{F_0 \supset F_i}, \quad \mathbf{(i = 1, 2, ..., n)}; \tag{1}$$

$$\mathbf{F_i \bigcap F_j = \varnothing}, \quad \mathbf{(i \neq j\,;\ i, j = 1, 2, ..., n)}. \tag{2}$$

Условия (1) и (2) означают, что с топологической точки зрения области $\mathbf{\{F_i\}_{i=\overline{1,n}}}$ взаимно не пересекаются и расположены в области $\mathbf{F_0}$, которую назовем сценой. Не теряя общности, положим, что область $\mathbf{F_0}$ задана прямоугольником со сторонами $\mathbf{Mh}$ и $\mathbf{Nh}$, параллельными осям

$\mathbf{Ox}$ и $\mathbf{Oy}$, соответственно, где $\mathbf{M}$ и $\mathbf{N}$ – натуральные числа, а $\mathbf{h}$ – шаг сетки. Разность

$$\mathbf{F = F_0 \setminus \bigcup_{i=1}^{n} F_i} \tag{3}$$

назовем фоном. Тогда сцена – это объединение фона $\mathbf{F}$ и изображений объектов $\mathbf{F_1}$, $\mathbf{F_2}$, … , $\mathbf{F_n}$.

В общем случае для каждого объекта $\mathbf{F_0}$, $\mathbf{F_1}$, … , $\mathbf{F_n}$ задана векторная функция $\mathbf{\vec{u}_i(x,y,t) = (r(x,y,t), g(x,y,t), b(x,y,t))}$, определяющая яркость фона и объектов в точке $\mathbf{(x,y)}$ в момент времени $\mathbf{t}$ для заданных спектральных диапазонов красного, зеленого и синего цветов, соответственно. При этом

$$\mathbf{\vec{u}_0(x,y,t) = \begin{cases} 0, & (x,y) \notin F; \\ \vec{w}(x,y,t), & (x,y) \in F; \end{cases}} \tag{4}$$

$$\mathbf{\vec{u}_i(x,y,t) = \begin{cases} 0, & (x,y) \in F_0 \setminus F_i; \\ \vec{w}_i(x,y,t), & (x,y) \in F_i, \quad i = \overline{1, n}). \end{cases}} \tag{5}$$

Выражения (4), (5) определяют отсутствие суперпозиции распределений цветовых полей, т.е. объект $\mathbf{F_i}$ “закрывает” излучение соответствующей ему части фона.

Вместе с тем, при анализе сцены мы имеем дело не с самими объектами, а с их изображениями, т.е. с сеточным представлением объектов и фона на дискретном поле элементов $\mathbf{D = \{d_{ij}\}_{i=\overline{1,M};\, j=\overline{1,N}}}$ размером $\mathbf{M \times N}$. В этом случае сцена $\mathbf{F_0}$ отображается во все поле $\mathbf{D}$, а сеточным аналогом объекта $\mathbf{F_i}$ $\mathbf{(i = 1, 2, ..., n)}$ будет некоторое подмножество $\mathbf{f_i = \{d_{\xi\eta}^{(i)}\}_{\xi\eta}}$ элементов поля $\mathbf{D}$.

Будем считать, что шаг $\mathbf{h}$ сетки, ячейке которой соответствует элемент $\mathbf{d_{\xi\eta}}$, достаточно мал по сравнению с линейными размерами любого объекта $\mathbf{F_i}$ $\mathbf{(i = 1, 2, ..., n)}$, так что внутренняя часть любого из этих объектов содержит хотя бы один из элементов типа $\mathbf{d_{\xi\eta}}$. Тогда элементы $\mathbf{d_{\xi\eta}}$ и $\mathbf{d_{kl}}$ назовем смежными, если выполняется условие

$$\mathbf{|\xi - k| + |\eta - l| = 1.} \tag{6}$$

В силу технических особенностей получение изображения сцены и объектов заранее неизвестно, какое значение получит функция яркости

$\vec{u}_i(\xi,\eta,t)$ для соответствующего элемента $d_{\xi\eta}$. Однако, в первом приближении можно считать, что

$$\vec{w}_i(\xi,\eta,t) = \frac{1}{h^2} \iint\limits_{d_{\xi\eta}} \vec{w}_i(x,y,t)\,dx\,dy\,, \tag{7}$$

где h^2 – площадь элемента (пикселя) $d_{\xi\eta}$. В частности, если фон и каждый из объектов однородны по яркости, то элементарные области $d_{\xi\eta}$, попадающие во внутренность объектов F_1, F_2, …, F_n, будут иметь одни и те же значения $\vec{w}_i(t)$ функции (7), а яркость элемента $d_{\xi\eta}$, содержащего граничные точки объекта F_i, можно оценить величиной

$$\vec{w}^*_{\xi\eta} = \frac{S_0\vec{w}_0(t) + S_i\vec{w}_i(t)}{h^2}\,, \tag{8}$$

где S_0 (S_i) - площадь области $d_{\xi\eta} \cap F$ ($d_{\xi\eta} \cap F_i$, соответственно).

3. Дискриминация изображений нерегулярных объектов. Допустим, что форма и размеры объектов F_1, F_2, … , F_n заранее неизвестны, но известно, что для каждого их трех цветов объекты отличаются от фона по яркости. Не теряя общности, рассмотрим случай, когда яркость w фона по каждому цвету ниже яркости хотя бы одного элемента $d_{\xi\eta}$, принадлежащего внутренности объекта.

Два элемента $d_{\xi\eta}$ и $d'_{\xi\eta}$ назовем линейно связными в совокупности элементов $D^* \subset D$, если в D^* существует последовательность смежных элементов с начальным $d_{\xi\eta}$ и конечным $d'_{\xi\eta}$. Тогда компонентой (связности) $D(w^*)$ элементов назовем совокупность элементов с уровнем яркости не ниже w^*, каждая пара из которых линейно связна. Заметим, что, если в некоторой подобласти области F_i значение яркости ниже w^*, то компонента $D(w^*)$ может не быть односвязной (т.е. может иметь структуру с “дырками”, подобную области F). При этом объединение двух односвязных компонент – компонента, тогда как пересечение или разность двух компонент может не быть связным множеством, т.е. компонентой.

Базовая задача. Выделить все компоненты связности сцены D , яркость которых не ниже заданного значения

$$w^* = \min_{d_{\xi\eta} \in f_i;\; i=1,2,\ldots n} w_i(\xi,\eta,t). \tag{9}$$

Общая задача. Выделить компоненты связности изображений, соответствующие объектам $\mathbf{F_1}$, $\mathbf{F_2}$, … , $\mathbf{F_n}$.

В случае, если расстояние (в смысле минимальной длины цепочки связных элементов) между объектами превышает два элемента и уровень фона не превышает $\mathbf{w^*}$ (заметим, что значения $\mathbf{w^*}$ для различных частей спектра могут быть различными), то для каждого объекта $\mathbf{F_i}$ существует хотя бы одна компонента: одна односвязная $\mathbf{f_i}$, в случае однородности поля $\vec{\mathbf{w}}_\mathbf{i}(\mathbf{t})$, и, возможно, несколько несвязных не односвязных компонент в случае, когда (9) не может быть выполнено в силу того, что некоторые внутренние области объектов имеют яркость $\vec{\mathbf{w}}_\mathbf{i}(\xi,\eta,\mathbf{t})$, сравнимую с яркостью фона.

В первом случае решение $\{\mathbf{f_i}\}_{\mathbf{i}=\overline{\mathbf{1,n}}}$ базовой задачи дает решение общей задаче. Оно может быть получено посредством выделения максимальных компонент связности на основе применения алгоритма наращивания областей [1] с использованием индикаторной функции $\mu_{\xi\eta}$ со значениями 0 (для фона) и 1 (для элементов, где уровень яркости превышает $\mathbf{w^*}$).

Во втором случае заменяем не односвязные компоненты соответствующими односвязными, включая в их состав “выколотые” подобласти, и принимаем их за решение общей задачи. Однако, в этом случае одному объекту может соответствовать несколько компонент. При наличии дополнительной информации подобное решение можно уточнить, поскольку для различных частей спектра свойства объектов могут сохраняться или изменяться во времени, что имеет место для солнечных пятен и других приложений, когда необходимо выделять изображения с некоторым шагом τ по времени, в течение которого необходимо произвести идентификацию всех изображений.

В связи с этим для выявления неоднородных (по яркости) объектов предлагается использовать индикаторные функции $\mu^{\alpha}_{\xi\eta}, \alpha \in \{\cap, \mathbf{Fuz}, \cup\}$, определяющие: в первом случае - четкую (10) или нечеткую (11) конъюнкцию, а во втором – нечеткую дизъюнкцию (12) для индекса яркости $\mu^{\lambda}_{\xi\eta}, \lambda \in \{\mathbf{r},\mathbf{g},\mathbf{b}\},$ равного 1, если элемент $\mathbf{d}^{\lambda}_{\xi\eta}$ отнесен к какой либо компоненте по критерию $\mathbf{w}^*_\lambda$, и 0 – в противном случае. Тогда:

$$\mu^{\cap}_{\xi\eta} = \mu^{\mathbf{r}}_{\xi\eta} \cdot \mu^{\mathbf{g}}_{\xi\eta} \cdot \mu^{\mathbf{b}}_{\xi\eta} \;; \tag{10}$$

$$\mu^{\mathbf{Fuz}}_{\xi\eta} = \frac{1}{3}\,(\mu^{\mathbf{r}}_{\xi\eta} + \mu^{\mathbf{g}}_{\xi\eta} + \mu^{\mathbf{b}}_{\xi\eta}) \;; \tag{11}$$

$$\mu_{\xi\eta}^{\cup} = 1 - (1-\mu_{\xi\eta}^{r}) \cdot (1-\mu_{\xi\eta}^{g}) \cdot (1-\mu_{\xi\eta}^{b}). \qquad (12)$$

4. Выделение границ изображений нерегулярных объектов. Помимо идентификации компонент часто требуется построить границы объектов. Так, назовем элемент $\mathbf{d}_{\xi\eta}$ компоненты $\mathbf{D(w^*)}$ граничным, если существует смежный ему элемент фона. Границей $\mathbf{Fr\,D(w^*)}$ изображения, соответствующего компоненте $\mathbf{D(w^*)}$, естественно было бы назвать множество подобных граничных точек; однако, подобная совокупность может не обладать топологическими свойствами замкнутой линии, поскольку может включать линейные структуры типа "ветвей". Кроме того, в этом случае, даже исключив линейные ветви, придем к описанию границы в виде ломаной $\mathbf{LD(w^*)}$ с числом вершин, по порядку величины равным

$$\mathbf{K_{LD}} \approx \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \mathbf{K(D(w^*))}}\,, \qquad (13)$$

исходя из соотношения для периметра окружности и площади ограничиваемого ею круга, где $\mathbf{K(D(w^*))}$ – число элементов (пикселей), образующих изображение компоненты $\mathbf{D(w^*)}$. В связи с этим, при малой величине шага $\mathbf{h}$ сетки, возникает **задача аппроксимации границы изображения**: с требуемой точностью $\varepsilon > 0$ аппроксимировать ломаную $\mathbf{LD(w^*)}$ линией заданного функционального класса Λ.

Решение этой задачи может быть получено с помощью известных методов [2], которые определяются требованиями к рассматриваемой прикладной задаче.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия. – М.: Мир, 1989. – 478 с.

Поступила в редколлегию 25.10.2000