АВТОМАТИЧЕСКАЯ НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е. П. Путятин, Б. К. Лопатченко, В. Б. Левиков, О. М. Абрамов

Разработка операторов нормализации изображений, подвергнутых комбинированным преобразованиям, имеет важное значение при конструировании устройств для распознавания образов, следящих систем и т. д. Алгоритмы и устройства отстройки от ряда аффинных преобразований [1—3] используются при темном фоне. В реальных условиях эксплуатации технических устройств преобразованию часто подвергается не только носитель, но и сама функция яркости, описывающая изображение. В этом случае приведенные алгоритмы не могут применяться. Использование для отстройки алгоритмов, описанных в работе [4], вместе с алгоритмами отстройки от аффинных преобразований значительно усложнит такое устройство и увеличит время нормализации. Поэтому важно располагать алгоритмами параллельной отстройки от всего комплекса преобразований, необходимого для данного устройства.

Примером таких преобразований изображений могут служить произвольные растяжения (сжатия) картин при одновременном изменении уровня яркости.

1. Для изображений, начало координат которых совпадает с оптическим центром тяжести, произвольные изменения уровня яркости и масштабов по осям образуют класс эквивалентности, в котором функции изображений связаны соотношением

$$\begin{gathered} B(x, y) = kB_0(\lambda x, \mu y), \\ k \neq 0; \quad \lambda \neq 0; \quad \mu \neq 0. \end{gathered} \tag{1}$$

Задачи, приводящие к таким преобразованиям, возникают в том случае, если на темном фоне в поле зрения устройства нормализации на разных расстояниях предъявляются плоские объекты, причем освещенность в пространстве неравномерна по глубине. Тогда изменения функций изображений связаны соотношением (1) с коэффициентами $\lambda = \mu$. Коэффициенты будут меняться также в процессе поворота плоских объектов вокруг вертикальной либо горизонтальной осей, лежащих в плоскости, перпендикулярной к оптической оси устройства. При этом изменятся коэффициенты λ либо μ для проекции изображения на эту плоскость. Одновременно будет меняться величина k (кроме случая равномерной освещенности в пространстве для поверхностей, подчиняющихся закону Ламберта).

Для получения нормализованных картин перспективные искажения должны быть небольшими. Это достижимо, если линейные размеры объекта невелики по сравнению с расстоянием между ним и объективом устройства.

Рассмотрим процесс построения оператора нормализации для таких картин. Осуществим последовательную нормализацию для группы диагональных преобразований, а затем — для пропорционального изменения яркости. Воспользуемся оператором нормализации для диагональных преобразований [3]

$$F_1[B(x, y)] = B[\Phi_1(B)x, \ \Phi_2(B)y], \tag{2}$$

где

$$\Phi_1(B) = \sqrt{\frac{\iint\limits_D B(x, y)\, x^2 dxdy}{\iint\limits_D B(x, y)\, dxdy}}; \tag{3}$$

$$\Phi_2(B) = \sqrt{\frac{\iint\limits_D B(x, y)\, y^2 dxdy}{\iint\limits_D B(x, y)\, dxdy}}.$$

Чтобы нормализовать изменения коэффициента яркости, воспользуемся нормализатором F_2:

$$F_2[B(x, y)] = \frac{B(x, y)}{\sqrt[m]{\iint\limits_D [B(x, y)]^m K(x, y)\, dxdy}}. \tag{4}$$

Как следует из работы [3], с целью нормализации преобразований вида (1) путем применения суперпозиции операторов F_2F_1 необходимо выполнить условие

$$F_1[k \cdot B] = k \cdot F_1(B). \tag{5}$$

С учетом $\Phi_1(kB) = \Phi_1(B)$ и $\Phi_2(kB) = \Phi_2(B)$ левая часть уравнения (5) запишется в виде

$$F_1[kB] = kB[\Phi_1(B)x, \ \Phi_2(B)y],$$

т. е. равенство (5) действительно имеет место. Нормализованное (эталонное) изображение выразится через исходное соотношением

$$B_0(x, y) = F_2F_1[B(x, y)] = \frac{B[\Phi_1(B)x, \ \Phi_2(B)y]}{\Phi_3(B)}, \tag{6}$$

где

$$\Phi_3(B) = \sqrt[m]{\iint\limits_D \{B[\Phi_1(B)x, \ \Phi_2(B)y]\}^m K(x, y)\, dxdy} =$$

$$= \sqrt[m]{\iint\limits_D [B(u, v)]^m K\left[\frac{u}{\Phi_1(B)}, \ \frac{v}{\Phi_2(B)}\right] \frac{dudv}{\Phi_1(B)\,\Phi_2(B)}}. \tag{7}$$

В частности, при $K(x, y) \equiv 1$ и $m = 1$

$$\Phi_3(B) = \frac{\left[\iint\limits_D B(x, y)\, dxdy\right]^2}{\sqrt{\iint\limits_D B(x, y)\, x^2 dxdy \cdot \iint\limits_D B(x, y)\, y^2 dxdy}}. \tag{8}$$

2. Для автоматической нормализации изображений при пропорциональных изменениях яркости и произвольных смещениях условие преобразований запишется следующим образом:

$$B(x, y) = kB_0(x - l, \ y - m). \tag{9}$$

Этот случай имеет важное значение для проектирования следящих систем. Измерительное устройство, в основе которого лежит подобный алгоритм, позволяет следить за полутоновыми объектами, произвольно расположенными в поле зрения при различных условиях освещенности.

Построим оператор нормализации. Для этого последовательную нормализацию проведем сначала для группы смещений, используя оператор [3]:

$$F_1[B(x, y)] = B[x + \Phi_1(B), \ y + \Phi_2(B)], \tag{10}$$

где

$$\Phi_1(B) = \frac{\iint\limits_D B(x, y)\, x dxdy}{\iint\limits_D B(x, y)\, dxdy}; \ \Phi_2(B) = \frac{\iint\limits_D B(x, y)\, y dxdy}{\iint\limits_D B(x, y)\, dxdy},$$

а затем — для пропорционального изменения яркости с использованием оператора $F_2[B(x, y)]$ в форме (4).

Здесь, как и в предыдущем случае, выполняется необходимое условие нормализации $F_1(kB) = kF_1(B)$. Переходя от последовательной нормализации к параллельной, получаем общий оператор нормализации

$$B_0(x, y) = F_2F_1[B(x, y)] = \frac{B[x + \Phi_1(B), \ y + \Phi_2(B)]}{\Phi_3(B)}, \tag{11}$$

где

$$\Phi_3(B) = \sqrt[m]{\iint\limits_D \{B[x + \Phi_1(B), y + \Phi_2(B)]\}^m K(x, y)\, dxdy} =$$

$$= \sqrt[m]{\iint\limits_D [B(u, v)]^m K[u - \Phi_1(B), \ v - \Phi_2(B)]\, dudv}. \tag{12}$$

В простейшем случае при $m = 1$ и $K(x, y) \equiv 1$

$$\Phi_3(B) = \iint\limits_D B(x, y)\, dxdy. \tag{13}$$

3. Для преобразования подобия

$$B(x, y) = kB_0(\lambda x, \lambda y) + C \tag{14}$$

вначале используем оператор нормализации яркостных преобразований, предложенный в работе [4]:

$$F[B(x, y)] = \frac{B(x, y) - \Phi_1(B)}{\Phi_2'(B) - \Phi_2''(B)}, \tag{15}$$

где функционалы $\Phi_2'(B)$ и $\Phi_2''(B)$ удовлетворяют условию

$$\Phi_2'(B) = k\Phi_2'(B_0) - c;$$
$$\Phi_2''(B) = k\Phi_2''(B_0) - c. \qquad (16)$$

Затем воспользуемся оператором нормализации подобия. В качестве нормализатора подобия применяем оператор

$$F_2[B(x, y)] = B\{\Phi_3[B(x, y)]\,x,\ \Phi_3[B(x, y)]\,y\}, \qquad (17)$$

где

$$\Phi_3[B(x, y)] = \frac{\sqrt[P_1]{\iint\limits_D B(x, y)\,x^{m_1}y^{n_1}\,dxdy}}{\sqrt[P_2]{\iint\limits_D B(x, y)\,x^{m_2}y^{n_2}dxdy}};\quad \frac{m_1+n_1+2}{P_1} -$$

$$- \frac{m_2+n_2+2}{P_2} = 1. \qquad (18)$$

В простейшем случае при $P_1 = P_2 = 1,\ n_1 = n_2 = m_2 = 0,\ m_1 = 1$

$$\Phi_3[B(x, y)] = \frac{\iint\limits_D B(x, y)\,xdxdy}{\iint\limits_D B(x, y)\,dxdy}. \qquad (19)$$

В результате суперпозиции получаем результирующий оператор вида

$$F_2F_1[B(x, y)] = B_0(x, y) = \frac{B\{\Phi_2[F_1(B)]\,x,\ \Phi_3[F_1(B)]\,y\} - \Phi_1[B(x, y)]}{\Phi_2'[B(x, y)] - \Phi_2''[B(x, y)]}, \qquad (20)$$

где

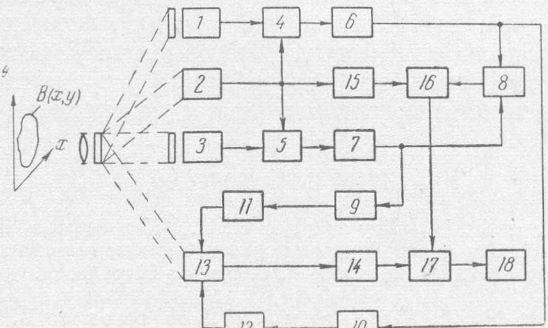
$$\Phi_1(B) = \Phi_2'(B) = \frac{\iint\limits_D B(x, y)\,\frac{1}{x^2}\,dxdy}{\iint\limits_D \frac{1}{x^2}\,dxdy};$$

$$\Phi_2''[B(x, y)] = \frac{\iint\limits_D B(x, y)\,\frac{1}{xy}\,dxdy}{\iint\limits_D \frac{1}{xy}\,dxdy}; \qquad (21)$$

$$\Phi_3[F_1(B)] = \frac{\iint\limits_D [B(x, y) - \Phi_1(B)]\,xdxdy}{\iint\limits_D [B(x, y) - \Phi_1(B)]\,dxdy}.$$

В качестве примера технической реализации алгоритмов нормализации рассмотрим оператор (6) с функционалами (3) и (8).

Блок-схема такого устройства представлена на рисунке. В его состав входят фотоприемники (типа ФЭУ) *1—3*, делительные устройства *4* и *5*, функциональные блоки извлечения квадратного корня *6* и *7*, аналоговое множительное устройство *8*, генераторы кадровой и строчной разверток *9* и *10*, отклоняющие катушки кадровой (*11*) и строчной (*12*) разверток, передающая телевизионная трубка *13*, видеоусилитель *14*, блок возведения в квадрат *15*, делительное устройство *16*, множительное устройство *17*, видеоконтрольное устройство *18*.



Изображение объекта, заданного функцией лучистой яркости $B(x, y)$, попадая в поле зрения объектива, через светоделительное устройство одновременно подается на светочувствительные входы фотоприемников *1—3* и передающей телевизионной трубки *13*. При этом на входы фотоприемников *1* и *3* изображение проектируется через пространственные фильтры, оптическая плотность которых изменяется по квадратичному закону соответственно вдоль осей x и y. Если световая характеристика фотоприемника линейна, то сигналы с выходов фотоприемников *1—3* соответственно будут пропорциональны величинам

$$\iint_D B(x, y)\, x^2 dx dy; \quad \iint_D B(x, y)\, dx dy; \quad \iint_D B(x, y)\, y^2 dx dy.$$

Делительные устройства *4* и *5* вычисляют отношения

$$\frac{\iint_D B(x, y)\, x^2 dx dy}{\iint_D B(x, y)\, dx dy}; \quad \frac{\iint_D B(x, y)\, y^2 dx dy}{\iint_D B(x, y)\, dx dy}.$$

Функциональные блоки вычисления квадратного корня *6* и *7* на выходе дают значения функционалов $\Phi_1(B)$ и $\Phi_2(B)$. Множительное устройство *8*, блок возведения в квадрат *15*, делительное устройство *16* вычисляют $\frac{1}{\Phi_3(B)}$. Определенные таким образом функционалы воздействуют на блоки телевизионной системы. Сигнал, пропорциональный функционалу $\Phi_1(B)$, управляет амплитудой строчной развертки генератора *9*, изменяя ширину растра передающей трубки *13*. Аналогично функционал $\Phi_2(B)$ меняет высоту растра, воздействуя на генератор кадровой развертки *10*. Это обеспечивает нормализацию при растяжении изображения по осям x и y. Окончательную нормализацию по яркости обеспечивает множительное устройство *17*, на один вход которого подается видеосигнал с передающей трубки *13* через видеоусилитель *14*, а на другой — напряжение, пропорциональное величине $\frac{1}{\Phi_3(B)}$. Нормализованный сигнал обеспечивает на видеоконтрольном устройстве *18* эталонное изображение, инвариантное изменениям размера и яркости входного изображения, которые описываются формулой (1). В принципе могут быть разработаны устройства нормализации, реализующие иные алгоритмы, предложенные в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П., Абрамов О. М. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 102—106.

2. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П. Построение инвариантов смещения и поворота зрительных картин. Сб. «Биологическая, медицинская кибернетика и бионика», вып. 3. Ин-т кибернетики АН УССР, Киев, 1970, с. 51—64.

3. Путятин Е. П., Левиков В. Б., Юрченко В. П., Абрамов О. М., Берман В. А. О нормализации изображений при аффинных преобразованиях. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972, с. 44—52.

4. Путятин Е. П., Лопатченко Б. К., Левиков В. Б., Сердюченко В. Я. Нормализация изображений при изменении яркости и контрастности (статья в настоящем сборнике), с. 5—13.

ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ЛОГИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

С. И. Шапиро

Процесс свертывания мыслительных структур у человека при усвоении понятий с помощью алгоритмов завершается образованием неполных операторно-логических форм — логических координат [1, 2], например: для понятия высоты треугольника — «перпендикуляр к стороне», медианы — «делит сторону пополам», биссектрисы — «делит угол пополам» и т. д. Они имеют эвристическую природу, служат для «первого наведения» и играют важную роль в феномене инсайта, когда для решения задачи неизвестны регуляторные методы.

Для оценки эффективности механизма логических координат в математическом мышлении посредством теоретико-информационных методов воспользуемся теоремой Шеннона.