

УДК 681.3.07



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

О.А. Кобылин

ХНУРЭ, м. Харьков, Украина, kblin@kture.kharkov.ua

Использование уменьшенных копий изображения, полученных в результате применения вейвлет-разложения, позволяет эффективно проводить компенсацию геометрических искажений, возникающих в системах технического зрения. Рассмотрены базовые модели геометрических искажений. Использование уменьшенных копий изображения позволяет сократить время методов его нормализации.

НОРМАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ, ГРУППА ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ, ЭТАЛОН

Введение

В системах технического зрения (СТЗ) используется множество различных методов обработки изображения [1, 4]. Однако не все они достаточно эффективны для различных типов изображений. Эффективность методов обработки изображений зависит от способа их представления. Именно от способа представления изображения зависит результативность его анализа. Существуют различные способы представления, такие как – частотная область Фурье, область Гильбертова представления и другие. Далеко не все способы представления информации приемлемы для использования в современных СТЗ. Поэтому на современном этапе развития СТЗ наблюдается большой интерес к разработке новых способов представления информации, в частности, используются различные алгоритмы быстрого преобразования Фурье, варианты косинусного и синусного преобразования, алгоритмы быстрого преобразования Хартли и другие.

В современных СТЗ необходимо в реальном масштабе времени проводить геометрическую компенсацию изображений для последующего сравнения с эталоном. Одним из методов, используемым в СТЗ, является нормализация изображений.

Нормализация изображения заключается в компенсации геометрических преобразований, полученных в результате отклонения входного изображения от эталонного. В зависимости от группы преобразования вычисляются параметры, позволяющие компенсировать геометрические преобразования. В зависимости от решаемой задачи допускается, что объект подвергнут искажениям и находится в заданной группе преобразований. Определение вида преобразования позволяет существенно сократить время на определение параметров для компенсации геометрических преобразований.

Цель работы – используя вейвлет – разложение изображения, провести геометрическую компенсацию искажений, возникающих в СТЗ в заданной группе преобразований.

Вейвлет-преобразование является одним из видов спектрального анализа.

Вейвлет-преобразование (wavelet transform) в настоящее время получило распространение во многих сферах применения обработки изображений: в медицине, в астрономии, в промышленности, системах компьютерной графики и других отраслях.

Главная идея вейвлетного преобразования – частотно-временное представление сигнала [2, 3].

Под вейвлет-преобразованием (wavelet transform) понимают разложение с помощью функций, каждая из которых является сдвинутой и масштабированной копией одной функции – материнского вейвлета [3].

Вейвлет-преобразование функции $f(t)$ определяется выражением:

$$W[f(t)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где a – масштаб; b – центр временной локализации; функция $\varphi(t)$ является материнским вейвлетом и удовлетворяет условию $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0$.

Если изображение представлено в виде $B(x, y) \in L_2(R)$ (рис. 1), то разложение вычисляется по формулам:



Рис. 1. Пример изображения

$$vv_j(k, l) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} h'(2k-n) h'(2l-m) vv_{j-1}(n, m),$$

$$wv_j(k, l) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} g'(2k-n) h'(2l-m) vv_{j-1}(n, m),$$

$$vw_j(k, l) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} h'(2k-n) g'(2l-m) vv_{j-1}(n, m),$$

$$ww_j(k,l) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} g'(2k-n)g'(2l-m)vv_{j-1}(n,m),$$

где j – степень разложения;

$$m,n = 0 \dots 2^j - 1, k,l = 0 \dots 2^j - 1;$$

$$j=0..J, L=2^j-1, h'(n)=h(L-n-1),$$

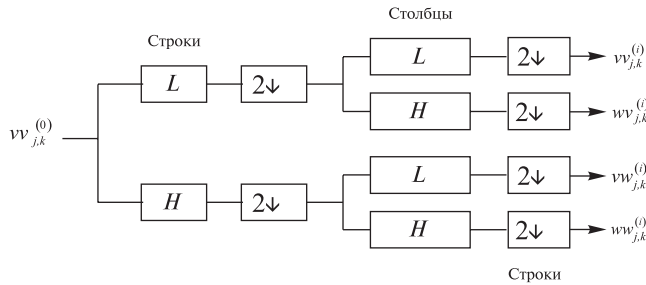
$$g'(n) = g(L-n-1);$$

n и m – координаты пикселей изображения $vv_{j,k}^{(i)}$; k и l – координаты пикселей изображения $ww_{j,k}^{(i)}$; $vv_{j,k}^{(i)}$, $ww_{j,k}^{(i)}$; $h(t)u g(t)$ – импульсные характеристики низкочастотного и высокочастотного фильтра.

Рассмотрим последовательность изображений, полученных в результате разложения. Схема разложения и пример разложения тестового изображения на 3 уровня представлен на рис. 2 и 3-5 соответственно.

В результате разложения получим по три матрицы горизонтальных, вертикальных и диагональных составляющих с одинаковым разрешением, принадлежащих каждому уровню разложения. При этом, размер уровней декомпозиции изображения будет равен: для первого уровня 128×128 , второго 64×64 и третьего 32×32 .

Из рисунка ясно видно структуру изображения, состоящую из ярко выраженных горизонтальных, вертикальных и диагональных составляющих, которые характеризуют изображение (рис. 3-5).



(L – низкочастотный фильтр, H – высокочастотный фильтр)

Рис. 2. Двухмерное дискретное ВП

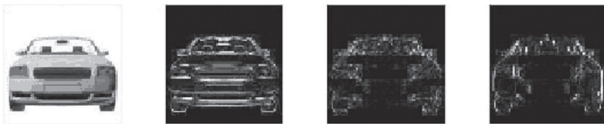


Рис. 3. Результат разложения по уровням декомпозиции 1-й уровень

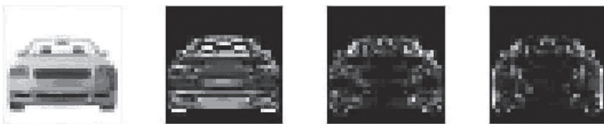


Рис. 4. Результат разложения по уровням декомпозиции 2-й уровень

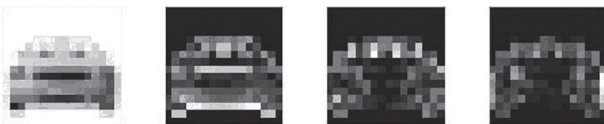


Рис. 5. Результат разложения по уровням декомпозиции 3-й уровень

В результате разложения получим набор изображений, представляющих уменьшенные копии изображения

$$WB^{(0)}(x,y) \supset WB^{(1)}(x,y) \supset \dots \supset WB^{(k)}(x,y),$$

где $WB^{(0)}(x,y)$ – исходное изображение; $WB^{(1)}(x,y) \supset \dots \supset WB^{(k)}(x,y)$ – его уменьшенные копии, полученные с применением декомпозирующего фильтра h .

Полученные уменьшенные копии изображения $WB^{(1)}(x,y) \supset \dots \supset WB^{(k)}(x,y)$ оптимально подходят для выполнения процедур нормализации изображения.

Компенсация геометрических искажений для различных моделей смещений

Проведем анализ различных моделей смещений, возникающих в СТЗ.

Произведем смещение изображения $B(x,y)$ вдоль оси Y . Данное смещение математически имеет следующий вид:

$$B(x,y) = B_1(x,y-m), \quad (1)$$

где B, B_1 – изображение; m – параметр смещения вдоль оси Y .

В этом виде преобразования объект не меняет своих геометрических размеров и ориентации, смещается вдоль относительно Y .

Так как изображение не изменило формы, а произошло его смещение вдоль оси Y , то можно утверждать, что данное преобразование относится к группе преобразования параллельных переносов вдоль координатной оси Y и принадлежит группе $G_{c,y}$. Группа $G_{c,y}$ – однопараметрическая.

Для группы $G_{c,y}$ нормализация смещения будет иметь вид:

$$F_C(B) = B(x,y+\Phi_2), \quad (2)$$

где Φ_2 – функционал, определяющий параметры m в зависимости (1):

$$\Phi_2 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v_0^0(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^0(n,m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v^0(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^0(n,m)}.$$

Произведем смещение изображения $B(x,y)$ вдоль оси X . Данное смещение математически имеет следующий вид:

$$B(x,y) = B_1(x-n,y), \quad (3)$$

где B, B_1 – изображение; n – параметры смещения вдоль оси X .

В этом виде преобразования объект не меняет своих геометрических размеров и ориентации, смещается вдоль относительно оси X .

Так как изображение не изменило формы, а произошло его смещение вдоль оси X , то можно

утверждать, что данное преобразование относится к группе преобразования параллельных переносов вдоль координатной оси X и принадлежит группе $G_{c,x}$. Группа $G_{c,x}$ — однопараметрическая.

Нормализация группы смещения $G_{c,x}$ будет иметь вид:

$$F_C(B) = B(x + \Phi_1, y), \quad (4)$$

где Φ_1 — функционал, определяющий параметры n в зависимости:

$$\Phi_1 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v_0^0(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^0(n, m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v^0(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^0(n, m)}.$$

Произведем смещение изображения $B(x, y)$ вдоль оси X и Y . Данное смещение математически имеет следующий вид:

$$B(x, y) = B(x-n, y-m), \quad (5)$$

где B — изображение; n, m — параметры смещения вдоль координатных осей.

В этом виде преобразования объект не меняет своих геометрических размеров и ориентации, смещается вдоль относительно осей X и Y .

Для группы смещений $G_{c,x,y}$ нормализация будет иметь вид:

$$F_C(B) = B(x + \Phi_1, y + \Phi_2), \quad (6)$$

где Φ_1, Φ_2 — функционалы, определяющие соответственно параметры n и m в зависимости ():

$$\Phi_1 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v_0^0(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^0(n, m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v^0(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^0(n, m)};$$

$$\Phi_2 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v_0^i(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^i(n, m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v^i(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n, m)}.$$

Рассмотрим смещения «косой сдвиг». Группы $G_{h,x}, G_{h,y}$ — «косой сдвиг» — являются однопараметрическим преобразованием. Произведем преобразование с помощью смещения «косой сдвиг» изображения $B(x, y)$ вдоль оси X .

Данное смещение математически имеет следующий вид:

$$B_0(x, y) = B(x + h y, y), \quad (7)$$

где h — параметр «косого сдвига» вдоль оси абсцисс.

Параметр h задают в виде $h = tg\alpha$. В этом случае α задает угол сдвига.

При сдвиге вдоль оси ординат группы $G_{h,y}$:

$$B_0(x, y) = B(x, y + h x), \quad (8)$$

Преобразование при этом виде смещения происходит вдоль оси ординат, вдоль оси абсцисс, а также вдоль прямой с некоторым угловым коэффициентом.

В случае смещения «косой сдвиг» вид нормализатора для модели (7) и (8) будет иметь вид:

$$F_{H_x}(B) = B(x + \Phi y, y), \quad (9)$$

$$F_{H_y}(B) = B(x, y + \Phi x), \quad (10)$$

где Φ , — функционал вида:

$$\Phi = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n m v v (n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m^2 v v (n, m)}.$$

Пусть объект O вращается вокруг оси. В этом случае объект O не удаляется от камеры и не меняет своих геометрических размеров. Все получаемые изображения рассматриваются в одной плоскости β . Изображения B_1 и B_2 объекта O отличаются лишь углом поворота θ .

Угол поворота θ является единственным параметром преобразования. В декартовой системе координат эталонное и входное изображения связаны зависимостью:

$$B(x, y) = B_0(x \cos(\theta) + y \sin(\theta) - x \sin(\theta) + y \cos(\theta)). \quad (11)$$

Нормализатор группы G_u имеет вид:

$$F_U(B) = B(x \sin \Phi + y \cos \Phi, -x \sin \Phi + y \cos \Phi), \quad (12)$$

где Φ — функционал вида:

$$\Phi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} 2 v v (n, m) (n^3 m + n m^3)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v (n, m) (n^4 + m^4)}.$$

Подвергнем изображение изменению масштаба. При данном изменении все точки объекта удаляются на одинаковое расстояние от камеры. Математическая модель преобразования масштаба соответствует выражению вида:

$$B(x, y) = B(\kappa x, \kappa y), \quad (13)$$

где B — эталонное изображение; κ — параметры сжатия.

В случае одномерного изменения масштаба нормализатор будет иметь вид:

$$F_d(B) = B(x \Phi, y \Phi), \quad (14)$$

где Φ — функционал вида:

$$\Phi = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v (n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0 (n, m)}.$$

В случае неравномерного изменения масштаба нормализатор имеет следующий вид:

$$F_D(B) = B(x\Phi_1, y\Phi_2), \quad (15)$$

где Φ_1 – функционал, определяющий параметр сжатия вдоль оси абсцисс; Φ_2 – функционал, определяющий параметр сжатия вдоль оси ординат.

В этом случае функционал для нормализатора (15) можно построить, базируясь на свойствах эллипса энергии изображения:

$$\Phi_1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n^2 vv(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} vv(n,m)}}, \quad \Phi_2 = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m^2 vv(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} vv(n,m)}}.$$

Математическая модель перспективы имеет вид:

$$B_\lambda(x, y) = B\left(\frac{x}{\lambda y + 1}, \frac{y}{\lambda y + 1}\right), \quad (16)$$

где λ – параметр гомотопии вдоль оси ординат.

Общий вид нормализатора для этой модели представим в виде:

$$F_P(B) = B\left(\frac{x}{\Phi y + 1}, \frac{y}{\Phi y + 1}\right), \quad (17)$$

где – функционал Φ определяет параметр параболической гомотопии вида:

$$\Phi = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \frac{vv(n,m)}{n^4}}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \frac{vv(n,m)}{n^3}}.$$

В результате анализа первого уровня разложения, с помощью формул вычисления средней разности, максимальной разности и среднеквадратической погрешности можно утверждать, что для компенсации геометрических искажений можно использовать и последующие уровни разложения изображения. Поэтому нормализаторы и функционалы для базовых групп для различных уровней разложения можно записать в следующей форме:

1. Для модели (3) группы $G_{c,x}$ нормализатор примет вид:

$$WF_C(B) = WB(x + \Phi w^i_1, y),$$

где

$$\Phi w^i_1 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v_0^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^i(n,m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)}.$$

2. Для модели (2) группы $G_{c,y}$ нормализатор примет вид:

$$WF_C(B) = WB(x, y + \Phi w^i_2),$$

где

$$\Phi w^i_2 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v_0^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^i(n,m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)}.$$

3. Для модели (5) группы $G_{c,x,y}$ нормализатор примет вид:

$$WF_C(B) = WB(x + \Phi w^i_1, y + \Phi w^i_2),$$

где

$$\Phi w^i_1 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v_0^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^i(n,m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)},$$

$$\Phi w^i_2 = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v_0^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^i(n,m)} - \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)}.$$

4. Для модели (13) группы G_m нормализатор в случае равномерного и неравномерного изменения масштаба имеет вид:

$$WF_d(B) = WB(x\Phi w^i, y\Phi w^i),$$

$$WF_d(B) = WB(x\Phi_1 w^i, y\Phi_2 w^i),$$

где

$$\Phi w^i = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v_0^i(n,m)},$$

$$\Phi_1 w^i = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n^2 v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)}},$$

$$\Phi_2 w^i = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m^2 v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n,m)}}.$$

5. Для модели (7) группы $G_{h,x}$ нормализатор примет вид:

$$WF_{Hx}(B) = WB(x + \Phi w^i, y),$$

где

$$\Phi w^i = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} n m v v^i(n,m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m^2 v v^i(n,m)}.$$

6. Для модели (8) группы $G_{h,y}$ нормализатор примет вид:

$$WF_{Hy}(B) = WB(x, y + \Phi w^i x),$$

где

$$\Phi w^i = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} nm v v^i(n, m)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} m^2 v v^i(n, m)}.$$

7. Для модели (11) группы G_u нормализатор имеет вид:

$$F_U(B) = B(x \sin \Phi w^i + y \cos \Phi w^i, -x \sin \Phi w^i + y \cos \Phi w^i),$$

где

$$\Phi w^i = \frac{1}{2} \arctg \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} 2 v v^i(n, m) (n^3 m + n m^3)}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} v v^i(n, m) (n^4 + m^4)}.$$

8. Для модели (16) группы G_p нормализатор перспективы имеет вид:

$$F_p(B) = B\left(\frac{x}{\Phi w^i y + 1}, \frac{y}{\Phi w^i y + 1}\right),$$

где

$$\Phi w^i = \frac{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \frac{v v^i(n, m)}{n^4}}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{m=0}^{2^j-1} \frac{v v^i(n, m)}{n^3}}.$$

Выводы

В статье предложено использовать уменьшенные копии изображений, полученные в результате вейвлет - разложения, для компенсации геометрических искажений, возникающих вследствие взаимного расположения видеокамеры и наблюдаемого объекта. Геометрические искажения рассматривались в заданной группе преобразования. Использование вейвлет-разложения изображений позволяет сократить время на геометрические преобразования (нормализации) в системах технического зрения с целью дальнейшего распознавания наблюдаемого объекта.

Список литературы: 1. Путьтин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с. 2. Петухов А.П. Введение в теорию базисов всплесков. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 132 с. 3. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 671 с. 4. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

Поступила в редколлегию 1.04.2008