

Теорія контрастності зображень як основа побудови методів їх перетворень

Роман Воробель

Фізико-механічний інститут НАН України, 290601, Львів, Наукова 5, vorobel@ah.ipm.lviv.ua, тел.(0322) 65-4803

Theory contrast of images as base for design methods of theirs transformation. R. Vorobel.

For five class methods of image enhancement with aim contrast and detail intensification is shown that contrast of pixels are base of this methods. Different kernels of contrast are also base for design new methods of image transformation and analysis. Such approach is possible owing to using theory contrast of images.

Цифрове оброблення зображень набуло широкого поширення через доступність в першу чергу засобів його програмної реалізації. Крім того зображення - це специфічна форма представлення та реєстрації інформації. Її цифрова реалізація стала найбільш уживаним видом даних, що обробляються на персональних комп'ютерах з метою аналізу і отримання додаткової інформації чи прийняття рішень. При цьому однією з важливих задач оброблення зображень є їх перетворення з метою зміни візуальної якості та підвищення інформативності. Задачами цього класу є геометричні перетворення зображень, усунення шумів і змазу, підвищення різкості, детальності і контрасту. Ми ж зупинимося на розв'язку задач підвищення детальності і контрасту. Для цього використовується оброблення зображень як в частотній області, так і в просторовій. Остання забезпечує більш швидке отримання задовільних результатів. Основну множину методів оброблення зображень в просторовій області з метою їх перетворення для зміни візуальної якості можна розділити на п'ять класів. Перший - методи розтягу; другий - гістограмні методи; третій - рангові методи; четвертий - різницеві методи; п'ятий - методи перетворення локального контраста. Всі вони виникли, в основному на різний етапах розвитку оброблення зображень і не мають під собою однієї спільнотеоретичної бази побудови, окрім як кінцевої мети - перетворити зображення так, щоб отримати додаткову інформацію. В той же час оброблення зображень можна розглядати як два взаємно доповнюючих підходи [1]: один - вивчення властивостей зображень та об'єктивної оцінки їх характеристик (якості), а другий - перетворення зображень з поставленою метою оброблення.

Основи кількісних оцінок зображень були започатковані В.Ф.Нестеруком та Н.Н.Порфир'євою, які сформулювали закон контрастного сприйняття світла, закон формування рівня адаптації, закон зорового сприйняття сюжетного зображення, закон

екстремальності зорового сприйняття інформації (зображень). Нами ж встановлено, що в основі перелічених п'яти базових класів методів просторового оброблення зображень є контраст його елементів. Виявлення основи методів перетворення зображень дозволило сформувати шляхи їх розвитку, перейти від візуальної до кількісної оцінки їх ефективності.

Дана робота має за мету показати, що контраст елементів монохромних напівтонових зображень є основою побудови методів їх перетворення та кількісного аналізу.

Контраст - це кількісна чи якісна відмінність двох частин поля зору, які видимі одночасно чи послідовно. Для визначення контрасту елементів зображення можуть вживатися різні вирази, модулі яких називаємо ядрами [2]. Використання ж для визначення контрасту його лінійного опису [3], тобто коли контраст між двома елементами L_i та L_j визначається як

$$C_{i,j} = \frac{L_i - L_j}{LMAX}, \quad (1)$$

де $LMAX$ - максимально допустиме значення яскравості елемента зображення, створює основу побудови методів перетворення зображень з метою зміни їх візуальної якості.

Нехай вхідне зображення L задане матрицею цілих чисел $L_{i,j}$ розміром $N \times M$ елементів, (i,j) - координати елемента зображення, $i=1, N$, $j=1, M$, причому

$$L_{min} = \min_{i,j} \{L_{i,j}\}, \quad L_{max} = \max_{i,j} \{L_{i,j}\}, \quad (2)$$

а середнє арифметичне значення величин елементів всього зображення

$$\bar{L} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i,j} L_{i,j}, \quad (3)$$

і $L_{min}, L_{max} \in [0, R-1]$, де R - кількість рівнів квантування відеосигналу і $LMAX=R-1$. При q -роздільному двійковому представленні елемента $R = 2^q - 1$.

Розглянемо зв'язок перелічених методів з контрастом елементів зображення більш детально.

1. Методи розтягу. Інакше їх називають методами табличних перетворень, проглядових таблиць (lookup table), градаційної гама-корекції, лінійного і нелінійного розтягів.

Покажемо, що перетворення на основі розтягу діапазону вхідних величин елементів зображення

мають в основі перетворення контрасту елементів (1). Для цього запишемо вирази для визначення перетворених значень L_i та L_j елементів при використанні лінійного розтягу діапазону $[L_{\min}, L_{\max}]$ вхідного зображення L до максимально допустимого діапазону $[0, L_{MAX}]$ в обробленому зображені L^* :

$$L_i^* = (R-1) \frac{L_i - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}, \quad (4)$$

$$L_j^* = (R-1) \frac{L_j - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}.$$

Тоді нове значення $C_{i,j}^*$ локального контрасту $C_{i,j}$ в перетвореному зображені з врахуванням (1) і (4) визначатиметься як

$$C_{i,j}^* = \frac{R-1}{L_{\max} - L_{\min}} \cdot \frac{L_i - L_j}{R-1} = \frac{L_i - L_j}{L_{\max} - L_{\min}},$$

а коефіцієнт підсилення локального контрасту

$$K_{amp}^{(1)} = \frac{C_{i,j}^*}{C_{i,j}} = \frac{R-1}{L_{\max} - L_{\min}}. \quad (5)$$

звідки

$$C_{i,j}^* = \frac{R-1}{L_{\max} - L_{\min}} \cdot C_{i,j}.$$

Так як

$$\frac{R-1}{L_{\max} - L_{\min}} \geq 1,$$

то

$$C_{i,j}^* \geq C_{i,j}. \quad (6)$$

Тобто лінійний розтяг діапазону величин елементів вхідного зображення до гранично допустимого є перетворенням з підсиленням локальних контрастів, а значить сприяє підвищенню візуальної якості зображень.

Для випадку нелінійного розтягу діапазону величин елементів вхідного зображення (гама корекції), тобто коли

$$L_i^* = (R-1) \cdot \left(\frac{L_i - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \right)^\alpha, \quad (7)$$

$$L_j^* = (R-1) \cdot \left(\frac{L_j - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \right)^\alpha,$$

коефіцієнт підсилення локального контрасту

$$K_{amp}^{(2)} = (R-1) \frac{(L_i - L_{\min})^\alpha - (L_j - L_{\min})^\alpha}{(L_{\max} - L_{\min})^\alpha \cdot (L_i - L_j)}. \quad (8)$$

Таким чином перетворення типу розтягу є засобом підвищення візуальної якості зображення через підсилення локального контрасту.

В той же час до проблеми розтягу діапазону яскравостей зображення можна підійти з позиції сприйняття зображень людиною.

Нехай задане таке зображення L , що $L_{i,j} \in [L_{\min}, L_{\max}]$. Відомо, що при сприйнятті зображень зоро-вий механізм людини адаптується до певного рівня його яскравості, тобто діє закон формування рівня адаптації [1]. Цей рівень адаптації визначається середньоарифметичним значенням яскравості всього зображення L (3). Очевидно, що його граничними межами є L_{\min} та L_{\max} (2). Тобто рівень адаптації займає проміжне значення між L_{\min} та L_{\max} і його можна розглядати як постійну величину, якою апроксимується зміна яскравості в часі. Тоді логічно припустити, що максимальне відхилення яскравості елементів $L_{i,j}$ зображення від рівня адаптації \bar{L} мало бути мінімальним

$$\bar{L} = \min_{i,j} \max(L_{i,j} - \bar{L}), \quad (9)$$

а це значить, що воно має бути розв'язком чебишовської задачі рівномірного наближення з абсолютною похибкою, що згідно з [4] дає такий розв'язок

$$\bar{L} = \frac{L_{\min} + L_{\max}}{2}. \quad (10)$$

Це означає, що для відображення вхідного зображення з $L_{i,j} \in [L_{\min}, L_{\max}]$ на весь динамічний діапазон за яскравістю $[0, R-1]$ процедура перетворення складатиметься з двох етапів збільшення контрасту елементів зображення через лінійну зміну їх величини: елементи $L_{i,j} \in [L_{\min}, \bar{L}]$ будуть відображатися на проміжок $[0, (R-1)/2]$, а елементи $L_{i,j} \in (\bar{L}, L_{\max}]$ - будуть відображатися на проміжок $((R-1)/2, R-1]$. При $L_{\min} > 0$ і $L_{\max} < R-1$ описане перетворення реалізує кусково-лінійний розтяг, що призводить до збільшення контрасту (1) через збільшення різниці між новими значеннями L_i та L_j . Тобто цей метод базується на фіксованому збільшенні контрасту елементів вхідного зображення. В цілому один з можливих виразів, що описує реалізацію запропонованого розтягу, такий

$$L_{i,j}^* = \begin{cases} \frac{R-1}{2} \cdot \frac{L_{i,j} - L_{\min}}{\bar{L} - L_{\min}}, & \text{при } L_{i,j} \leq \bar{L}, \\ \frac{R-1}{2} \cdot \frac{L_{i,j} + L_{\max} - 2\bar{L}}{L_{\max} - \bar{L}}, & \text{при } L_{i,j} > \bar{L}. \end{cases} \quad (11)$$

На основі виразу (11) будується цілий клас методів розтягу зображень (як глобального, для всього зображення, так і ковзних), що забезпечує підвищення детальності зображень через підсилення контрасту його елементів [5].

2. Гістограмні методи. З методів цього класу найбільшого поширення набуло вирівнювання гістограм. Покажемо, що контраст (1) елементів зображення є в основі методу вирівнювання

гістограм [6]. Для цього використаємо запропонований в роботі [7] вираз для узагальненого контрасту сюжетного зображення при рівні адаптації за яскравістю \bar{L} на основі правила (закону) додавання локальних контрастів. У випадку ж представлення зображення еквіденситними полями, тобто полями, що мають однакову яскравість ($L_i = L_j = L$), вираз для узагальненого контрасту такий:

$$C_{ii0} = \begin{cases} \frac{2(L - \bar{L})}{LMAX} & \text{при } 2L \leq LMAX, \\ 1 & \text{при } 2L > LMAX. \end{cases} \quad (12)$$

Тобто при малих значеннях яскравостей L з формулі (12) узагальнений контраст можна представити у вигляді

$$C_{ii0} = \frac{2(L - \bar{L})}{LMAX}, \quad (13)$$

або ж, розглядаючи контраст як приведений центрований кусково-лінійний сигнал реакції

$$C_{ii0} = \frac{V - V_0}{V^*} = \frac{2(L - \bar{L})}{LMAX}, \quad (14)$$

де V^* - половина віддалі між максимально можливими величинами реакції, V_0 - ордината центру функції реакції.

При встановленні зв'язку між узагальненим контрастом (14) і гістограмним перетворенням використаємо підхід, викладений в роботі [8], і будемо виходити з того, що процес зорового сприйняття за своєю природою є статистичним процесом. Це обумовлено тим, що збудження світлом активних нейронів (що дають імпульс відгуку) проходить з певною імовірністю $P(x)$ [9].

Це означає, що число k активних нейронів на заданому рівні зорової системи є випадковою величиною, розподіл якої можна вважати біноміальним. Обумовлено це тим, що нейрон формально знаходиться в одному з двох станів: є імпульс відгуку чи імпульсу відгуку немає.

У відповідності з викладеним в [8] випадковий сигнал збудження U лінійно залежить від кількості активних нейронів

$$U = Ak + A_0.$$

Величина ж сигналу реакції V визначається середнім значенням сигналу збудження U при заданій світловій дії x

$$V = U = Ak + A_0.$$

Знаючи закон розподілу k , можна обчислити математичне сподівання

$$M[U] = ANP(x) + A_0 = V(x) \quad (15)$$

та його дисперсію

$$D[U] = A^2 NP(x)[1 - P(x)],$$

де N - загальна кількість нейронів на даному рівні зорової системи. З виразу (15) випливає, що при $P(x) = 1$

$$V = V_{\max} = AN + A_0,$$

та при $P(x) = 0$

$$V = V_{\min} = A_0.$$

Ввівши параметри функції $V(x)$ при кусково-лінійному представленні, які характеризують її "центр" V_0 і розмах V^*

$$\begin{cases} V_0 = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} = \frac{AN}{2} + A_0, \\ V^* = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} = \frac{AN}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

Тоді, на основі (14) і (18), отримаємо вираз для приведеного сигналу реакції $C(x)$ як функції $P(x)$

$$C(x) = \frac{V(x) - V_0}{V^*} = 2P(x) - 1. \quad (17)$$

Аналізуючи (17) зазначимо, що величина приведеного сигналу реакції $C(x)$ повністю визначається імовірністю $P(x)$ виникнення імпульса відгуку у нейроні при заданій світловій дії x .

З другого боку, вся інформація, яку отримує зорова система про зовнішній світловий сигнал x , міститься в $C(x)$ і тому сигнал x можна розглядати як випадкову величину, яка з певною імовірністю викликає сигнал реакції заданої величини C . В цьому розумінні вираз (17) будучи записаним у вигляді

$$P(x) = \frac{C(x) + 1}{2} \quad (18)$$

є функцією розподілу імовірності випадкової величини x .

Покажемо, що методи перетворення функції розподілу $P(x)$ безпосередньо пов'язані з використанням узагальненого контрасту (14) як величини, що відповідає сигналу реакції зорової системи [11]. Для цього перепишемо вираз (18) у вигляді

$$P(x) = \frac{C_{ii0} + 1}{2},$$

а підставивши в нього формулу (14) отримуємо

$$P(x) = \frac{L - \bar{L}}{LMAX} + \frac{1}{2},$$

звідки

$$L = LMAX \cdot P(x) + \bar{L} - \frac{LMAX}{2}. \quad (19)$$

Оскільки для рівномірного закону розподілу величини L на проміжку $[0, LMAX]$ значення

медіані $L_{\max} / 2$ співпадає з середнім значенням \bar{L} , то з (19) отримуємо

$$L = LMAX \cdot P(x), \quad (20)$$

що відповідає виразу для гістограмних перетворень яскравостей зображень як (еквалізації гістограм) дискретного аналога методу формування випадкових величин з рівномірним розподілом при $L_{\min} = 0$. Тут $P(x)$ стає аналогом функції розподілу яскравостей зображення.

3. Рангові методи. В роботі [10] показано, що метод вирівнювання гістограми є частковим випадком рангових перетворень і з цих позицій він полягає у заміні центрального елемента ковзного околу його пронормованим рангом. Це означає, що і рангові перетворення теж базуються на лінійному описі контрасту елементів зображення.

4. Різницеві методи. Інакше їх називають методами нерізкого маскування [6]. Ці методи забезпечують підсилення високих частот в просторовій області. Відомий алгоритм [6] використовує такі перетворення

$$L_{i,j}^* = \bar{L}_{i,j}(S) + k[L_{i,j} - \bar{L}_{i,j}(S)] \quad (21)$$

де S - заданий окіл елемента (i,j) зображення, що оточує центральний елемент з координатами (i,j) , включаючи його самого;

k - коефіцієнт підсилення контрасту;

$$\bar{L}_{i,j}(S) = \frac{1}{N_S} \sum_{i,j \in S} L_{i,j},$$

де N_S - кількість елементів S -околу.

Фактично вираз $[L_{i,j} - \bar{L}_{i,j}(S)]$ є описом лапласіана. Нами ж встановлено безпосередній зв'язок між лапласіаном та контрастом елемента зображення для елементарних зображень, що представляються околами Мура та Неймана:

$$\nabla^2 L_{i,j} = a C_{i,j}, \quad (22)$$

де $a = \text{Const}$.

Тобто зв'язок між лапласіаном і контрастом полягає у їх взаємній відповідності. Завдяки цьому вираз (21) для нерізкого маскування набуває нового змісту:

$$L_{i,j}^* = \bar{L}_{i,j}(S) + k \cdot a \cdot C_{i,j}, \quad (23)$$

де

$$C_{i,j} = \frac{L_{i,j} - \bar{L}_{i,j}(S)}{LMAX},$$

і, таким чином, стає основою побудови нових методів нерізкого маскування.

5. Методи перетворення локального контрасту. Ці методи за своєю природою мають в основі використання контрасту елементів зображення. Основна ідея їх побудови полягає у визначенні локального контрасту $C_{i,j}$ елемента зображення,

формуванні підсиленого контрасту $C_{i,j}^*$, як нелінійно перетвореного контрасту $C_{i,j}$, та відновленні вхідного зображення з підсиленим контрастом.

Отже, розгляд п'яти класів методів перетворення зображень з метою зміни їх візуальної якості показав, що всі вони базуються на основі визначення локального контрасту між елементами зображення, зокрема з лінійним його описом (1). Поряд з методами перетворень зображень можлива кількісна оцінка контрасту в цілому на основі правила додавання контрастів [7]. Все це створює підстави для ефективного використання теорії контрастності зображень при побудові нових методів перетворення зображень з метою зміни їх візуальної якості та кількісної оцінки.

1. Мирошников М.М., Нестерук В.Ф. *Иконика. Современное состояние и направление дальнейшего развития// Оптико-механическая промышленность.* 1998, N 12. - С.15-27.
2. Воробель Р.А. Ядра визначення контрасту елементів зображення // Відбір і обробка інформації. - 1997. Вип.11(87). - С.96-100.
3. Воробель Р.А. Лінійний опис визначення контрастності елементів зображення // Доповіді НАН України. - 1998. N 1. - С. 128-132.
4. Попов Б.А., Теслер Г.С. *Приближение функций для технических приложений.* - К.: Наук. думка, 1980. - 352 с.
5. Воробель Р.А. Методи ковзного підвищення контрасту зображень на основі розтягу // Відбір і обробка інформації. - 1998. - Вип. 12(88). - С. 89-95.
6. Прэтт У. *Цифровая обработка изображений.* - М.: Мир, 1982. - 790 с.
7. Воробель Р.А. Сприйняття сюжетних зображень та кількісна оцінка їх контрасту на основі лінійного опису визначення контрастності елементів // Доповіді НАН України. - 1998. - N 9. - С. 103-108.
8. Нестерук В.Ф., Порфириева Н.Н. *Информационная оценка процесса зрительного восприятия// Оптика и спектроскопия.* 1977. - Т. 44. - Вып. 4. - С. 801-803.
9. Васильев Л.Л. В кн.: *Применение математических методов в биологии.* Л.: Изд. ЛГУ. - 1960.
10. Ярославский Л.П. *Цифровая обработка сигналов в оптике и голограммии: введение в цифровую оптику.* М.: Радио и связь, 1987. - 296 с.
11. Воробель Р.А. Гістограмні перетворення як складова частина теорії контрастності зображень // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. -1998. - N 324. - С. 114-118.