

М.Є. Сердюк, М.Ю. Гусейнов

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

АДАПТИВНА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ З РОЗРАХУНКОМ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ В ОКОЛАХ ПІКСЕЛІВ

Розглянуто адаптивний двоетапний алгоритм інтерполяції статичних растрових зображень. На першому етапі алгоритму будуємо каркас та відновлюємо на ньому функції зображення. На другому етапі реконструюємо зображення поза межами каркасу з розрахунком матриць вагових коефіцієнтів в околах пікселів.

Рассмотрен адаптивный двухэтапный алгоритм интерполяции статических растровых изображений. На первом этапе алгоритма осуществляем построение каркаса и восстановление на нем функции изображения. На втором этапе выполняем реконструкцию изображения за пределами каркаса с расчётом матриц весовых коэффициентов в окрестностях пикселей.

An adaptive two-stage algorithm of interpolation of still raster images is considered. The first step of algorithm is skeleton building and recovery of the image function at the points of the skeleton. The second step is image reconstruction outside the skeleton with the calculation of the weighting coefficient matrix in a neighborhood of pixels.

Ключові слова: інтерполяція зображень, адаптивний алгоритм, каркас, топографічна карта зображення, окіл пікселя, L1-метрика.

Вступ. Бурхливий розвиток відеотехнологій, технологій обробки, збереження та передачі графічної інформації потребує постійного вдосконалення методів інтерполяції цифрових зображень. Інтерполяція відбувається кожного разу при зміні розмірів зображення або трансформації зображення з однієї сітки пікселів в іншу. Сутність проблеми інтерполяції полягає у використанні відомих даних для знаходження очікуваних значень у невідомих пікселях, які з'являються через перетворення зображення. Процедура інтерполяції зображень працює у двох вимірах та прагне досягти найкращого наближення в кольорі та яскравості пікселя, ґрунтуючись на значеннях оточуючих пікселів. Проте інтерполяцію зазвичай супроводжує поява візуальних спотворень, таких як розмитість меж, дублюючі контури,

сходинковий ефект, які, у свою чергу, призводять до втрати реалістичності в масштабованих зображеннях. Тому розробка нових методів просторової інтерполяції зображень, які б дозволяли зберегти достатньо високу якість результуючих зображень, є актуальна.

Аналіз існуючих методів. На даний час існує достатня кількість різноманітних методів інтерполяції, які можна поділити на два типи: адаптивні та неадаптивні. Неадаптивні методи завжди застосовують однаковий алгоритм інтерполяції по всьому простору, незалежно від оброблюваного зображення, тобто всі пікселі обробляють однаково. Найвідомішими методами цього виду є такі: найближчого сусіда, білінійна, бікубічна інтерполяція, інтерполяція сплайнами, метод Ланцоша та ін. [1; 2]. Для інтерполяції в них застосовують групи суміжних пікселів. Найпростіший і найшвидший метод найближчого сусіда, наприклад, враховує тільки один піксель – найближчий до точки інтерполяції. Внаслідок цього кожен піксель стає більшим, а результуюче зображення набуває небажаного сходинкового ефекту. Білінійна інтерполяція використовує чотири оточуючі пікселі та дозволяє отримати більш гладке зображення. Метод бікубічної інтерполяції розглядає масив із шістнадцяти оточуючих пікселів та генерує значно різкіше зображення, ніж два попередні методи. І хоча результуюче зображення повністю не позбавлене небажаних візуальних артефактів, цей метод є оптимальний за співвідношенням часу обробки та якості на виході, тому він став стандартним для багатьох програм редагування зображень (включаючи Adobe Photoshop), драйверів принтерів і вбудованої інтерполяції камер. Є багато інших неадаптивних методів інтерполяції, які беруть до уваги більше оточуючих пікселів і таким чином потребують більше інтенсивних обчислень. Незначне візуальне покращення під час застосування цих методів призводить до істотного збільшення часу обробки. Усі неадаптивні методи прагнуть підібрати оптимальний баланс між трьома небажаними дефектами: сходинковим ефектом, розмитістю та дублюванням контурів. Зменшення одного з них за рахунок інших приводить до того, що, як мінімум, один із них буде помітним у результуючому зображенні.

Іншим способом для збереження якості масштабованих зображень є застосування адаптивних алгоритмів, поведінка яких змінюється залежно від статичних властивостей зображення усередині області дії інтерполюючої функції. Багато з них на основі попиксельного аналізу застосовують різні варіанти своїх алгоритмів з метою мінімізувати недоліки інтерполяції в тих місцях, де вони найбільш помітні (наприклад, різкі межі). Як показує практика, ефективність роботи більш складних щодо обчислення адаптивних алгоритмів зазвичай краща, ніж у раніше розглянутих методах, однак

підвищені обчислювальні вимоги під час реалізації адаптивних методів, незважаючи на високу ефективність, дещо знижують їх сферу застосування. Крім того більшість із них – це комерційні алгоритми в ліцензованих програмах.

У даній статті розглядаємо адаптивний алгоритм інтерполяції зображень, який складається з двох етапів. На першому етапі будуємо каркас зображення – деяке наближення топографічної карти зображення. На другому етапі реконструюємо зображення поза межами каркасу з обчисленням вагових коефіцієнтів, які оцінюють вплив відомих пікселів на невідомий у межах його околу.

Постановка задачі. Будь-яке цифрове зображення тлумачимо як відображення $I: \Delta = [0, W] \times [0, H] \rightarrow L(R^N, R^M)$, де $\Delta = \text{supp } I$, $L(R^N, R^M)$ – простір числових матриць розміром $N \times M$. Величини N та M – розміри піксельної сітки, на елементах якої задані значення I_{ij} , що характеризують яскравість або колір пікселя (i, j) . При цьому вважатимемо, що означені матриці $T(I) = \{I_{ij}\}_{i=1, N}^{j=1, M}$ є реалізації на дискретну сітку функції зображення I . Отже, задачею інтерполяції є відновлення функції I за її значеннями I_{ij} на піксельній сітці, що дозволить обчислити значення I в нових пікселях, які з'являються після зміни розмірів зображення під час масштабування.

Опис методу інтерполяції. Для відновлення функції зображення I за відомими значеннями в точках піксельної сітки пропонується алгоритм, який складається з двох етапів та комбінує різні підходи.

Першим етапом запропонованого методу є каркасна інтерполяція – побудування каркасу, що є наближенням топографічної карти зображення, та інтерполяція вздовж отриманих ліній рівня. Каркас зображення – це деяка перфорована множина, яка є підмножиною носія вихідного зображення Δ і містить всі пікселі піксельної сітки. Каркас отримуємо потовщенням його остова. Під остовом каркаса розуміємо зв'язний граф на R^2 , множиною вершин якого є піксельна дискретна сітка Δ^{WH} , а множина всіх його ребер складається з прямолінійних відрізків, кінцями яких є пікселі, у яких значення функції зображення мало відрізняються. При цьому допустимим є каркас, який не містить ребер, що перетинаються не в пікселі. Отже, каркас являє собою деяке наближення топографічної карти зображення і містить ті фрагменти ліній рівня, які проходять через точки піксельної сітки. Процедура побудови каркасу передбачає застосування шеститочкових сплайнів мінімальної локальної кривини (див.[3]). Для кожного пікселя

вихідної піксельної сітки Δ^{WH} будемо ланцюг із шести ланок, в якому даний піксель є центральний. Систему пікселів ланцюга обираємо певним чином серед найближчих до розглядуваного пікселя. Так, в [3] описаний метод цілеспрямованого перебору для визначення пікселів ланцюга. В [4] запропонований швидкіший спосіб відбору пікселів до остову каркаса: пропонується аналізувати значення градієнта функції зображення в кожному пікселі. Напряма, перпендикулярний вектору градієнта, надає напрям лінії рівня в даному пікселі. Сукупність знайдених фрагментів ліній рівня утворюють остов каркаса. Далі на отриманому остові будують направлені околиці кожного пікселя [3]. Об'єднання таких околиць всіх пікселів піксельної сітки утворює каркас зображення. Після зміни розмірів зображення в каркасі з'являються нові пікселі з невизначеними значеннями функції зображення. Для відновлення значень функції в таких пікселях також застосовують сплайни мінімальної локальної кривини, побудовані на пікселях вихідного зображення, що належать знайденим раніше ланцюгам. Детальніший опис процедури побудови каркасу та відновлення на ньому функції зображення можна знайти в [3].

Другим етапом методу є реконструкція зображення поза межами каркасу. В [5] запропоновано ітераційну процедуру відновлення значень функції зображення поза каркасом, яка базується на варіаційному підході. Недоліком цієї процедури є значна кількість обчислень, що негативно впливає на швидкість інтерполяції. Візуальна якість масштабованих зображень, отриманих із використанням такої процедури, достатньо прийнятна і значно краща порівняно з неадаптивними методами. Але на дрібних деталях зображення з'являються деякі спотворення. Отже, для усунення зазначених недоліків пропонуємо інший метод відновлення зображення поза межами каркасу, в основі якого – обчислення значень зображення у невідомих пікселях з використанням матриць вагових коефіцієнтів відомих пікселів обраного околу. Розглянемо цей етап докладніше.

Після першого етапу в зображенні поза межами каркасу залишаються пікселі, в яких не визначено значення функції зображення. Називатимемо їх невідомими. Таким чином, відомі пікселі – це пікселі, в яких визначено значення функції зображення. Для кожного невідомого пікселя (i_n, j_n) , де i_n, j_n – горизонтальна та вертикальна координати пікселя в піксельній сітці, проводимо такі дії. Виділяємо окіл певного радіусу. Взагалі, радіус околу можна розглядати як параметр методу та обирати його залежно від особливостей конкретного зображення та результатів, отриманих після інтерполяції на каркасі. Природний початковий вибір радіуса околу – половина коефіцієнта масштабу з відповідним округленням. Виділений окіл

може містити як відомі, так й інші невідомі пікселі. Для всіх відомих пікселів (i_k, j_k) околу розраховуємо вагові коефіцієнти v_k , які кількісно оцінюють їх вплив на шуканий невідомий піксель (i_n, j_n) , за такою процедурою. Спочатку обчислюємо відстані s_{nk} від пікселя (i_n, j_n) до всіх відомих пікселів (i_k, j_k) околу за допомогою L1-метрики:

$$s_{nk} = |i_n - i_k| + |j_n - j_k|.$$

Далі розраховуємо нормалізуючий коефіцієнт даного околу як

$$q_n = 1 / \sum_k \frac{1}{s_{nk}}$$

та вагові коефіцієнти для кожного відомого пікселя околу (i_k, j_k) :

$$v_k = q_n / s_{nk}.$$

Переконаємося, що сума вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці:

$$\sum_k v_k = \sum_k \frac{q_n}{s_{nk}} = q_n \sum_k \frac{1}{s_{nk}} = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{s_{nk}}} \sum_k \frac{1}{s_{nk}} = 1.$$

Тоді значення функції зображення в пікселі (i_n, j_n) визначаємо так:

$$I(i_n, j_n) = \sum_k v_k I(i_k, j_k),$$

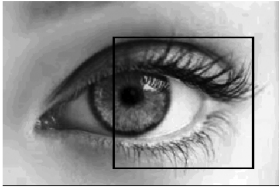
де $I(i_k, j_k)$ – значення функції зображення у пікселі (i_k, j_k) .

Відзначимо, що якщо виділений окіл не містить відомих пікселів, то збільшуємо радіус на одиницю та повторюємо розрахунки для нового околу. Для пікселів, розташованих поблизу межі піксельної сітки, може виявитися неможливим вибрати окіл певного радіусу або розширити окіл. У цих випадках реалізують процедуру парного продовження зображення за межі піксельної сітки.

У результаті проведених за описаною схемою розрахунків отримаємо шукане масштабоване зображення.

Аналіз результатів. Описаний метод був реалізований у програмному забезпеченні ZoomAr, за допомогою якого здійснено тестування низки зображень. Результати тестування показали, що запропонований двоетапний алгоритм збільшує зображення з прийнятною якістю. Візуальне порівняння з результатами збільшення тих самих зображень іншими неадаптивними методами продемонструвало переваги запропонованого методу. На рисунку1 наведено приклад вихідного зображення, фрагмент його каркасу у разі збільшення в 3 рази та фрагменти масштабованих зображень, отри-

маних методом бікубічної інтерполяції (засобами програми Photoshop) та програмою ZoomApp.



а



б



в



г

**Рис. 1. Приклад збільшення зображення у 3 рази:
а – вихідне зображення; б – фрагмент каркасу; в – фрагмент зображення, збільшеного методом бікубічної інтерполяції; г – фрагмент зображення, збільшеного запропонованим методом**

Порівнюючи отримані зображення, можна зробити висновок, що запропонований метод дозволяє значно зменшити сходишковий ефект й отримати чіткіші похилі лінії. Також кращим є збереження форми дрібних деталей. Як бачимо, запропонований метод дозволив уникнути низки візуальних артефактів, які зазвичай мають місце в реалізації операції просторової інтерполяції статичних зображень. До переваг методу можна віднес-

ти його гнучкість за рахунок можливості варіювати параметри (товщина каркасу на першому етапі та радіус околів на другому) залежно від особливостей зображень та отриманих результатів. Тобто у випадку незадовільного результату можна обрати інші параметри та повторити масштабування.

Відзначимо, що швидкість роботи запропонованого методу безпосередньо залежить від коефіцієнту збільшення. Але цю проблему можна усунути засобами програмування, зокрема, поділом зображення на декілька блоків та обробкою кожного блоку окремо у власному потоці з подальшою склейкою вихідного результату. Такий спосіб прискорення обробки був неможливим у разі застосування варіаційного підходу для обчислення функції зображення поза межами каркасу [5], оскільки в тому випадку ітераційну процедуру застосовували для всього зображення в цілому на декількох кроках ітерацій, тобто розбиття на блоки було неможливим.

Висновки. Розглянутий в роботі метод є модифікований метод каркасної інтерполяції, в якому прогаліни каркасу заповнюються за допомогою матриць вагових коефіцієнтів, які є оцінкою впливу відомих пікселів на невідомі та обчислюються із використанням L1-метрики. Практична реалізація даного підходу та тестування його на різноманітних зображеннях продемонстрували, що запропонований метод дозволяє уникнути появи низки візуальних артефактів та зберегти достатньо високу якість інтерпольованих зображень з можливим збільшенням швидкості їх обробки.

Бібліографічні посилання

1. **Carlson, B.** Image interpolation and filtering [Text] / B. Carlson // IEEE Trans on ASSP. – 2000. – March. – Vol. I ASSP-26, № 4. – P.257-261.
2. **Maijering, E.A.** A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing [Text] / E.A. Maijering // Proceedings of IEEE. – 2002. – Vol. 90, № 3. – P.204-214.
3. **Когут, П.І.** Задачі каркасної інтерполяції статичних зображень / П.І. Когут, М.Є. Сердюк [Текст] / П.І. Когут // Вестн. Херсон. нац. техн. ун-та. – 2007. – № 2(28). – С.153–157.
4. **Сердюк, М.Е.** Интерполяция статических растровых изображений на основе восстановления их топографических карт [Текст] / М.Е. Сердюк, В.Ю. Иванов // Питання прикладної математики і математичного моделювання: зб. наук. пр. – Д., 2012. – С. 238–245.
5. **Сердюк, М.Є.** Чисельне розв'язання задачі реконструкції статичних зображень [Текст] / М.Є. Сердюк // Там само. – 2009. – С. 328–336.

Надійшла до редколегії 05.04.2016