

М.Є. Сердюк, М.О. Боровик

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СИНТЕЗУ ЗОБРАЖЕНЬ З БЕЗШОВНИМ НАКЛАДЕННЯМ ФРАГМЕНТІВ

Розглянуто метод безшовної вставки фрагментів зображень на основі варіаційного підходу з використанням вагової функції маски для комбінування функцій вихідних зображень в області їх перекриття. Представлена комп'ютерна система для здійснення автоматичної вставки фрагментів та отримання комбінованого зображення зі згладженими границями вставки.

Рассмотрен метод бесшовной вставки фрагментов изображений на основе вариационного подхода с использованием весовой функции маски для комбинирования функций исходных изображений в области их перекрытия. Представлена компьютерная система для осуществления автоматической вставки фрагментов и получения комбинированного изображения со сглаженными границами.

The method of seamless insertion of image fragments is considered. The method is based on a variational approach using a weighting mask function for combining the functions of source images in their overlapping area. A computer system for automatic image fragment insertion and generating of a combined image with smoothed boundaries is presented.

Ключові слова: безшовна вставка, комбіноване зображення, варіаційний метод, функція маски, функціонал енергії.

Вступ. Задача безшовного накладення фрагментів зображень має багато корисних застосувань в комп'ютерній графіці і є актуальною задачею автоматичної обробки цифрових зображень. Вона виникає в художній обробці зображень (створення колажів, постерів, різноманітних рекламних матеріалів тощо), професійній обробці фотографій, при стикуванні панорамних зображень тощо. Безшовне накладення фрагментів передбачає таку вставку частини одного зображення в інше, щоб границя вставки була непомітною, без видимих артефактів. Різноманітні методи моделювання зображень в задачах подібного типу повинні враховувати візуальні особливості обох фрагментів, що комбінуються, такі як колір, яскравість, контраст та інтенсивність. Складність комбінування фрагментів зображень полягає у необхідності створення згладжених переходів між границями вхідних зображень та вирівнювання кольору результуючого зображення.

Аналіз існуючих методів. Задачі обробки зображень, до яких належить і безшовне накладення фрагментів, можна розглядати як процес створення цільового зображення на основі вихідних зображень. Значення результуючих зображень є різними для різних застосувань, але в більшості випадків до уваги беруть дві умови: співвідношення між пікселями та схожість між кожним

пкселем та його ціллю. Для моделювання зазначеного вище процесу розроблено багато математичних моделей, які використовують різні підходи. Ті з них, що базуються на варіаційному підході або на диференціальних рівняннях в частинних похідних, використовують колір або яскравість пікселів для визначення їх схожості, а градієнт зображення – для визначення зв'язків між пікселями. В роботі [3] розглянуто підхід до розв'язання задачі безшовного накладення фрагментів, що базується на відновленні зображення на області вставки за градієнтним полем. Функцію результуючого зображення $f(x, y)$ на області вставки Ω визначають як розв'язок рівняння Пуассона $\Delta f = \operatorname{div} \mathbf{v}$ на множині Ω з граничними умовами Діріхле $f|_{\partial\Omega} = f_1|_{\partial\Omega}$, де $f_1(x, y)$ – відома функція фонового зображення, $\mathbf{v} = \nabla f_2$ – векторне поле градієнтів відомої функції $f_2(x, y)$ зображення, фрагмент якого вставляється. Такий підхід дозволяє підлаштувати частину, що вставляється, під решту зображення. Фактично, для отримання результату використовується тільки градієнтне поле фрагменту, що вставляється, та значення функції фонового зображення на границі області вставки. При цьому ніяк не враховується частина зображення $f_1(x, y)$ на області Ω , що в деяких випадках призводить до появи помітних артефактів. Це може бути, наприклад, продовження всередину області вставки різких перепадів яскравості на границі. Один зі шляхів подолання цієї проблеми полягає в комбінуванні вихідних зображень, тобто створенні їх лінійної комбінації на Ω . Але це часто призводить до того, що у результуючому зображенні тьмяніють текстури. Інший шлях, що пропонують автори в [3], комбінувати не самі зображення, а їх градієнти. Тобто векторне поле, за яким здійснюється відновлення зображення на області Ω , розраховується як максимум із градієнтів двох зображень в кожній точці, тобто

$$\mathbf{v}(x, y) = \max\{\nabla f_1(x, y), \nabla f_2(x, y)\} \text{ для всіх } (x, y) \in \Omega.$$

Такий підхід дозволяє врахувати великі перепади яскравості на границі вставки та зберегти чіткість об'єктів поблизу границі вставки. Але ще одним недоліком методів, що базуються на відновленні зображення за градієнтним полем, є спотворення в деяких випадках кольорів фрагменту, що вставляється.

Інший підхід, який успішно використовується в задачах обробки зображень, базується на варіаційних моделях. Візуальні особливості зображень, такі як колір, яскравість, контраст, можна інтерпретувати у контексті фізичних процесів. З урахуванням чітких умов та різних візуальних характеристик у варіаційних моделях можна досягти різноманітних ефектів для розв'язання різних задач обробки зображень. Так, в [1] на основі варіаційного підходу розв'язується задача відновлення втрачених ділянок зображення, у [8] варіаційний підхід застосовується до задачі інтерполяції зображень. Варіаційні моделі відновлення та інтерполяції зображень розглянуті в [2].

В [7] представлена варіаційна модель, яка може використовуватись для розв'язання таких задач обробки зображень, як безшовне клонування, коліризація зображення, стилізація, покращення чіткості. В структурі функціона-

лу враховується як функція, так і її градієнт. Різні області визначення кожного з цих двох елементів, а також застосування різних операторів, надає можливість розв'язувати різні завдання обробки зображень. Для задачі безшовної вставки в [7] запропонована така модель:

$$\min_f \left\{ \iint_{\Omega} |\nabla f - \lambda_0 \nabla f_0|^2 + \lambda_1 \iint_{\partial\Omega} |f - f_1|^2 \right\},$$

де f – цільова функція, f_1 – фонове зображення, f_0 – зображення, що вставляється, Ω – область вставки, $\partial\Omega$ – її границя, λ_0 і λ_1 – вагові коефіцієнти. Для отримання згладженого результуючого зображення f повинно бути якомога ближче до f_1 уздовж границі $\partial\Omega$, тому для λ_1 обирається велике значення. Проте такий підхід не завжди дає задовільний результат. В деяких випадках спостерігається спотворення кольорів вставленого фрагменту.

В роботі [4] розглядається задача створення мозаїчних зображень із двох чи більше вихідних зображень. Спочатку зображення, що комбінуються, проєктуються у вейвлет-підпростори. Потім зображення з одного і того ж підпростору змішуються. Функція змішування зображень будується шляхом розв'язання задачі мінімізації функціоналу енергії. В структурі функціоналу використовується вагова функція, яка будується з використанням В-сплайнів. Метод дозволяє отримати непогані візуальні результати, але має велику обчислювальну складність та тривалий час обробки.

В даній роботі розглядається метод синтезу комбінованого зображення, який дозволяє зберегти кольори фрагменту, що накладається, а згладжування переходу від одного зображення до іншого здійснюється не на всій області вставки, а лише на її частині – області перекриття.

Постановка задачі. Нехай $\Delta = (0, W) \times (0, H)$ – множина в R^2 , з якою зв'яжемо піксельну сітку розміру $W \times H$. Нехай $I_1(x, y)$ – функція фонового зображення, яка визначена на Δ . Позначимо через $Q \subset \Delta$ – область, де здійснюється вставка фрагменту іншого зображення, функцію якого позначимо $I_2(x, y)$. Значеннями функцій I_1 та I_2 для повнокольорових зображень є R, G, B -характеристики відповідних пікселів (x, y) . Нехай $\Omega \subset Q$ – область перекриття між зображеннями I_1 та I_2 , на якій здійснюється «змішування» пікселів обох зображень (див.рис.1).

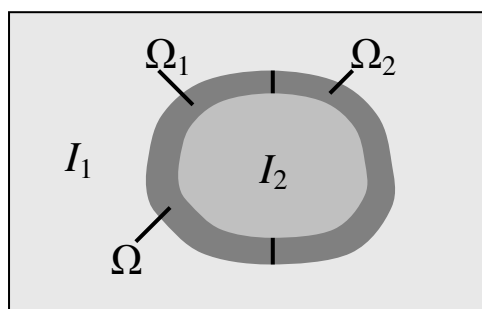


Рис. 1. Схема вставки фрагменту

Область Ω має бути достатнього розміру для створення візуально згладженого переходу від фонового зображення до фрагменту зображення, що вставляється. Задача полягає у відшуванні функції $I(x, y)$ результуючого зображення зі згладженою областю перекриття та рівномірним кольором. Для цього необхідно обрати правило, за яким на області Ω будуть змішуватися пікселі двох зображень таким чином, щоб створити візуально згладжений перехід від фонового зображення до фрагменту, що вставляється.

Опис методу вставки. Для реалізації в комп'ютерній системі був розроблений метод вставки фрагменту зображення з використанням ідей, викладених в роботі [6] для розв'язання задачі створення панорамного зображення шляхом «зшивання» двох вихідних зображень. Для згладжування переходу від одного зображення до іншого будемо використовувати функцію вагової маски α в області перекриття Ω . Один з можливих способів вибору такої функції є пошук її як розв'язку рівняння Лапласа

$$\Delta\alpha = 0, \quad x \in \Omega$$

з граничними умовами Діріхле та/або Неймана на границі $\partial\Omega$. Відзначимо, що границя $\partial\Omega$ в нашому випадку складається з двох частин – зовнішньої та внутрішньої: $\partial\Omega = \partial\Omega_3 + \partial\Omega_6$. Розглянемо такі граничні умови для функції маски: $\alpha = 0$ на $\partial\Omega_6$ та $\alpha = 1$ на $\partial\Omega_3$. Тоді природно обрати такий простий спосіб змішування зображень в області Ω :

$$I = \alpha I_1 + (1 - \alpha) I_2.$$

Тут вагова функція маски плавно змінюється від одиниці на зовнішній границі до нуля на внутрішній. Це забезпечує співпадіння результуючого зображення з фоновим зображенням на зовнішній границі області вставки та з фрагментом, що вставляється, на внутрішній границі. Але недоліком такого способу знаходження функції маски є те, що змішування з отриманою таким чином маскою буде однаковим для всіх видів зображень I_1, I_2 та не буде враховувати їх візуальні особливості. Для подолання цього недоліку пропонується використовувати варіаційну модель з обмеженнями, в якій функція маски є параметром функціоналу енергії.

Розділимо область Ω на дві частини Ω_1 та Ω_2 , які відрізняються напрямом переходу від фонового зображення до фрагменту вставки в області перекриття (див. рис. 1). Нехай B – границя між Ω_1 та Ω_2 , $D_1 = \partial\Omega_1 \cap \partial\Omega$, $D_2 = \partial\Omega_2 \cap \partial\Omega$. На Ω_1 та Ω_2 введемо обмеження для функції маски. Позначимо :

$$\tilde{\Lambda}_1 = \{\alpha \mid \partial_x \alpha \leq 0, \frac{\partial \alpha}{\partial \bar{n}} = 0 \text{ на } B, \alpha = f \text{ на } D_1\}, \quad (1)$$

$$\tilde{\Lambda}_2 = \{\alpha \mid \partial_x \alpha \geq 0, \frac{\partial \alpha}{\partial \bar{n}} = 0 \text{ на } B, \alpha = f \text{ на } D_2\}, \quad (2)$$

де $0 \leq f \leq 1$ – гранична функція. Відзначимо, що обмежувальні нерівності у $\tilde{\Lambda}_i$ є градієнтними. Введемо наступні простори:

$$\Lambda_i = \{(\alpha, u) : \alpha \in W^{1,2}(\Omega_i), \alpha \in \tilde{\Lambda}_i, 0 \leq \alpha \leq 1, u \in L^2(\Omega_i)\}, i = 1, 2.$$

На елементах цих просторів означимо функціонали

$$E_i(\alpha, u) = \int_{\Omega_i} |\nabla \alpha|^2 dx + \int_{\Omega_i} \alpha(u - I_1)^2 dx + \int_{\Omega_i} (1 - \alpha)(u - I_2)^2 dx, i = 1, 2. \quad (3)$$

Тут $\nabla = [\partial_x \partial_y]^T$ – оператор градієнта. Для кожної підобласті $\Omega_i \subset \Omega$ розглянемо задачу мінімізації:

$$E_i(\alpha^*, u^*) = \min_{(\alpha, u) \in \Lambda_i} E_i(\alpha, u), i = 1, 2. \quad (4)$$

Наведена в (3) структура функціоналів $E_i(\alpha, u)$ пояснюється наступними міркуваннями. Перший доданок у цьому функціоналі забезпечує гладкість α , а наступні два є умовами близькості результуючої функції u до функцій I_1 та I_2 на відповідних границях: коли α наближується до одиниці, u змушена стати ближче до I_1 ; коли α наближується до нуля, u змушена стати ближче до I_2 . Розв'язком задачі мінімізації (4) буде пара функцій: вагова маска α дасть правило «змішування» функцій I_1 та I_2 , а функція u саме и буде результуючою функцією зображення на області Ω .

Розглянемо область Ω_1 . Перетворимо задачу (4) з обмеженнями на таку:

$$\min_{(\alpha, u, v) \in \Lambda_1^0} \{E_1^0(\alpha, u, v) = \int_{\Omega_1} |\nabla \alpha|^2 dx + \int_{\Omega_1} \alpha(u - I_1)^2 dx + \int_{\Omega_1} (1 - \alpha)(u - I_2)^2 dx + \frac{\mu}{2} \int_{\Omega_1} (\partial_x \alpha + v)^2 dx\}, \quad (5)$$

де

$$\Lambda_1^0 = \{(\alpha, u) : \alpha \in W^{1,2}(\Omega_1), \alpha = f \text{ і } \partial_x \alpha = 0 \text{ і } \partial_y \alpha = 0 \text{ і } \partial_n \alpha = 0 \text{ і } \alpha \geq 0, u \in L^2(\Omega_1), v \geq 0\}.$$

Тут обмеження із (1) перетворено на штрафний доданок у функціоналі з новою змінною v . Якщо параметр μ достатньо великий, то $v \geq 0$ гарантує $\partial_x \alpha \leq 0$. В [6] доведено, що у випадку неперервності граничної функції f задача (5) має єдиний розв'язок. Для його знаходження запропоновано чисельний алгоритм з використанням методу змінних напрямків ADMM [5], який являє собою ітераційний пошук мінімуму функції Лагранжа вихідної проблеми. В результаті для знаходження функції маски на кожній ітерації отримано таке матричне рівняння:

$$((2 + \mu)\partial_x^T \partial_x + 2\partial_y^T \partial_y + \mu J)\alpha = -\partial_x^T (\mu v^{k+1} + \lambda_2 J) - \lambda_1 - g + \mu \beta^{k+1}, \quad (6)$$

де λ_1, λ_2 - множники Лагранжа, ∂_x та ∂_y – матричні форми відповідних дискретних операторів згортки, J – одинична матриця. Система рівнянь (6) лінійна, вона може бути розв'язана з використанням чисельних методів. Ітераційна формула для функції u : $u^{k+1} = \alpha^k I_1 + (1 - \alpha^k) I_2$. В якості α^0 можна обрати функцію, яка лінійно спадає від $\partial \Omega_3$ до $\partial \Omega_6$, початкові значення множників Лагранжа $\lambda_1^0 = 1, \lambda_2^0 = 1$, параметр $\mu = 1$. Більш детально ітераційна процедура описана в [6]. Аналогічним чином задача розв'язується на області

Ω_2 з відповідним урахуванням обмеження (2) в якості штрафного доданку у функціоналі задачі (5).

Описаний вище метод безшовного накладення фрагментів зображень був реалізований в комп'ютерній системі синтезу комбінованих зображень. Разом з цим методом в системі реалізований метод безшовного клонування на основі відновлення зображення за його градієнтним полем з використанням рівняння Пуассона. Комп'ютерна система розроблена на мові Java, має зручний інтерфейс, який передбачає кнопки для виконання таких функцій: загрузка вихідних зображень, виділення фрагменту зображення для вставки та перенос його за допомогою курсору в певне місце фонового зображення, виконання процедури згладжування обраним методом, збереження результатів.

Аналіз результатів. Розглянемо деякі приклади безшовної вставки фрагментів на тестових зображеннях, які отримані в представленій комп'ютерній системі. У першому прикладі маємо на вході растрове зображення (рис. 2), елементи якого застосуємо в якості фрагментів, що накладаються. Один раз вставку здійснимо методом відновлення зображення за його градієнтом, другий раз застосуємо метод на основі варіаційної моделі (рис. 3).



Рис. 2. Вхідне зображення



Рис. 3. Результати вставки фрагменту: а) методом відновлення зображення за його градієнтом; б) методом на основі варіаційного підходу

Як видно з рис. 3а, використання методу на основі відновлення зображення за його градієнтом дає зміну кольору вставленого фрагменту, він є більш темним порівняно з вихідним зображенням. Границя вставленого фрагменту є згладженою, контур об'єкта чітким. На рис. 3б, де вставка здійснена методом на основі варіаційного підходу, видно, що фрагмент не змінив свій колір, але має більш розмиту границю. Результат безшовного клонування в цьому випадку залежить від того, як було виділено об'єкт, що вставляється, та від розміру виділеної розширеної границі (зони перекриття зображень), на якій виконувалось змішування пікселів.

Розглянемо інший приклад вставки фрагментів. Оберемо зображення на рис. 4а в якості фонового зображення, а вставляти будемо виділений фрагмент на рис. 4б. Проаналізуємо три різні випадки застосування методу безшовної вставки на основі варіаційного підходу для трьох різних за розміром областей перекриття між накладеними зображеннями. Загальний розмір області вставки в цьому прикладі становить 42026 пікселів. На рис. 5 представлені результати вставки з різними розмірами області змішування.

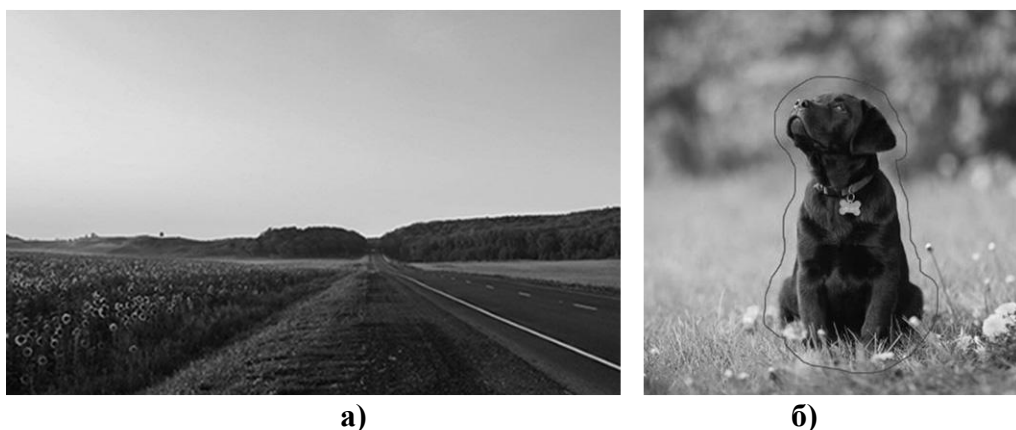


Рис. 4. Вихідні зображення: а) фонове; б) зображення, фрагмент якого вставляється

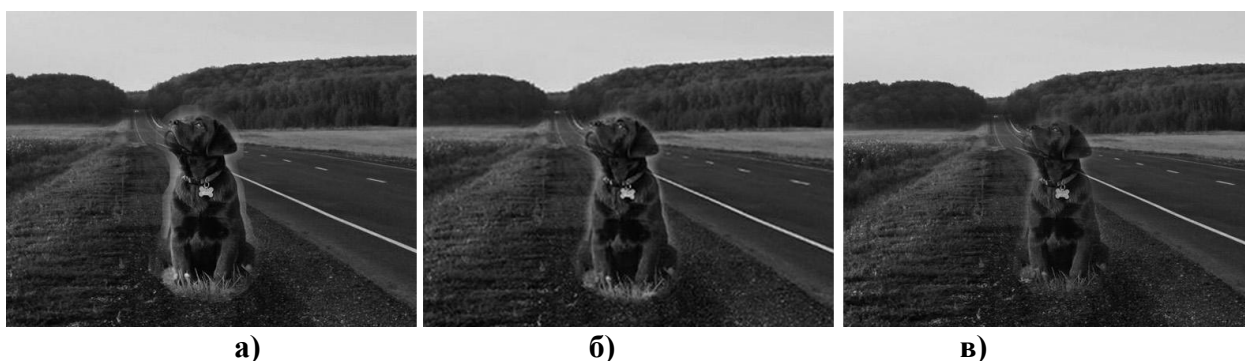


Рис. 5. Результати вставки: а) область перекриття 8240 пікселів, б) область перекриття 14000 пікселів, в) область перекриття 19000 пікселів

Можна побачити, що у випадку області змішування меншого розміру (рис. 4а) границя фрагменту вставки є менш розмитою, але більш видимою. В таких випадках необхідно додатково застосовувати процедуру корекції кольорів. Найбільш згладжений перехід має зображення з областю перекриття найбільшого розміру (рис. 4в). Але при цьому вставлений фрагмент декілька

втрачає свою інтенсивність поблизу границі вставки. Отже, результат безшовного клонування залежить від способу виділення границі фрагменту та розміру області перекриття зображень.

Висновки. В ході дослідження був розглянутий метод безшовного накладення фрагментів зображень на основі варіаційного підходу з використанням вагової функції маски для комбінування функцій зображень в області їх перекриття. Цей метод був реалізований в комп'ютерній системі для здійснення автоматичного безшовного вставлення фрагментів одного зображення в певні місця іншого та отримання результуючого комбінованого зображення з рівномірним кольором вставлених частин та згладженими границями вставки. Тестування системи на різних типах зображень підтвердило ефективність обраних рішень. Практична цінність системи полягає в тому, що вона може бути застосована для обробки зображень у дизайні, рекламі та інших областях, що потребують створення комбінованих зображень.

Бібліографічні посилання

1. **Ballester, C.** Disocclusion by joint interpolation of vector fields and gray levels [Text] / C. Ballester, V. Caselles, J. Verdera // *SIAM journal: Multiscale Modelling and Simulation*. – 2003. – Vol.2, № 1. – P.80-123.
2. **Chan, T. F.** Variational PDE models in image processing [Text] / T. F. Chan, J. Shen, L. Vese // *Notices of the American Mathematical Society*, 50(1), 2003. – P. 14–26.
3. **Perez, P.** Poisson image editing [Text] / PatrickPerez, Michel Gangnet, Andrew Blake // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. – July 2003.– Vol. 22, no.3. – P.313-318.
4. **Su, M. S.** Analysis on multiresolution mosaic images [Text] / M. S. Su, W. L. Huang, K. Y. Cheng // *IEEE Trans. Image Process.*, 13 (2004). P. 952–959.
5. **Wahlberg, B.** An ADMM algorithm for a class of total variation regularized estimation problems [Text] / B.Wahlberg, S. Boyd, M. Annergren, Y. Wang // *Proc. 16th IFAC Sympos. Syst. Identificat., Brussels, Belgium, Jul. 2012*. P.83-88.
6. **Wang, W.** A Variational Approach for Image Stitching [Text] / Wei Wang, Michael K. Ng // *Society for Industrial and Applied Mathematics 2013. SIAM J. Imaging Sciences*. – Vol. 6, no. 3. – P.1318-1344.
7. **Zeng, Y.** A Novel Unified Variational Image Editing Model [Text] / Y. Zeng, W. Chen, Q.-S. Peng // *Comput. Sci. & Technol.* – Mar. 2006. – Vol.21, no.2. – P.224-231.
8. **Сердюк, М.Є.** Апроксимативна модель задачі реконструкції зображень [Текст] // *Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2007. – Вип.10(30). – С.112-120.

Надійшла до редколегії 21.04.2017