

Оптимальное комплексирование изображений видеопоследовательности

А.И. Максимов¹, В.В. Сергеев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В данной работе рассматривается задача повышения разрешения изображения с использованием серии кадров видеопоследовательности. Предлагается информационная технология оптимального в терминах среднеквадратического отклонения комплексирования изображений видеосигнала. При мультиплексировании серии кадров для каждого предварительно увеличенного кадра формируется поле дисперсий ошибок интерполяции. Значения данного поля используются для вычисления оптимальных весовых коэффициентов отсчетов при формировании результирующего изображения большего пространственного разрешения. Для исследования предлагаемого метода была проведена серия экспериментов на тестовой видеопоследовательности со статически закрепленной камерой.

1. Введение

Для решения прикладных задач в различных областях знаний часто имеется потребность в изображениях высокого разрешения, которую способны дать далеко не все средства регистрации. Одним из примитивных вариантов решения данной проблемы может являться увеличение исходного изображения до необходимого разрешения с интерполяцией отсчетов.

Однако, при наличии нескольких изображений запечатлеваемой сцены, возможно прибегнуть к методам сверхразрешающего восстановления. Сверхразрешение эффективно применяется в таких областях как медицина [1, 2], астрономия и микроскопия [3], в обработке данных дистанционное зондирование Земли [4], компьютерное зрение [5], криминалистика [6] и т.д. Широко известны ставшие классическими подходы к сверхразрешению по серии изображений, основанные на использовании методов интерполяции по неравномерной сетке [7], использовании преобразования Фурье [8], вейвлет-преобразования [9], проекций на выпуклые множества [10], адаптивной фильтрации [11], Байесовского оценивания [12] и т.д. Несмотря на множество известных алгоритмов, в данной области продолжается активная разработка новых алгоритмов и совершенствование известных.

В данной работе рассматривается часть задачи сверхразрешающего восстановления изображения с использованием серии кадров видеопоследовательности, связанная с восстановлением изображения высокого разрешения по серии предварительно геометрически согласованных кадров, разрешение которых было увеличено до требуемого, а недостающие отсчеты интерполированы. Предлагаемый метод заключается во взвешенном комплексировании отсчетов кадров последовательности. Весовые коэффициенты при этом

вычисляются оптимальным образом исходя из минимизации среднеквадратической ошибки (СКО) интерполяции.

Данная статья выстроена следующим образом – рассматривается процедура оптимального комплексирования изображений: сначала задача оптимального суммирования неравноточных измерений, после на ее основе предлагается алгоритм сверхразрешающего восстановления изображения по серии кадров; далее приводятся результаты экспериментального исследования предложенного метода на тестовом наборе, в заключении данной работы подводятся итоги проделанной работы.

2. Процедура оптимального комплексирования изображений видеопоследовательности

2.1. Оптимальное суммирование неравноточных измерений

Рассмотрим задачу суммирования неравноточных измерений. Пусть доступными для наблюдения имеются измерения некоторой величины, представленные с разной точностью:

$$y_i = x + v_i, \quad i \in [0, I-1], \quad (1)$$

где y_i – доступная для наблюдений величина, x – исходная величина, оценку которой необходимо построить, v_i – шумовая компонента, i – целочисленный аргумент, I – количество доступных наблюдений.

Необходимо построить линейную оценку, обеспечивающую наибольшую точность в терминах среднеквадратической ошибки:

$$\hat{x} = \sum_{i=0}^{I-1} a_i y_i, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{кв}}^2 = M \left\{ (\hat{x} - x)^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где \hat{x} – оценка исходной величины по наблюдаемой, $\varepsilon_{\text{кв}}^2$ – минимизируемая среднеквадратическая ошибка, a_i – весовая функция суммирования.

Построим несмещенную оценку, считая x константой, так, чтобы дисперсия ошибки была минимальной:

$$\sum_{i=0}^{I-1} a_i = 1, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\text{кв}}^2 = \sum_{i=0}^{I-1} a_i^2 D_i^{(v)} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $D_i^{(v)}$ – дисперсия ошибки.

Рассмотрим a_0 :

$$a_0 = 1 - \sum_{i=1}^{I-1} a_i. \quad (6)$$

Продифференцируем выражение (5) для среднеквадратической ошибки:

$$\frac{d\varepsilon_{\text{кв}}^2}{da_j} = -2 \left(1 - \sum_{i=1}^{I-1} a_i \right)^2 D_0^{(v)} + 2a_j^2 D_j^{(v)} = 0, \quad j \in [1, I-1]. \quad (7)$$

Решив данное уравнение относительно $\sum_{i=1}^{I-1} a_i$, получаем выражение для весовой функции суммирования:

$$a_i = \frac{1}{\sum_{j=0}^{I-1} \frac{1}{D_j^{(v)}}}, \quad i \in [0, I-1]. \quad (8)$$

Выражение для среднеквадратической ошибки (5) будет следующим:

$$\varepsilon_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{I-1} D_i^{(v)}} . \quad (9)$$

С учетом полученных результатов, выражение для оценки значения (2) примет следующий вид:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=0}^{I-1} \frac{y_i}{D_i^{(v)}}}{\sum_{i=0}^{I-1} \frac{1}{D_i^{(v)}}}, i \in [0, I-1] . \quad (10)$$

2.2. Общий алгоритм оптимального комплексирования изображений

В данной работе предлагается метод оптимального комплексирования кадров для сверхразрешающего восстановления изображения. Предлагаемый подход предполагает дополнение увеличенных кадров видеопоследовательности дополнительным каналом, содержащим поле дисперсии ошибок интерполяции в точке. Данный канал используется для вычисления значений отсчетов восстанавливаемого изображения по выражению (10). Алгоритм оптимального комплексирования изображений следующий:

Алгоритм 1. *Оптимальное комплексирование изображений.*

Шаг 1. Увеличение кадров:

- Учащение сетки пикселей с интерполяцией значений.

Шаг 2. Формирование дополнительного канала для кадров:

- Вычисляются поля дисперсии ошибок интерполяции для каждого кадра.

Шаг 3. Геометрическое согласование кадров:

– Производится получение матриц перехода при помощи выбранных методов геометрического согласования (в рамках данной работы новые методы геометрического согласования кадров не производились, так что предлагается использование известных решений данной задачи);

- Преобразование кадров в соответствии с матрицами перехода;

- Преобразование полей дисперсии ошибок в соответствии с матрицами перехода.

Шаг 4. Формирование восстановленного изображения:

– Вычисление значений отсчетов результирующего изображения в каждой точке с использованием выражения (10).

3. Экспериментальное исследование предлагаемого метода

Для экспериментального исследования предлагаемого метода был сформирован тестовый набор из 10 видеозаписей с использованием статично закрепленной камеры. На видеозаписях была запечатлена калибровочная сетка, которой придавалось умеренное движение в кадре. Все тестовые видеозаписи содержали полутоновых 100 кадров размерами 700×700.

В экспериментальном исследовании исследовалось влияние предлагаемого алгоритма на СКО интерполяции восстанавливаемого изображения. Оно производилось следующим образом: кадры исходной видеопоследовательности были уменьшены в 5 раз, после чего при их помощи производилось восстановление первого кадра видеопоследовательности предложенным в работе методом. Каждый кадр при этом был предварительно увеличен до исходного разрешения с использованием билинейной интерполяции. Кадры были геометрически согласованы с применением алгоритма [13]. СКО интерполяции восстановленных изображений усреднялось по всем видеозаписям тестового набора. На рисунке 1 представлены примеры изображений кадров тестового набора, а также исходное и восстановленное изображения.

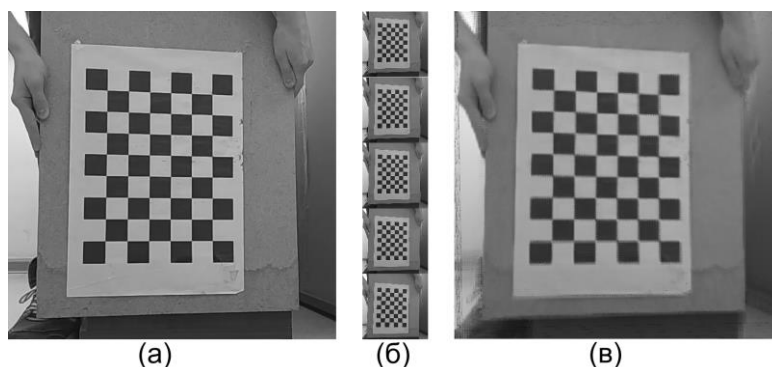


Рисунок 1. Исходное изображение (а), примеры кадров видеопоследовательности низкого разрешения (б) и восстановленное изображение с использованием предложенного метода (в). Относительный масштаб изображений сохранен.

Также были получены результаты для комплексирования кадров видеопоследовательности без использования предлагаемых в данной работе оптимальных весовых коэффициентов.

В ходе проведения экспериментальных исследований была получена следующая зависимость СКО интерполяции результирующего изображения (усредненное по тестовому набору) от количества использованных при комплексировании кадров последовательности, представленная на рисунке 2.

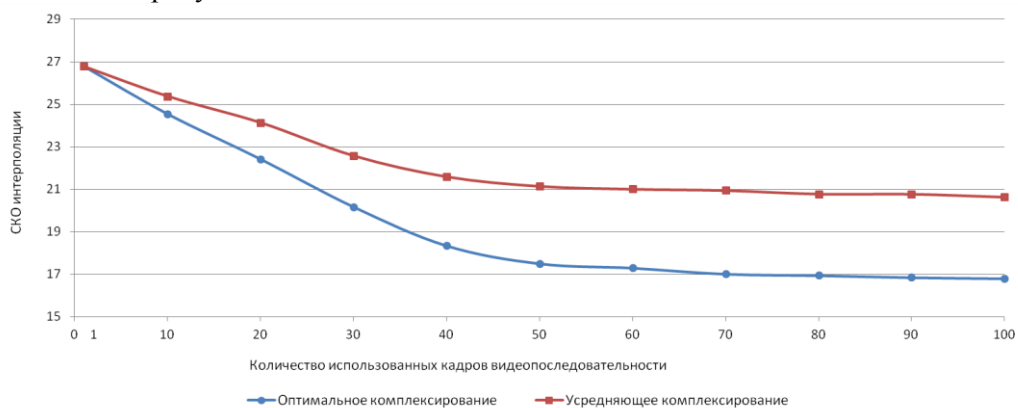


Рисунок 2. Зависимость усредненного по тестовому набору СКО интерполяции результирующего изображения от количества использованных при комплексировании кадров последовательности.

Как можно видеть из представленной зависимости, применение предложенного метода заметно снижает ошибку интерполяции восстановленного изображения. Заметим, что чем больше кадров видеопоследовательности задействовано, тем ниже значение СКО интерполяции результирующего изображения. Таким образом, использование нескольких кадров видеопоследовательности позволяет снизить СКО интерполяции результирующего изображения до полутора раз. Также можно заметить, что использование оптимального суммирования разноточных измерений позволяет значительно снизить СКО результирующего изображения по сравнению с результатами, полученными для невзвешенного метода комплексирования изображений.

4. Заключение

В данной работе был предложен метод оптимального комплексирования кадров видеопоследовательности для сверхразрешающего восстановления изображения. Для данного метода было выведено выражение для вычисления весовых коэффициентов, минимизирующее среднеквадратическую ошибку интерполяции исходных кадров низкого разрешения. В ходе

экспериментального исследования на наборе тестовых видеозаписей была показана эффективность предложенного метода в снижении СКО интерполяции восстановленного изображения.

5. Благодарности

Работы выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-31-90113-Аспиранты, а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

6. Литература

- [1] Isaac, J.S. Super resolution techniques for medical image processing / J.S. Isaac, R. Kulkarni // Proceedings International Conference on Technologies for Sustainable Development, ICTSD, 2015. – Vol. 7095900.
- [2] Sano, Y. Super-resolution method and its application to medical image processing / Y. Sano, T. Mori, T. Goto, S. Hirano, K. Funahashi // IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics, GCCE, 2017. – Vol. 2017. – P. 1-2.
- [3] Chainais, P. Quantitative control of the error bounds of a fast super-resolution technique for microscopy and astronomy / P. Chainais, P. Pfennig, A. Leray // ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. –2014. – Vol. 6854121. – P. 2853-2857.
- [4] Shen, H. Super-resolution reconstruction algorithm to MODIS remote sensing images / H. Shen, M.K. Ng, P. Li, L. Zhang // Computer Journal. – 2009. – Vol. 52(1). – P. 90-100.
- [5] Shi, F. Fast super-resolution reconstruction for video-based pattern recognition // F. Shi, J. Yuan, X. Zhu / Proceedings - 4th International Conference on Natural Computation, ICNC. – 2008. – Vol. 4. – P. 135-139.
- [6] Zamani, N.A. Multiple-frames super-resolution for closed circuit television forensics / N.A. Zamani, M.Z.A. Darus, S.N.H. Abdullah, M.J. Nordin // Proceedings of the 2011 International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Robotics, ICPAIR. – 2011. – Vol. 1. – P. 36-40.
- [7] Grigorjev, I.S. Physical Values: Reference Book / I.S. Grigorjev, E.Z. Mejlihov – Moscow: “Energoatomizdat” Publisher, 1991. – 1232 p.
- [8] Tsai, R.Y. Multiple frame image restoration and registration / R.Y. Tsai, T.S. Huang // Advances in Computer Vision and Image Processing – Greenwich, CT: JAI Press Inc., 1984. – P. 317-339.
- [9] Bose, N.K. Super-resolution with second generation wavelets / N.K. Bose, S. Lertrattanapanich, M.B. Chappali // Signal Process. Image Commun. – 2004. – Vol. 19. – P. 387-391.
- [10] Stark, H. High resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections / H. Stark, P. Oskoui // J. Opt. Soc. Am. A. – 1989. – Vol. 6. – P. 1715-1726.
- [11] Elad, M. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images / M. Elad, A. Feuer // IEEE Trans. Image Processing. – 1997. – Vol. 6(12). – P. 1646-1658.
- [12] Segall, C.A. Bayesian high-resolution reconstruction of low-resolution compressed video / C.A. Segall, R. Molina, A.K. Katsaggelos, J. Mateos // IEEE International Conference on Image Processing. – 2001. – Vol. 2. – P. 25-28.
- [13] Thervenaz, P. A pyramid approach to subpixel registration based on intensity / P. Thervenaz, U.E. Ruttimann, M. Unser // IEEE Transactions on Image Processing. – 1998. – Vol. 7(1). – P. 27-41.

Optimal fusing of video sequence images

A.I. Maksimov¹, V.V. Sergeev^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. In this paper, we consider the problem of multi-frame superresolution. We propose an information technology of optimal (in terms of mean square error) multiplexing of video signals. A field of interpolation error dispersions is formed for each previously enlarged frame before the fusion procedure. The values of this field are used to calculate the optimal weighting coefficients of every sample during the formation of the resulting image with a higher spatial resolution. A series of experiments was carried out on a test video clip with a statically mounted camera to examine the proposed method.