

УДК 004.9:532.574

А.Е. МОЧАЛИН

Донбасский государственный технический университет, Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ, ОСНОВАННАЯ НА ОПТИМИЗАЦИИ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрены основные недостатки существующих в настоящее время информационных технологий обработки трассерных изображений. Предложен новый метод обработки двумерных изображений трассеров, основанный на итерационном построении реконструированного кадра. Реконструированный кадр строится на основе первого кадра путем определения смещения каждого пикселя трассерного изображения. Исследованы влияние различных подходов, в рамках рассматриваемого метода, на конечный результат. Намечены дальнейшие пути совершенствования информационной технологии обработки трассерных изображений.

Ключевые слова: трассерное изображение, реконструированный кадр, информационная технология, метод градиентного спуска.

Основы подхода

Для изучения потоков жидкости и газа часто применяют методы трассерной визуализации. Суть этих методов заключается в том, что в поток жидкости или газа добавляют маленькие частички (трассеры) и наблюдают за их перемещением в потоках. Развитие цифровой и компьютерной техники, и как следствие, использование цифровых методов регистрации изображений и обработки данных, привело к появлению информационных технологий обработки изображений частиц – трассеров, визуализирующих течение сплошных сред. Информационная технология обработки трассерного изображения включает в себя метод обработки изображения, алгоритм, реализующий заданный метод, и соответствующее программное обеспечение. В настоящее время существуют различные информационные технологии обработки трассерных изображений, позволяющие получить довольно точные количественные и качественные характеристики течений жидкости и газа. В основе данных технологий лежат алгоритмы кросскорреляции [1], дискретного сдвига окон DWS, симметричного CDI [2 – 4] и несимметричного FDI [5 – 9] смещения элементарных областей разбиения, методы коррекции изображения CDIC [10 – 13] и др. Однако, на сегодняшний день, еще остается ряд нерешенных проблем, среди которых наиболее острыми являются: высокие требования к системам регистрации трассерных изображений, что значительно увеличивает их стоимость, а так же небольшая точность обработки трассерных изображений с большими локальными градиентами скорости. Поэтому

довольно перспективным направлением является разработка новых алгоритмов обработки трассерных изображений. Одним из таких новых направлений, может быть метод основанный на поиске векторов смещения путем минимизации ошибки с использованием градиентного спуска.

Основная идея, разрабатываемого метода – построение на основе первого кадра реконструированного изображения, имеющего минимальное отличие от второго кадра. Мерой отличия служит значение следующей функции:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{((J_r)_{ij} - (J_2)_{ij})^2}{(J_{\max})^2}}, \quad (1)$$

где $(J_1)_{ij}, (J_2)_{ij}, (J_r)_{ij}$ – интенсивность пикселя i, j на первом, втором и реконструированном кадрах; J_{\max} – интенсивность самого яркого пикселя; M, N – размеры трассерного изображения в пикселях.

Реконструированное изображение строится на основе первого путем определения смещения каждого пикселя трассерного изображения по следующим формулам:

$$dx_{ij}^k = X_1^k (1 - \xi_1)(1 - \xi_2) + X_2^k \xi_1 (1 - \xi_2) + X_3^k \xi_1 \xi_2 + X_4^k \xi_2 (1 - \xi_1); \quad (2)$$

$$dy_{ij}^k = Y_1^k (1 - \xi_1)(1 - \xi_2) + Y_2^k \xi_1 (1 - \xi_2) + Y_3^k \xi_1 \xi_2 + Y_4^k \xi_2 (1 - \xi_1), \quad (3)$$

где dx_{ij}^k, dy_{ij}^k – соответственно горизонтальное и вертикальное перемещение пикселя с координатами

i, j , принадлежащего элементарному окну разбиения с номером k , между первым и вторым кадрами;

$X_1^k, X_2^k, X_3^k, X_4^k$ – узловые значения горизонтальных проекций векторов перемещения;

$Y_1^k, Y_2^k, Y_3^k, Y_4^k$ – узловые значения вертикальных проекций векторов перемещения;

ξ_1, ξ_2 – локальные координаты пикселя i, j .

Узловые значения проекций векторов перемещения определяются на основе данных стандартного кросскорреляционного алгоритма.

Локальные координаты пикселя зависят от его глобальных координат i, j , высоты m и ширины n элементарного окна разбиения (рис. 1):

$$\xi_1 = \frac{i}{m}; \quad \xi_2 = \frac{j}{n}. \quad (4)$$

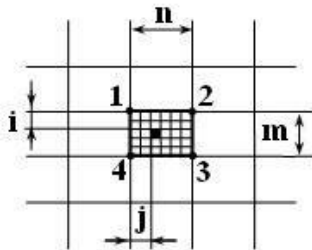


Рис. 1. Элементарное окно разбиения

В данном методе пиксели могут иметь дробное смещение. Интенсивность пикселя с дробным смещением распределялась по четырем соседним пикселям на реконструированном кадре пропорционально площади их пересечения с переместившимся пикселем первого кадра. Таким образом интенсивность пикселя на реконструированном кадре определяется по следующей формуле:

$$(J_r)_{pq} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (J_1)_{ij}^k (S_{pq})_{ij}^k}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_{pq})_{ij}^k}, \quad (5)$$

где $(S_{pq})_{ij}^k$ – площадь пересечения пикселя первого кадра с координатами i, j с пикселем p, q на реконструированном кадре.

Площадь пересечения $(S_{pq})_{ij}^k$ (рис. 2) вычисляется по следующей формуле:

$$(S_{pq})_{ij}^k = (a_{pq})_{ij}^k (b_{pq})_{ij}^k, \quad (6)$$

где $(a_{pq})_{ij}^k, (b_{pq})_{ij}^k$ вычисляются по формулам (7, 8)

$$(a_{pq})_{ij}^k = \begin{cases} 0, & (q - j - dx_{ij}^k) \geq 1; \\ j + dx_{ij}^k - q + 1, & (q + dx_{ij}^k) < q; \\ q + 1 - j - dx_{ij}^k, & (j + dx_{ij}^k) > q; \end{cases} \quad (7)$$

$$(b_{pq})_{ij}^k = \begin{cases} 0, & (p - i - dy_{ij}^k) \geq 1; \\ i + dy_{ij}^k - p + 1, & (p + dy_{ij}^k) < p; \\ p + 1 - j - dy_{ij}^k, & (i + dy_{ij}^k) > p. \end{cases} \quad (8)$$

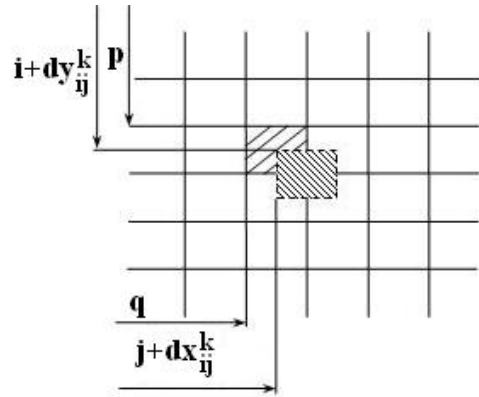


Рис. 2. Пиксель p, q на реконструированном кадре и положение смещенного пикселя i, j первого кадра

Алгоритм поиска векторов смещения состоит из итерационного уточнения значений узловых векторов перемещения, и включает в себя следующие основные шаги:

1. Применение стандартного кросскорреляционного метода для расчета первого приближения векторов смещения окошек разбиения.
2. Формирование узловых значений векторов перемещения (рис. 3).

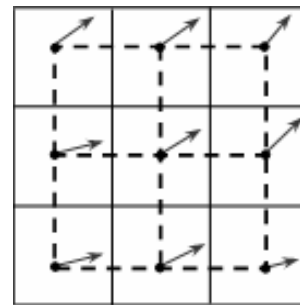


Рис. 3. Узловые значения векторов перемещения

3. Расчет смещения каждого пикселя изображения по узловым значениям с применением линейной интерполяции (формула 2, 3).

4. Построение реконструированного изображения.

5. Вычисления функции отличия между реконструированным изображением и вторым кадром (формула 1).

6. Уточнение узловых значений компонент перемещений из условия минимума функции E по методу градиентного спуска

Сравнительный анализ

Для исследования особенностей предложенного метода использовалась пара синтетических трассерных изображений (рис. 4, а, б), соответствующих плоскому течению в трубе, в котором проекции скорости жидкости определяются формулами:

$$V_x = A \left(1 - \left(\frac{2y}{h} - 1 \right)^2 \right), V_y = 0, V_z = 0, \quad (9)$$

где V_x, V_y, V_z – смещение точки в каждом из трех направлений; h – высота трубы; A – амплитуда.

Описанным методом, на основе первого кадра строилось реконструированное изображение (рис. 4, в), имеющие минимальное отличие от второго кадра. Как видно из графиков (рис. 5, а), в целом построение реконструированного кадра не вносит заметных искажений в распределение интенсивности пикселей. Небольшое отличие между реконструированным и синтетическими кадрами мы можем наблюдать только в области самых ярких пикселей (рис. 5, б). Это связано с тем, что пиксели имеют в основном дробное смещение, и яркость пикселя первого кадра распределяется обычно по нескольким пикселям второго кадра, тем самым уменьшая количество наиболее ярких пикселей.

Результаты работы программного обеспечения, реализующего описываемый метод, сравнивались с результатами работы программы EDPIV, разрабатываемой с 1997 года доктором университета Миссисипи Личуан Гуи, и предназначенной для профессиональной обработки цифровых трассерных изображений. Во всех сравниваемых вариантах в качестве результата приводятся профили перемещения вдоль оси X , которое является преобладающим.

Исследовалось влияние различных модификаций метода на точность результата, таких как использование элементарных окошек разбиения различных размеров, применение медианного фильтра для отсева ошибочных векторов скорости и их последующие восстановление линейной интерполяцией на этапе формирования первого приближения, итерационный поиск с уменьшением размеров элементарных окошек разбиения вдвое на каждой новой итерации, и комбинирование, описываемых выше подходов.

В итоге экспериментально было отмечено, что наименьшее значение функция отличия принимает при использовании медианной фильтрации, линейной интерполяции совместно с градиентным поиском и итерационным подходом с числом итераций равным двум (рис. 6, б). При этом базовый кросскорреляционный метод (рис. 6, а) без фильтрации и адаптации имеют довольно большую погрешность (на 30% хуже значение функции ошибки, чем у EDPIV).

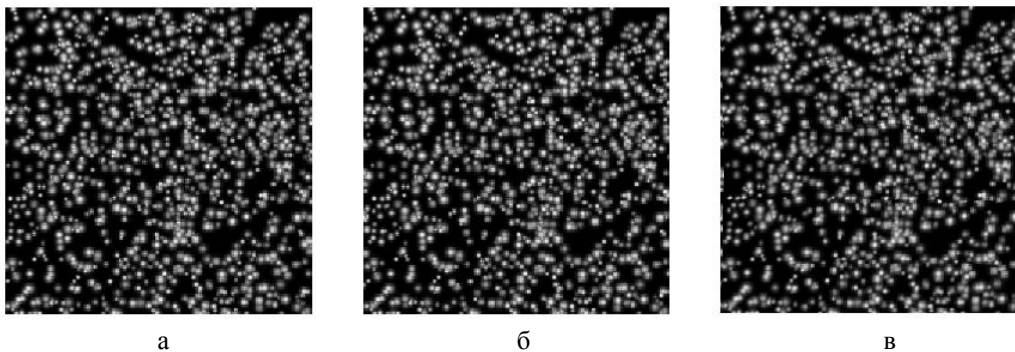


Рис. 4. Пара синтетических трассерных изображений (а, б) и реконструированный кадр (в)

Выводы

Методы исследования потоков жидкости, основанные на обработке трассерных изображений, в настоящее время активно используются. Существуют различные информационные технологии обработки трассерных изображений, позволяющие получить довольно точные количественные и качественные характеристики течений жидкости, но еще существует ряд нерешенных проблем. Поэтому имеется необходимость в разработке новых методов обработки изображений трассеров. Одним из таких новых направлений является предложенный метод

поиска векторов смещения на трассерном изображении на основе построения реконструированного кадра и минимизации его отличия от второго кадра. Такой подход фактически объединяет в себе все основные известные направления повышения точности анализа цифровых трассерных изображений: учет сдвига элементарных подобластей, коррекцию изображения, учет взаимосвязи между перемещениями различных точек, а также подпиксельную интерполяцию. Это и определяет потенциальные преимущества этого подхода.

В дальнейшем планируется исследовать эффективность использования генетических алго-

ритмов поиска минимума функции отличия. Так как функция отличия может являться многоэкстремальной, генетические алгоритмы поиска могут работать эффективнее градиентных методов. Также планируется провести детальное тестиро-

вание информационной технологии основанной на данном методе с использованием реальных PIV изображений, исследовать влияние возможного шума, предусмотреть возможность соответствующей коррекции.

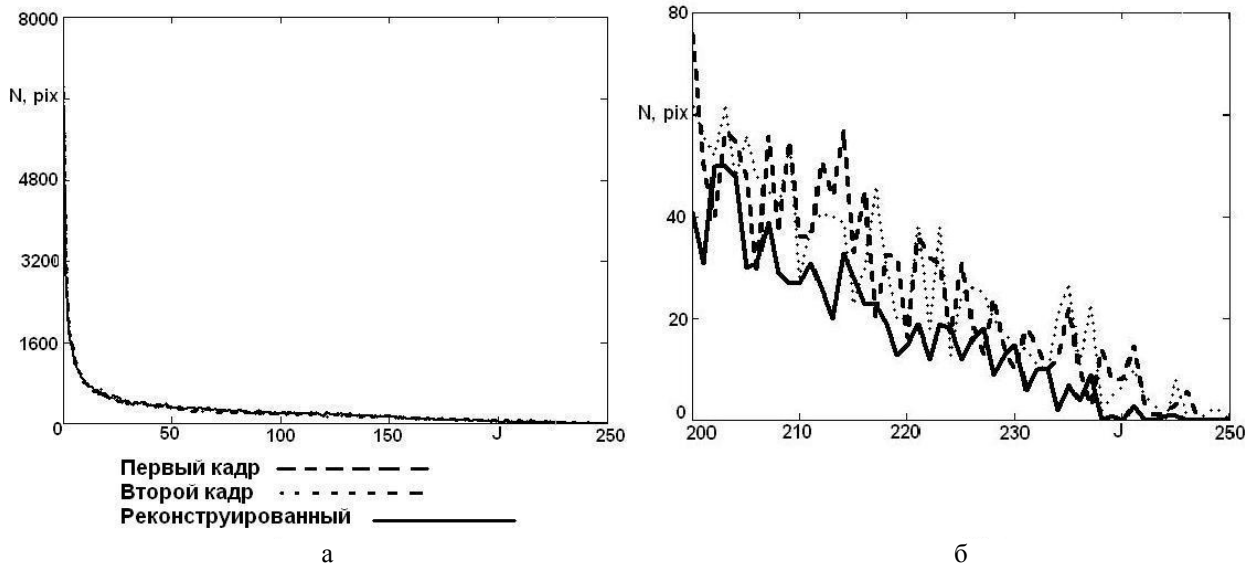


Рис. 5. Распределение серого на синтетических и реконструированном трассерных изображениях (а), распределение серого на синтетических и реконструированном трассерных изображениях в области наиболее ярких пикселей (б)

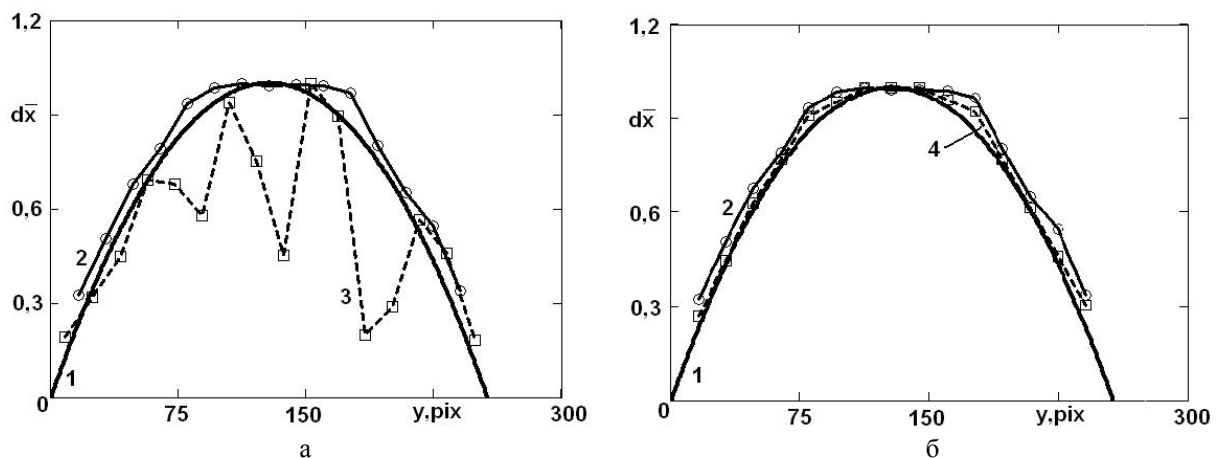


Рис. 6. Профиль скорости в трубе: 1) теоретический профиль; 2) профиль построенный программой EDPIV (значение функции ошибки $E = 21,3180$); 3) профиль, полученный стандартной кросскорреляцией без фильтрации и дальнейшей адаптации ($E = 34,2933$); 4) профиль построенный на основе данных полученных новым методом с использованием двух итераций, медианной фильтрации и уменьшением сетки разбиения вдвое ($E = 12,1844$)

Литература

1. Longo J. Solid/free-surface juncture boundary layer and wake / J. Longo, H.P. Huang, F. Stern // *Exp in Fluids*. – 1998. – Vol. 25, № 4. – P. 283-287.
2. Wereley S.T. Microfluidic PIV: Algorithms and Experiments / S.T. Wereley, C.D. Meinhart, J.G. Santi-

ago // *Amer. Phys. Soc. / Div. Fluid Dyn. Annual Meeting, Philadelphia, 13-16 Nov. 1998.* – P. 23-25.

3. Wereley S.T. Accuracy Improvements in Particle Image Velocimetry Algorithms / S.T. Wereley, C.D. Meinhart // *Proc. 10-th Int. Sym. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mech, Lisbon, Portugal, 15 – 20 Sep. 2000.* – P. 13-14.

4. Wereley S.T. *Second-order accurate particle image velocimetry* / S.T. Wereley, C.D. Meinhart // *Exp. in Fluids*. – 2001. – Vol. 31, № 3. – P. 258-268.
5. Keane R.D. *Theory and simulation of particle image velocimetry* / R.D. Keane, R.J. Adrian // *5th Int. Conf. Laser Anem. Advances App, Veldhoven, Netherlands, 23-27 Aug. 1993*. – P. 477.
6. Willert C.E. *The fully digital evaluation of photographic PIV recordings* / C.E. Willert // *Applied Scientific Research*. – 1996. – Vol. 56, №2–3. – P. 79-102.
7. Cowen E.A. *A hybrid digital particle tracking velocimetry technique* / E.A. Cowen, S.G. Monismith // *Exp. in Fluids*. – 1997. – Vol. 22, № 3. – P. 199-211.
8. Westerweel J. *The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings* / J. Westerweel, D. Dabiri, M. Gharib // *Exp. in Fluids*. – 1997. – Vol. 23, № 1. – P. 20-28.
9. Scarano F. *Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset* / F. Scarano, M.L. Riethmuller // *Exp. in Fluids*. – 1999. – Vol. 26, №6. – P. 513-523.
10. Huang H.T. *Limitation and improvement of PIV* / H.T. Huang, H.E. Fiedler, J.J. Wang // *Exp. in Fluids*. – 1993. – Vol. 15, № 4–5. – P. 263-273.
11. Tokumaru P.T. *Image correlation velocimetry* / P.T. Tokumaru, P.E. Dimotakis // *Exp. in Fluids*. – 1995. – Vol. 19, № 1. – P. 1-15.
12. Lin H.J. *Improved methods for thin surface boundary layer investigations* / H.J. Lin, M. Perlin // *Exp. in Fluids*. – 1998. – Vol. 25, № 5-6. – P. 431-444.
13. Nogueira J. *Local field correction PIV: on the increase of accuracy of digital PIV systems* / J. Nogueira, A. Lecuona, P.A. Rodriguez // *Exp. in Fluids*. – 1999. – Vol. 27, № 2. – P. 107-116.

Поступила в редакцію 6.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проректор по науковій роботі Н.Н. Заблудский, Донбасський державний технічний університет», Алчевск, Україна.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ТРАСЕРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ, ЗАСНОВАНА НА ОПТИМІЗАЦІЇ РЕКОНСТРУЙОВАНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

О.Є. Мочалін

Розглянуті основні вади інформаційних технологій обробки трасерних зображень, що існують на даний час. Запропоновано новий метод обробки двовимірних зображень трасерів, заснований на ітераційній побудові реконструйованого кадру. Реконструйований кадр будується на основі першого кадру шляхом визначення зсуву кожного пікселя трасерного зображення. Досліджено вплив різних підходів, у рамках методу, що розглядається, на точність кінцевого результату. Намічено подальші шляхи вдосконалення інформаційної технології обробки зображень трасерів.

Ключові слова: трасерне зображення, реконструйований кадр, інформаційна технологія, метод градієнтного спуску.

INFORMATION IMAGING TRACER TECHNOLOGY, BASED ON OPTIMIZATION OF THE RECONSTRUCTED IMAGE

A.Y. Mochalin

The drawbacks of modern information technologies of tracer images processing are considered. A new method of evaluation of 2d tracer images is proposed, based on the iterative building of the reconstructed image. The reconstructed frame is based on the first frame by determining the displacement of each pixel of tracer image. The influence of different approaches within the viewing method on the accuracy of final result is explored. The perfection ways of information technology of tracer images processing is outlined.

Key words: tracer image, reconstructed frame, information technologies, gradient descent method.

Мочалін Александр Евгеньевич – аспірант каф. «Спеціалізовані комп'ютерні системи», Донбасський державний технічний університет, Алчевск, Україна, e-mail: Omigo@i.ua.