

УДК 535.317.1

doi 10.26089/NumMet.v17r321

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАМЕРЫ СВЕТОВОГО ПОЛЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКОВ

А. В. Серёдкин¹, М. П. Токарев²

Применение современных оптико-электронных приборов расширяет возможности исследований в области экспериментальной механики жидкостей. Методы вычислительной фотографии за счет использования основанных на ней устройств постепенно проникают в различные области науки и техники. Камера светового поля может использоваться для регистрации трехмерных распределений скорости в потоках жидкости и газа там, где расположение нескольких панорамных оптических сенсоров затруднено за счет ограничения оптического доступа и вибраций. В работе исследованы возможности пленоптической системы, состоящей из доступной на рынке промышленной камеры светового поля применительно для диагностики течений жидкости и газа. Предложен и протестирован новый программный алгоритм для вычисления карты глубины регистрируемой измерительной области. Согласно полученным результатам, пространственное разрешение метода по глубине при использовании 11 мегапиксельного сенсора достигает 1/40 от глубины резкости оптической системы. Указанный метод был использован для измерения 3D-полей скорости турбулентной струи внутри щелевого канала по всей его глубине. В будущем количество задач, в которых целесообразно использование пленоптических устройств с высоким пространственным разрешением, будет расти.

Ключевые слова: алгоритм программной перефокусировки, вычисление карты глубины, камера светового поля, пленоптическая система, оптическая диагностика потоков, PIV (Particle Image Velocimetry), PTV (Particle Tracking Velocimetry).

1. Введение. На сегодняшний день матричные полупроводниковые устройства получили широкое распространение в задачах фотограмметрии. Количественное измерение характеристик объекта бесконтактными методами незаменимо в быту, производстве и исследованиях. Для решения таких задач можно применять набирающие популярность камеры светового поля. Оптическая схема камеры представлена на рис. 1. В отличие от обычной камеры, зарегистрированное изображение с камеры светового поля содержит информацию о ходе луча. Используя такую камеру, можно получить трехмерную информацию об объекте исследования так же, как и при использовании стереоскопической или малоракурсной томографической системы, состоящей из 2–4 камер.

В настоящей статье описывается алгоритм, предназначенный для вычисления трехмерных координат объектов по изображению, полученному камерой светового поля с гексагональным расположением микролинз, как, например, в камере Raytrix R11M [1, 2]. В случае использования камеры в двухкадровом кросс-корреляционном режиме появляется возможность измерения поля скоростей в заданном объеме потока методом цифровой трассерной визуализации или методом Particle Image Velocimetry (PIV) [3].

2. Применяемые методы. В этом разделе описаны методы, применяющиеся для калибровки камеры светового поля перед съемкой изображений, и разработанный авторами альтернативный метод программной перефокусировки зарегистрированных необработанных изображений.

Сначала коротко опишем последовательность шагов для выполнения калибровки камеры. Непосредственно перед работой с камерой ее фокусируют на плоскость за исследуемой областью по наблюдению субапертурных изображений, соответствующих дальним элементам сцены, которые должны быть в резкости. Далее перед объективом размещается равномерно освещенный белый фон и выбирается положение диафрагмы объектива, при котором соседние субапертурные изображения (рис. 2) граничат друг с другом, не перекрываясь. Пленоптическая система работает в режиме с фиксированной диафрагмой, определяемой характеристиками микролинзового массива. Поэтому количество света, регистрируемого светочувствительной матрицей, регулируется интенсивностью источника освещения и временем экспозиции. После подстройки апертуры объектива регистрируется белое изображение. Белое изображение — это

¹ Новосибирский государственный университет, физический факультет, ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск; инженер, e-mail: sasha7-93@mail.ru

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН), просп. Лаврентьева, 1, 630090, г. Новосибирск; ст. науч. сотр., e-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

изображение, снятое при равномерной засветке светочувствительной матрицы камеры. Пример такого изображения для камеры светового поля представлен на рис. 2. В дальнейшем при перефокусировке или изменении диафрагмы объектива белое изображение необходимо снять повторно.

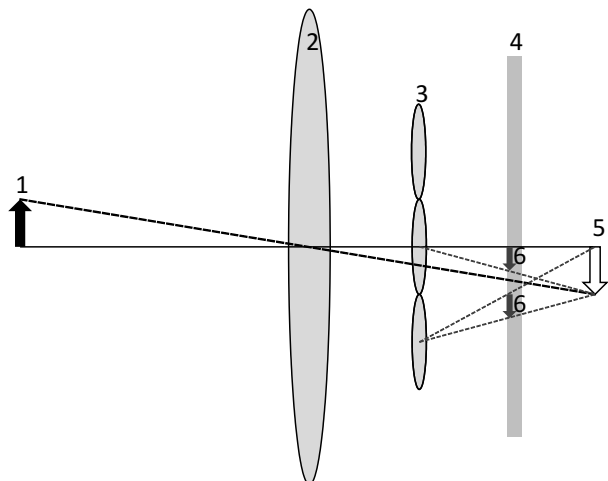


Рис. 1. Оптическая схема камеры светового поля:
1) объект, 2) объектив, 3) массив микролинз,
4) светочувствительная матрица, 5) виртуальное
положение объекта после объектива, 6) изображение
объекта на фотоматрице

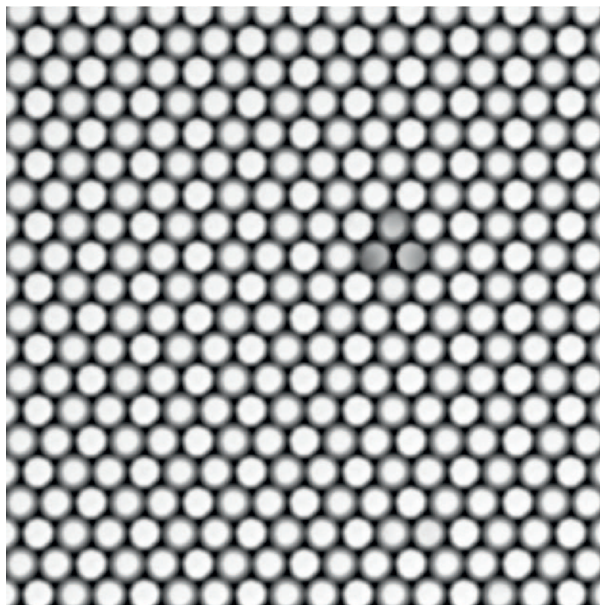


Рис. 2. Белое изображение, получаемое при
регистрации равномерно освещенного объекта

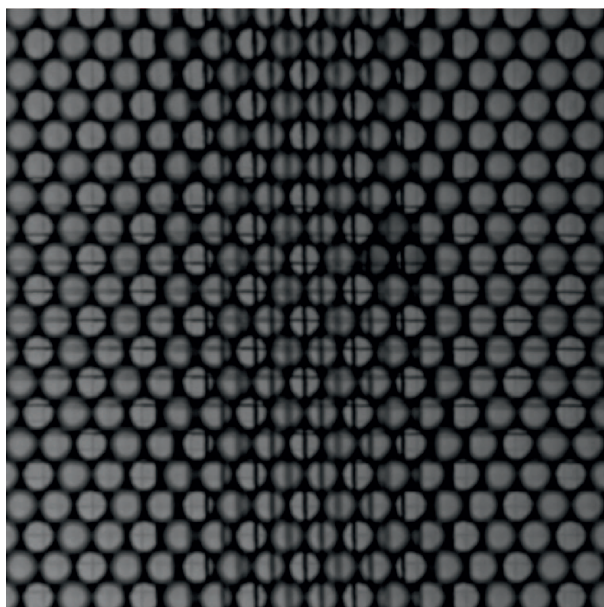


Рис. 3. Исходное необработанное изображение

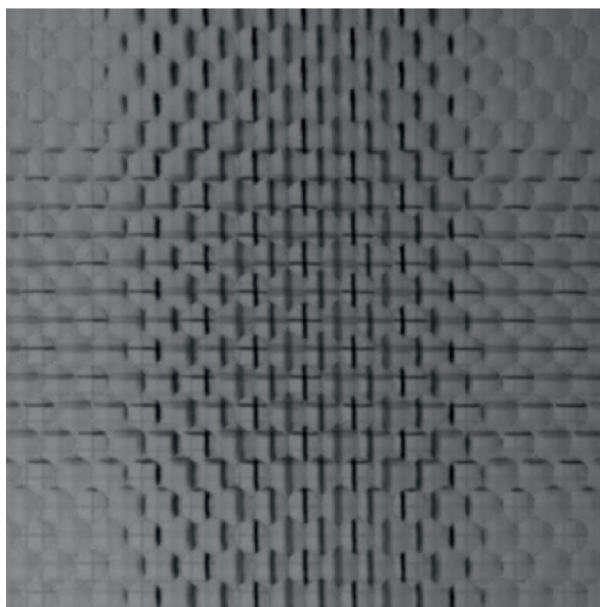


Рис. 4. Изображение после предварительной
обработки

В данной работе для калибровки микролинзового массива размер и положение микролинз определялись по белому изображению. Поскольку центры микролинз лежат в узлах двумерной гексагональной решетки, то для более точного определения центров микролинз вычислялись вектора решетки. Поиск векторов решетки производился методом наименьших квадратов, принимая вектора решетки и общее смещение как неизвестные величины. Значение векторов решетки и координаты начала решетки поз-

воляли хранить информацию о центрах микролинз в компактном виде и восстанавливать координаты центра при необходимости. По контуру белой области определялся тип микролинз. В используемой камере установлены микролинзы трех типов, отличающихся оптической силой. Они распределены равномерно по всей решетке и предназначены для восстановления соответственно ближней, средней и дальней части регистрируемой сцены по глубине.

После калибровки микролинзового массива камера готова к регистрации объекта измерения. После съемки изображения выполняется независимая обработка каждого изображения. Первый шаг заключается в устранении темных участков изображения в пространстве между микролинзами. Это достигается путем умножения яркости пикселя на величину, обратно пропорциональную яркости этого же пикселя на белом изображении:

$$P(x, y) = \frac{I_{\max} I(x, y)}{W(x, y)},$$

где I — исходное изображение, W — белое изображение, I_{\max} — максимальная интенсивность для данной разрядности изображения. Указанная предварительная обработка выполняется независимо для каждого пикселя изображения. Это позволяет уменьшить эффект виньетирования — неравномерность освещения частей микролинзы, связанную с изменением угла проецирования лучей в зависимости удаленности от центра микролинзы. Кроме того, это частично компенсирует дефекты оптики и другие причины постоянного во времени неравномерного освещения. Пример такой обработки показан на рис. 3 и 4.

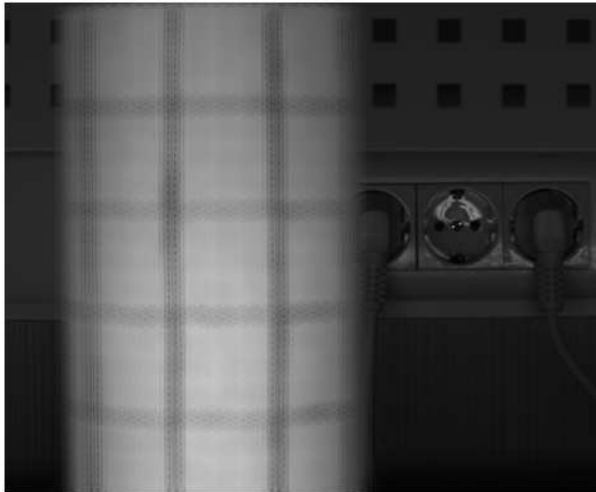


Рис. 5. Изображение, перефокусированное на задний фон

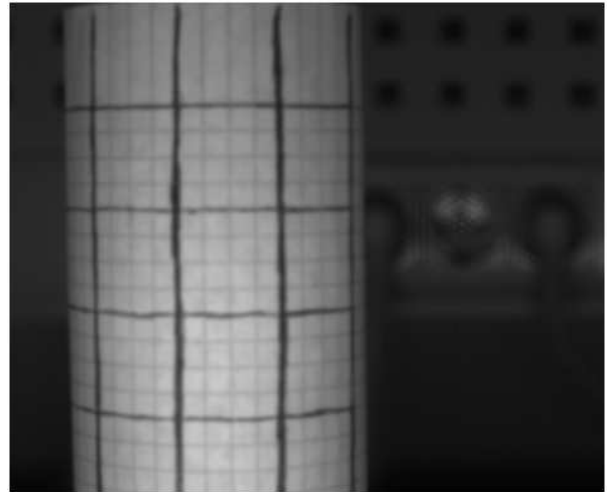


Рис. 6. Изображение, перефокусированное на передний объект

Основная работа по реконструкции изображения объекта выполняется алгоритмом вычисления изображений с заданным фокусным расстоянием. Такая процедура называется программной перефокусировкой. Это означает, что по одному изображению светового поля можно получить серию изображений с различными фокусными расстояниями уже после регистрации снимка (рис. 5 и 6). В этой процедуре каждая точка обрабатывается независимо. Фокусное расстояние полученного изображения определяется виртуальной глубиной. Виртуальная глубина — это безразмерная величина, которая характеризует коэффициент увеличения изображения в микролинзе. Связь реальной и виртуальной глубины можно определить экспериментально по снимкам объектов (калибровочная мишень) на известной глубине.

Для точки с координатами (x, y, v) вычисляется множество микролинз, в которых видна эта точка. Для этого центры микролинз должны лежать внутри круга с центром в точке (x, y) и радиусом $R = r v$, где r — радиус микролинзы и v — виртуальная глубина. Далее необходимо оставить только микролинзы, тип которых соответствует виртуальной глубине v . Для каждого типа микролинз диапазон глубины определен заранее и определяется оптической силой микролинзы. Следующий шаг — вычисление интенсивности, соответствующей точке (x, y, v) . Пусть центр микролинзы имеет координаты (mx, my) , тогда образ точки (x, y, v) будет иметь координаты (x', y') :

$$x' = mx + \frac{x - mx}{v}, \quad y' = my + \frac{y - my}{v}.$$

Поскольку (x', y') — вещественные числа, то интенсивность в этой точке можно получить аппроксимацией по соседним пикселям на изображении. Заключительный шаг — усреднение полученных интенсивностей

и сохранение их на изображении [1]. Фактически, представленный алгоритм увеличивает изображение отдельной микролинзы в v раз относительно центра (рис. 7). При проведении съемки следует учитывать, что качество получаемого изображения зависит от виртуальной глубины объектов.

Теперь рассмотрим алгоритм восстановления изображения, когда положение объектов по глубине неизвестно и необходимо определить глубину объектов. В используемом в данной работе методе изображение разбивалось на области небольшого размера, например 16 на 16 пикселей (влияние размера области описано ниже). Описываемый алгоритм вычисляет одно значение глубины для всех точек внутри одной области разбиения. Дальнейшая обработка каждой области происходила независимо друг от друга. Однако для отдельной области восстановление изображения и определение его глубины — это неразрывные задачи. Алгоритм программной фокусировки вычислял массив интенсивностей, при этом анализировался разброс яркости элементов массива. Если фокусное расстояние программной перефокусировки совпадает с реальной глубиной объекта, то значения интенсивностей будут близки друг к другу. В противном случае значения в массиве могут заметно отличаться. Для численной характеристики близости значений интенсивности вычислялось среднее квадратичное отклонение. Таким образом, поиск реальной глубины сводился к минимизации суммы среднее квадратичных отклонений значений интенсивности внутри области разбиения. Пример такой зависимости показан на рис. 8.

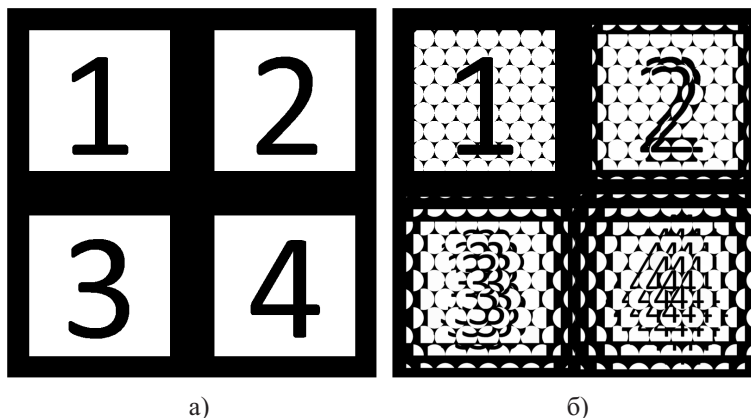


Рис. 7. Слева — исходная модель. Справа — изображение, получаемое камерой. Виртуальная глубина участков изображения: 1, 2, 3 и 4 соответственно

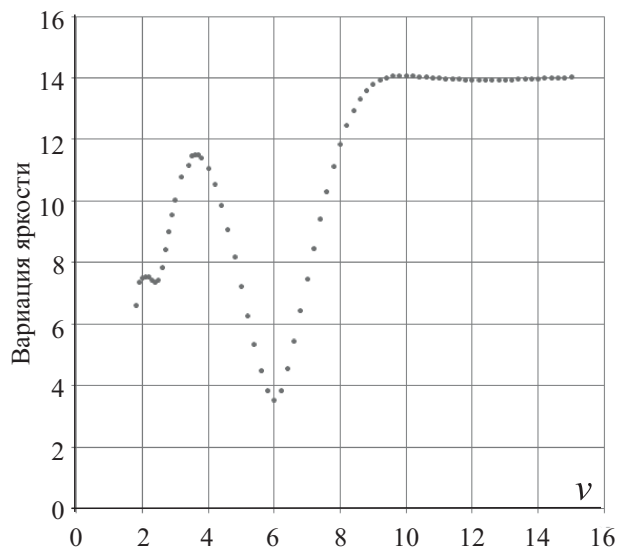


Рис. 8. Пример зависимости вариации яркости субпертурных проекций области разбиения (сумма среднее квадратичных отклонений) при синтезе интенсивности в данной точке области разбиения от ее виртуальной глубины

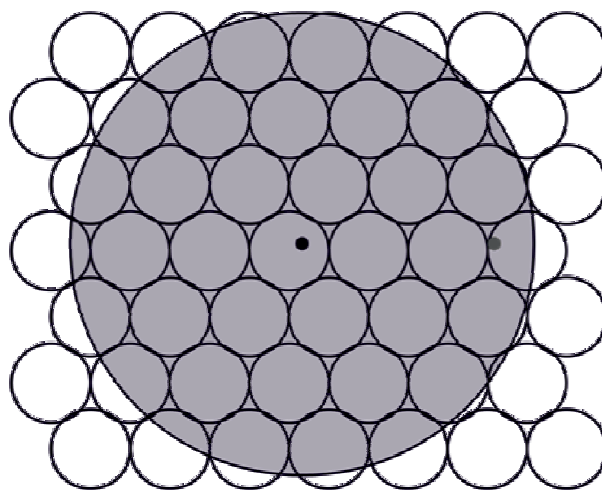


Рис. 9. Точка в центре — реальное положение частицы. Большая окружность — область, в которой находятся изображения частицы. Серая точка — пример такого изображения

Для грубого нахождения минимума последовательно вычислялись вариации яркости для точек внутри диапазона виртуальных глубин с постоянным шагом между точками. Далее, для уточнения положения минимума использовался тернарный поиск в предположении вогнутости функции вблизи минимума. Алгоритм, состоящий из этих двух шагов, позволяет находить глобальный минимум функции на первом шаге, но сохраняет логарифмическую сложность относительно точности определения минимума на втором шаге. После нахождения глубины изображение в области восстанавливается алгоритмом программной

перефокусировки. Для работы алгоритма необходимо обнаружение одного и того же изображения элемента объекта на различных микролинзах. Это ограничивает наименьшее значение виртуальной глубины в зависимости от структуры массива микролинз. Желательно, чтобы любая часть интересующей области была видна из двух или более микролинз. Размер области разбиения влияет на результат работы алгоритма, так как при увеличении области возможно попадание объектов с различной глубиной в одну область. В таком случае глубина части области будет определена некорректно. Уменьшение размера области увеличивает уровень шумов, что может привести к неверному нахождению минимума, а следовательно, и к неверному определению глубины.

На заключительном шаге восстановленные элементы изображения объединяются в одно синтезированное изображение, а также создается карта высот. На практике можно сохранять результат сразу в соответствующую часть изображения и карты высот. Независимое восстановление отдельных частей позволяет обрабатывать изображение в многопоточном режиме. Когда необходимо восстанавливать только части изображения, области можно располагать не регулярной сеткой, а только в интересующих частях. Например, такая ситуация возникает при наблюдении за разреженными частицами. В этом случае можно рассматривать круглые области, покрывающие отдельную частицу. Предложенный алгоритм не способен определить глубину монотонных участков изображения. Кроме того, для зеркальных поверхностей глубина может быть определена неверно, что накладывает некоторые ограничения на объект исследования.

3. Анализ погрешностей. Точность определения виртуальной глубины v зависит от контрастности изображения. Тем не менее, аналитическое значение погрешности можно оценить из геометрических соотношений, использующихся при реконструкции изображения:

$$r = \frac{R}{v}, \quad x' = mx + \frac{x - mx}{v}.$$

Для оценки рассмотрим максимальные смещения (см. рис. 9). Тогда справедливы соотношения

$$r \approx |x' - mx|, \quad R \approx |x - mx|, \\ R = (r \pm \Delta r) * (v \mp \Delta v),$$

где Δr — характерное расстояние различимости соседних пикселей. Возьмем его равным половине пикселя, учтем равенство относительных погрешностей для v и r и получим $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2r}$. Таким образом, относительная погрешность для определения виртуальной глубины одной точки является константой и зависит от радиуса микролинзы. В процессе обработки интенсивность усредняется по нескольким значениям. Для массива с тремя типами микролинз количество копий равно $N \approx 0.3 v^2$. Тогда при объединении яркости из нескольких копий изображения абсолютная погрешность вычисления виртуальной глубины становится константой зависящей от размера микролинзы:

$$\Delta v_N \approx \frac{\Delta v}{\sqrt{N}} \approx \frac{0.9}{r}.$$

Точность восстановления положения координат (x, y) на виртуальной глубине v можно сравнивать с идентичной фотокамерой без массива микролинз. В микролинзах изображение уменьшено в v раз:

$$\Delta x \approx \Delta y \approx \Delta r * v.$$

Изображение тоже продублировано N раз. Итоговая погрешность относительно камеры без массива микролинз:

$$\Delta x_N \approx \Delta y_N \approx \frac{\Delta x}{\sqrt{N}} \approx 1.8 \Delta r \approx 0.9.$$

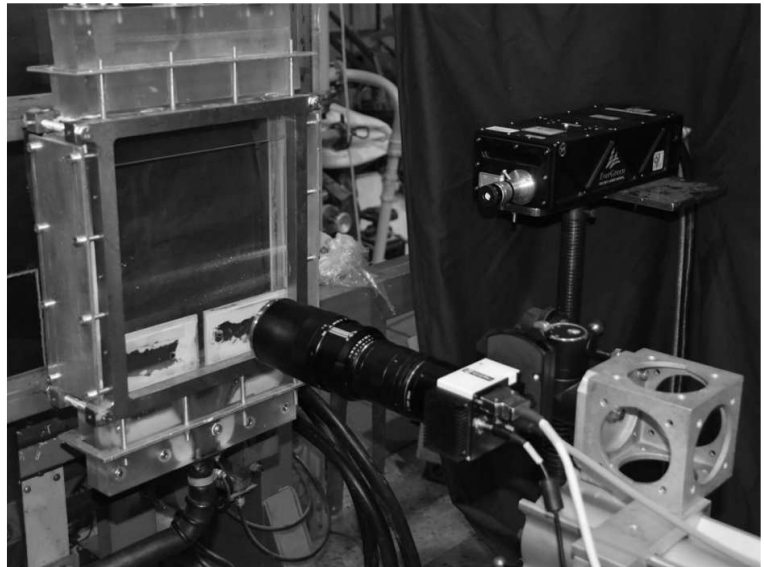


Рис. 10. Фотография тестового участка с оборудованием

4. Примеры измерений и результатов. Представленным методом было измерено поле скоростей в щелевой струе. Установка, на которой происходил эксперимент, детально описана в работах [4, 5]. Фотография установки показана на рис. 10.

Дистиллированная вода с добавлением полиамидных трассерных частиц средним диаметром 20 мкм истекала из прямоугольного непрофилированного сопла шириной 10 мм и глубиной 4 мм в щелевой канал глубиной 4 мм. Число Рейнольдса, рассчитанное по глубине канала, составляло $Re = 2hU_0/v = 23\,700$. Для регистрации области измерения использовалась камера светового поля Raytrix R11M (SVS-VISTEK svsl1002HR) с размером светочувствительной матрицы 4032×2688 пикселей и размером пикселя 9×9 мкм. Параметры оптики подбирались таким образом, чтобы рабочая глубина резкости пленоптической системы была близка к глубине канала в 4 мм. На камере был установлен объектив Carl Zeiss Makro-Planar 2/100 ZF.2 с фиксированным фокусным расстоянием 100 мм. При этом расстояние от камеры до области измерения составляло 192 мм. Масштабный коэффициент оптики был равен $M = 1.09$ за счет использования удлинительных колец 46 мм. Оптическая система позволяла регистрировать область потока размером 33×22 мм на выходе из сопла. Для согласования угловой апертуры микролинзового массива в $f/9.5$ диафрагма основного объектива была фиксирована в среднее положение между значениями $f/8$ и $f/11$. Камера работала в двухкадровом PIV-режиме для регистрации пары кадров с минимальной задержкой 30 мкс между ними.

Для освещения области измерения применялся двухканальный импульсный Nd:АИГ лазер Quantel EverGreen с энергией в импульсе 70 мДж и длительностью импульса менее 10 нс. Оптический формирователь лазерного ножа устанавливался на выходе излучателя лазера для засветки области измерения через боковую прозрачную стенку в канале (см. рис. 10). Толщина лазерного ножа выбиралась таким образом, чтобы осветить все пространство по глубине канала на срезе сопла. Лазер и камера были синхронизованы посредством генератора импульсов Berkeley Nucleonics BNC 575. При регистрации изображений частиц использовалась временная задержка в 100 мкс, что соответствовало максимальному перемещению частиц в области измерения в 0.25 мм.

Калибровка глубины пленоптической системы проводилась похожим образом так, как это описано в статье [6]. Плоская калибровочная мишень в виде сетки из круглых маркеров диаметром 0.6 мм и расстоянием между соседними точками 1.5 мм помещалась внутрь щелевого канала в область измерения и фиксировалась там в затопленном положении. Камера, закрепленная на координатном механизме, перемещалась в воздухе с шагом 3 мм относительно установки с мишенью внутри. Всего было записано 5 положений мишени относительно камеры, что при пересчете в систему отсчета, связанную с камерой, соответствовало положениям мишени в воде по глубине -8, -4, 0, 4, 8 мм. При пересчете использовался закон Снеллиуса и показатель преломления воды.

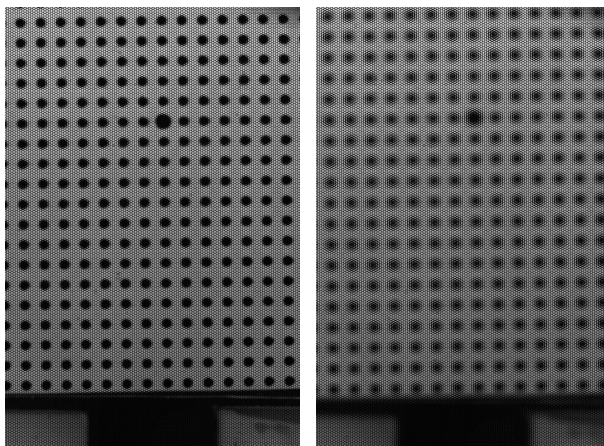


Рис. 11. Пример зарегистрированных необработанных изображений калибровочной мишени внутри канала, соответствующих положениям по глубине -4 мм (слева) и 4 мм (справа)

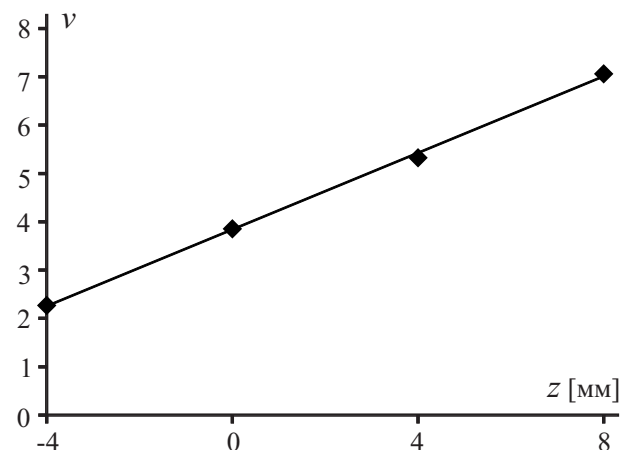


Рис. 12. Калибровочная кривая с зависимостью виртуальной глубины от реального положения объектов по глубине области измерения

Для примера на рис. 11 показаны зарегистрированные изображения для двух положений калибровочной мишени по глубине -4 мм и 4 мм. Для вычисления параметров калибровочной кривой, связывающей получаемые при обработке значения виртуальной глубины и реальные значения в миллиметрах, вычис-

лялось среднее значение виртуальной глубины для каждого из записанных изображений калибровочной мишени по глубине. Вид калибровочной кривой представлен на рис. 12. Для аппроксимации точек на калибровочной кривой использовалась линейная функция, а ее параметры определялись методом наименьших квадратов. Результат оценки параметров выглядел следующим образом: $v = 0.4z + 3.83$ при достоверности аппроксимации $R^2 = 0.99$.

На рис. 13 представлена часть необработанного изображения и ее вид после восстановления изображения описанным алгоритмом. Кроме того, для каждого изображения была построена карта глубины. Для трассировки отдельных изображений частиц на восстановленных изображениях был модифицирован PTV (Particle Tracking Velocimetry) алгоритм пакета программ AcualFlow [4, 7] таким образом, чтобы после идентификации частиц и нахождения парных частиц на обоих кадрах информация о положении и скорости части по глубине бралась из соответствующих пар карты глубин. Благодаря относительно низкой концентрации частиц нахождение пар выполнялось методом ближайшего соседа только по двумерным проекциям с радиусом поиска 30 пикс.

Всего было обработано 600 пар зарегистрированных изображений. По ним описанными выше методами был получен набор мгновенных полей скорости. Пример двумерной проекции мгновенного поля скорости изображен на рис. 14. Каждое поле скоростей в среднем содержало около 500 векторов. Поэтому для вычисления среднего 3D распределения скорости поля проведено усреднение на сетку из $33 \times 22 \times 4$ узлов с пространственным разрешением 1 мм^3 так, чтобы каждый узел усреднялся примерно по 100 значениям скорости. Полученное трехмерное пространственное распределение среднего поля скоростей представлено на рис. 15. Это поле скоростей демонстрирует похожие распределения продольной скорости в поперечных (YZ) сечениях на те, что были опубликованы в работах [4, 6]. На поперечных сечениях продольная скорость выглядит в виде максимума в ядре струи и постепенного уменьшения скорости в направлении стенок канала. На показанном распределении средней скорости ближайшая точка находилась на расстоянии 0.5 мм от стенки канала глубиной 4 мм, поэтому значения скорости в этих точках отличаются от нуля. Для увеличения пространственного разрешения среднего поля скорости в дальнейшем необходимо повышать концентрацию регистрируемых частиц в потоке или увеличивать количество регистрируемых изображений при наборе статистики.

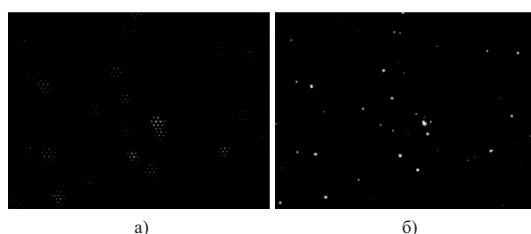


Рис. 13. Фрагмент зарегистрированного изображения частиц (а), восстановленный фрагмент (б)

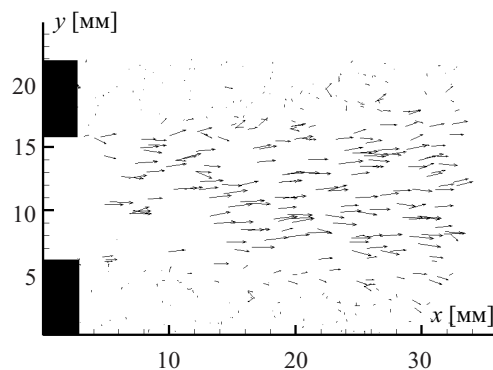


Рис. 14. 2D проекция полученного мгновенного поля скоростей в щелевой турбулентной струе; $Re = 23\,700$ (поле скорости повернуто по часовой стрелке на 90 градусов относительно реального направления потока)

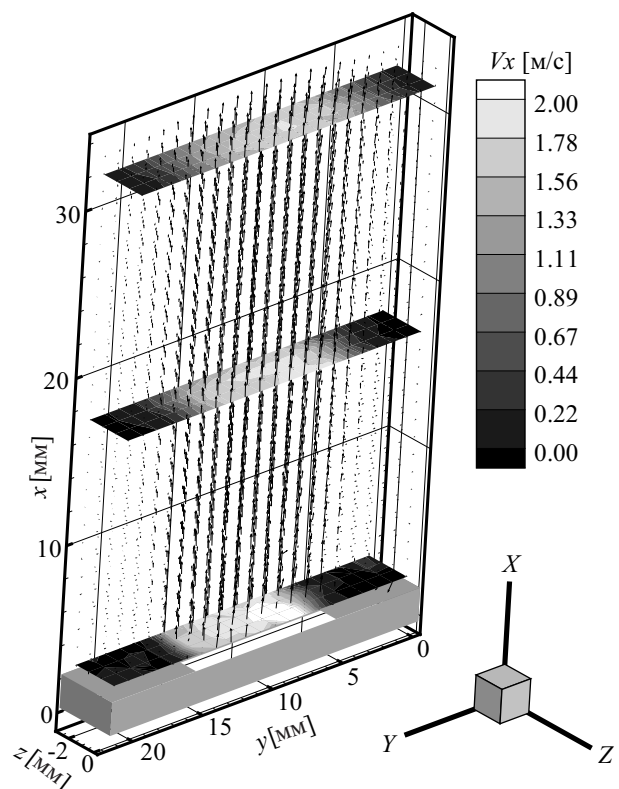


Рис. 15. Среднее 3D-поле скоростей турбулентной струи; $Re=23\,700$ в щелевом канале, усредненное по 600 мгновенным измерениям

Погрешность измерения скорости в эксперименте оценивалась методом регистрации частиц в области измерения без потока. При этом была установлена минимальная задержка по времени в 30 мкс между импульсами лазера, которую позволяла камера, для того чтобы свободно взвешенные трассеры в жидкости не смогли далеко сместиться за время между вспышками. Таким образом, ожидаемые смещения частиц были близки к нулю. Зарегистрированные распределения смещений в миллиметрах по компонентам представлены на рис. 16. Видно, что абсолютная погрешность определения положения частицы в плоскости XY составляет около 0.01 мм (около 1 пикс.). При этом погрешность оценки положения частицы по оси z выше в 10 раз и составляет около 0.1 мм (примерно 10 пикселей), что сравнимо с максимальным зарегистрированным смещением 0.25 мм в эксперименте при наличии потока.

Таким образом, в текущей конфигурации эксперимента высокая погрешность определения компоненты скорости v_z , связанная с ограниченной угловой апертурой устройства, не позволяла надежно оценить скорость потока в этом направлении. Однако точность локализации положения частиц по глубине канала была приемлема для цели демонстрации применимости пленоптических систем для трехмерной диагностики потоков. В используемой конфигурации трехмерный вариант метода PTV, реализованного на одной камере светового поля, можно классифицировать как 3D2C (измеряющий две компоненты скорости в пространстве) в отличие от полноценного 3D3C метода, например как томографического PIV [7]. В перспективе использование пленоптических камер с большим пространственным разрешением (например, в настоящее время на рынке доступна камера с матрицей 29 Мп) и ориентация направления оптической оси камеры вдоль максимальной компоненты скорости потока могут снизить погрешность определения компоненты скорости, параллельной оптической оси.

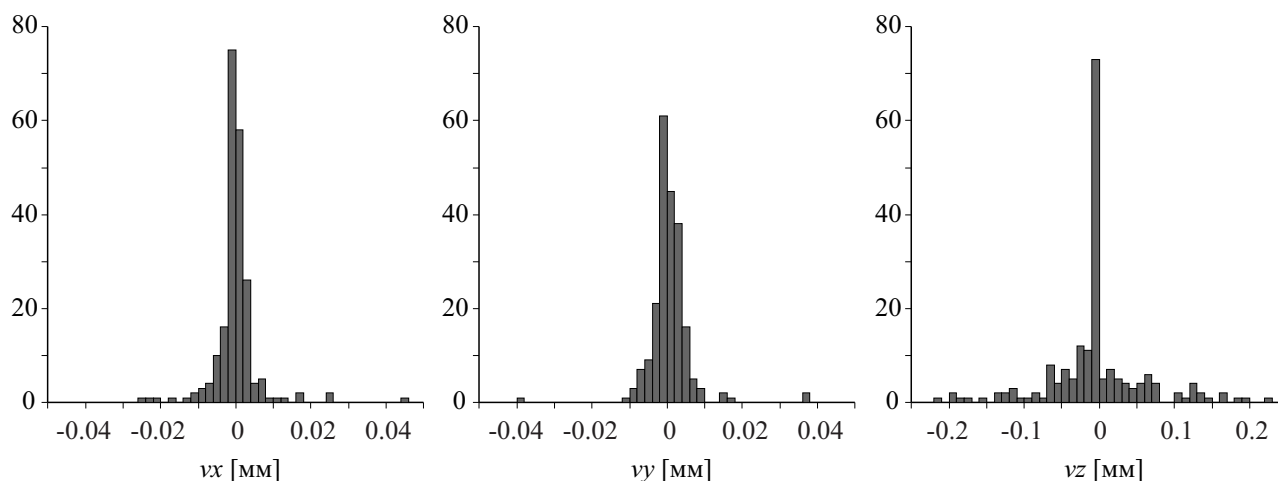


Рис. 16. Гистограммы распределения ошибки измерения смещений частиц по компонентам, полученные по реальным изображениям частиц в области измерения без потока и при минимальной временной задержке между кадрами в 30 мкс

5. Заключение. В настоящей статье исследованы возможности пленоптической системы, состоящей из доступной на рынке промышленной камеры светового поля Raytrix R11M, применительно к диагностике потоков жидкости и газа. Предложен и протестирован новый программный алгоритм для восстановления карты глубины регистрируемой измерительной области. Принцип алгоритма основан на том, что повторяющиеся элементы регистрируемого объекта, спроецированные соседними микролинзами, имеют минимум дисперсии по яркости.

Согласно полученным результатам, пространственное разрешение метода по глубине при использовании 11-мегапиксельного сенсора достигает 1/40 от глубины резкости оптической системы. Получено, что абсолютная погрешность определения виртуальной глубины объектов в области измерения постоянна для конкретного типа пленоптического устройства и в данной работе соответствовала 0.09. Указанный метод был использован для измерения мгновенных 3D-полей скорости турбулентной струи при $Re = 23\,700$ внутри щелевого канала по всей его глубине, равной 4 мм. Распределение средней скорости в потоке совпадает с результатами, полученными ранее для данного объекта при использовании томографической трассерной визуализации. Было определено, что метод имеет ограничения на минимально определяемую величину компоненты скорости вдоль оптической оси регистратора вследствие ограниченной угловой апертуры устройства.

Разработанные методы позволяют использовать современные пленоптические камеры для диагности-

ки потоков с ограниченным оптическим доступом, например при проведении экспериментов в аэродинамических трубах с закрытой рабочей частью или в условиях повышенных вибраций, когда существует риск нарушения взаимной пространственной калибровки сенсоров нескольких регистраторов. Кроме того, представленные методы позволяют снизить сложность калибровки, характерной для многокамерных систем.

Работа выполнена при финансировании РНФ (грант № 14–19–01685, под руководством Д.М. Марковича).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Perwass C., Wietzke L.* Single lens 3D-camera with extended depth-of-field // *Proc. SPIE.* 2012. **8291**. 8–15.
2. *Zeller N., Quint F., Stilla U.* Calibration and accuracy analysis of a focused plenoptic camera // *Proc. ISPRS Technical Commission III Symposium.* Zürich: ISPRS Press, 2014. 205–212.
3. *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Вычислительные технологии.* 2007. **12**, № 3. 109–131.
4. *Shestakov M.V., Tokarev M.P., Markovich D.M.* 3D flow dynamics in a turbulent slot jet: time-resolved tomographic PIV measurements // *Proc. 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics* Lisbon: Inst. Superior Tecnico, 1–7.
5. *Shestakov M.V., Dulin V.M., Tokarev M.P., Sikovsky D.Ph., Markovich D.M.* PIV study of large-scale flow organisation in slot jets // *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 2015. **51**. 335–352.
6. *Bilsky A.V., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P.* A maximum entropy reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // *Measurement Science and Technology.* 2013. **24**, N 4. 1–10 (doi 10.1088/0957-0233/24/4/045301).
7. *Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.* Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // *Вычислительные методы и программирование.* 2006. **7**. 79–85.

Поступила в редакцию
25.05.2016

Image Processing Algorithms for a Light-Field Camera and Their Application for Optical Flow Diagnostics

A. V. Seregin¹ and M. P. Tokarev²

¹ *Novosibirsk State University, Faculty of Physics; ulitsa Pirogova 2, Novosibirsk, 630090, Russia; Engineer, e-mail: sasha7-93@mail.ru*

² *Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; prospekt Lavrent'eva 1, Novosibirsk, 630090, Russia; Ph.D., Senior Scientist, e-mail: mtokarev@itp.nsc.ru*

Received May 25, 2016

Abstract: Application of modern optoelectronic devices extends research in the field of experimental fluid mechanics. The methods of computational photography gradually penetrate into the various fields of science and technology due to using devices based on these methods. A light-field camera can be used to register a three-dimensional velocity distribution in fluid flows where the location of several panoramic optical sensors is difficult because of restrictions in an optical access and vibrations. In this paper we study the possibility of using a plenoptic system consisting of an industrial light-field camera to diagnose liquid and gas flows. A new software algorithm for computing a depth field of a measurement area is proposed. According to the obtained results, the spatial resolution of the method by depth reaches 1/40th of the depth of the field of the optical system when using 11 MP sensor. This method was used to measure 3D velocity fields of a turbulent jet inside a slot channel throughout its depth. In the future, the number of applications will grow for the cases where the use of plenoptic devices with high spatial resolution is appropriate.

Keywords: software refocusing algorithm, depth field reconstruction, light-field camera, plenoptic system, optical flow diagnostics, PIV (Particle Image Velocimetry), PTV (Particle Tracking Velocimetry).

References

1. C. Perwass and L. Wietzke, "Single Lens 3D-Camera with Extended Depth-of-Field," *Proc. SPIE* **8291**, 8–15 (2012).
2. N. Zeller, F. Quint, and U. Stilla, "Calibration and Accuracy Analysis of a Focused Plenoptic Camera," in *Proc. ISPRS Technical Commission III Symposium, Zürich, Switzerland, September 5–7, 2014* (ISPRS Press, Zürich, 2014), pp. 205–212.
3. M. P. Tokarev, D. M. Markovich, and A. V. Bilsky, "Adaptive Algorithms for PIV Image Processing," *Vychisl. Tekhnol.* **12** (3), 109–131 (2007).
4. M. V. Shestakov, M. P. Tokarev, and D. M. Markovich, "3D Flow Dynamics in a Turbulent Slot Jet: Time-Resolved Tomographic PIV Measurements," in *Proc. 17th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 7–10, 2014* (Inst. Superior Tecnico, Lisbon, 2014), pp. 1–7.
5. M. V. Shestakov, V. M. Dulin, M. P. Tokarev, et al., "PIV Study of Large-Scale Flow Organisation in Slot Jets," *Int. J. Heat Fluid Fl.* **51**, 335–352 (2015).
6. A. V. Bilsky, V. A. Lozhkin, D. M. Markovich, and M. P. Tokarev, "A Maximum Entropy Reconstruction Technique for Tomographic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Technol.* **24** (4), 1–10 (2013). doi 10.1088/0957-0233/24/4/045301
7. Ye. K. Akhmetbekov, A. V. Bilsky, Yu. A. Lozhkin, et al., "Software for Experiment Management and Processing of Data Obtained by Digital Flow Visualization Techniques (ActualFlow)," *Vychisl. Metody Programm.* **7**, 79–85 (2006).