

ОБРАБОТКА КАРТИН ТЕНЕВОГО ФОНОВОГО МЕТОДА ПОСТРОЕНИЕМ ПОЛЯ НАПРАВЛЕНИЙ

© 2004 г. Е. М. Попова

Московский энергетический институт (технический университет), Москва

E-mail: PopovaYM@mpei.ru

Рассмотрено получение картин распределения градиента показателя преломления в пространстве для естественной конвекции в водной среде теневым фоновым методом. Обработка изображений проводилась методами поля направлений при различных параметрах. Выполнено сравнение и даны рекомендации по выбору параметров обработки для получения максимальной точности результата.

Коды OCIS: 260.5710.

Поступила в редакцию 30.01.2004.

Введение

Теневые методы в настоящее время широко используются в эксперименте, особенно в аэродинамике [1]. Классическая реализация данного метода с ножом Фуко требует использования дорогой высококачественной оптической системы [2]. В 1999 г. Мейером был предложен теневой фоновый метод (ТФМ) как дальнейшее упрощение оптической теневой системы и переход к использованию компьютерной обработки изображений [3]. В данном методе для получения информации об объекте используется искаженное изображение структурированных фоновых экранов, которое вызвано малыми градиентами показателя преломления.

Результат воздействия среды между фоновым экраном и устройством регистрации изображения может быть описан как отклонение световых лучей от прямолинейного распространения. Наиболее общим способом представления изображения $I(x, y)$ является свертка между функцией фонового экрана $B(x', y')$ и функцией пропускания исследуемой среды $T(\eta, \xi)$, т. е. $I(x, y) = B(x', y')T(\eta, \xi)$.

Для исследования характеристик среды, через которую распространяется свет, можно использовать операцию, обратную свертке, результат которой позволяет описать оптические свойства среды, если известны функции фонового экрана и его изображение. Эта процедура обеспечивает достаточно подробную информацию относительно градиента показателя преломления света в среде в зависимости от точности процесса обработки изображения. В результате этой обработки получается двумерная картина градиента показателя преломления среды, которая является подобной двунаправленной теневой картине [4].

Главная область применения ТФМ – исследование крупномасштабных потоков, которое было огра-

ничено до настоящего времени размерами теневых приборов. Это особенно актуально, например, для натурного аэродинамического эксперимента. Для реализации данного метода необходимо иметь только подходящий фоновый экран и цифровую фотокамеру с возможностью передачи изображения в компьютер для дальнейшей его обработки.

Экспериментальная установка

Для исследования возможностей ТФМ и разработки алгоритма обработки полученных изображений был выполнен ряд экспериментов.

Схема экспериментальной установки для записи картин визуализации ТФМ представлена на рис. 1. Она состоит из некогерентного источника света 1, фонового экрана 2, исследуемого объекта 3, цифровой видеокамеры 4 и компьютера 5. Для подсветки фонового экрана использовался некогерентный источник света – лампа накаливания. В качестве фонового экрана возможно применение любой некоторым образом структурированной картины, содержащей, например, хаотически или регулярно расположенные точки различного размера и плотности, горизонтальные и вертикальные линии различной ширины с различными расстояниями между ними и т. д. В данном эксперименте экраном служила картина с черными горизонтальными линиями на бе-

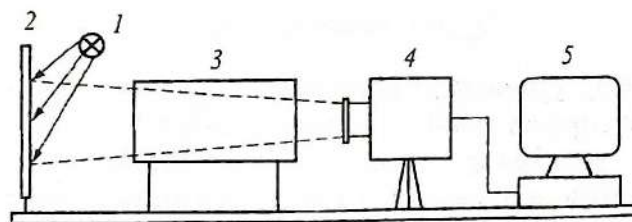


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (по-яснения в тексте).

лом фоне; ширина линии составляла 0,5 мм, а расстояние между соседними линиями 1,5 мм. Исследовалась естественная конвекция в воде вокруг нагретого шара диаметром 41,2 мм [5]. Температура шара была приблизительно 90 °С, а температура воды около 25 °С.

Регистрация изображения экрана во время процесса конвекции велась с помощью трехматричной mini-DV видеокамеры "Sony", а обработка с помощью персонального компьютера серии Пентиум 3.

Методика получения и обработки картин визуализации

В ходе экспериментальных исследований для изучения распределения градиента показателя преломления среды на видеокамеру снималось изображение фонового экрана, когда между ним и видеокамерой находилась кювета с водой, в которую помещался нагретый шарик. При наблюдении фоновой картинке на видеозаписи можно было заметить искажение и движение линий вследствие изменения во времени и в пространстве показателя преломления в исследуемой среде. Искажения в изображении были вызваны отклонением световых лучей в среде с градиентами температуры.

Для обработки картин визуализации ТФМ можно использовать цифровые методы поля направлений [6]. Теория этих методов подробно рассмотрена в [7]. Полем направлений называется геометрическая интерпретация множества линейных элементов. В работе использовался метод параметрической аппроксимации, который основан на аналитическом представлении функции яркости изображения в симметричном прямоугольном скользящем окне. В качестве аппроксимирующей функции была использована плоскость, которая описывается функцией $f(u, v) = au + bv + c$. Коэффициенты a, b, c определяются по методу наименьших квадратов из условия минимума функционала J :

$$J = \iint_{(u,v) \in W} [f(x_1 - u, x_2 - v) - \hat{f}(u, v)]^2 du dv \rightarrow \min_{a,b,c,\dots} \quad (1)$$

где W – размер скользящего окна.

В дискретном виде функционал (1) представляется как

$$J = \sum_{(u,v) \in W} \sum [f(x_1 - u, x_2 - v) - \hat{f}(u, v)]^2 du dv \rightarrow \min_{a,b,c,\dots} \quad (2)$$

Приравнявая к нулю частные производные функционала по полиномиальным коэффициентам, получаем систему линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов. В частности, для слу-

чая аппроксимации плоскостью система имеет следующий вид:

$$a \sum u^2 = \mu_{10}, b \sum v^2 = \mu_{01}, c \sum 1 = \mu_{00}, \quad (3)$$

где $\mu_{pq}(x_1, x_2)$ – локальные степенные моменты изображения в окне обработки,

$$\mu_{pq}(x_1, x_2) = \sum_{(u,v) \in W} u^p v^q f(x_1 - u, x_2 - v).$$

Направление в каждой точке изображения находится с помощью аппроксимации одной из вышеперечисленных поверхностей ее окрестности. Для этого выделяется прямоугольное окно, размер которого не превышает расстояния между соседними линиями, с центром в данной точке. В этом окне функция яркости изображения аппроксимируется в виде поверхности первого или второго порядка, а затем находится направление касательной к линии, перпендикулярное к вектору градиента яркости изображения.

При аппроксимации плоскостью в системе координат, связанной с положением скользящего окна W размером $L \times L$, одномерный полином $\hat{f}(x_1, x_2)$, аппроксимирующий изображение $f(x_1, x_2)$, задается в виде плоскости $f(x_1, x_2) = ax_1 + bx_2 + c$, $(x_1, x_2) \in W$, где

$$\begin{aligned} a &= 6\mu_{10}/L(L+1)(2L+1), \\ b &= 6\mu_{01}/L(L+1)(2L+1). \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда для определения поля направлений получается следующее выражение: $\text{tg} \psi(x_1, x_2) = -\mu_{10}/\mu_{01}$.

С использованием теории цифровых методов поля направления в среде Mathcad был разработан алгоритм обработки изображения, в котором был реализован метод поля направления. В частности, проводились предварительная цифровая фильтрация изображения для выделения полезного сигнала из шумов, сканирование изображения областью опроса, изменение размера области опроса и шага сканирования (сканирование встык и с перекрытием), а также обработка изображения методом параметрической аппроксимации плоскостью. Созданная программа позволяет рассчитывать коэффициенты аппроксимирующей функции отдельно в каждой области опроса, строить распределение градиента яркости в пространстве и создавать векторное поле.

Результаты обработки картин визуализации

На рис. 2 представлено изображение экрана в момент максимального возмущения среды, т. е. когда разница температур между шаром и окружающей средой наибольшая. Хорошо видно искажение горизонтальных линий, вызванное градиентом показателя

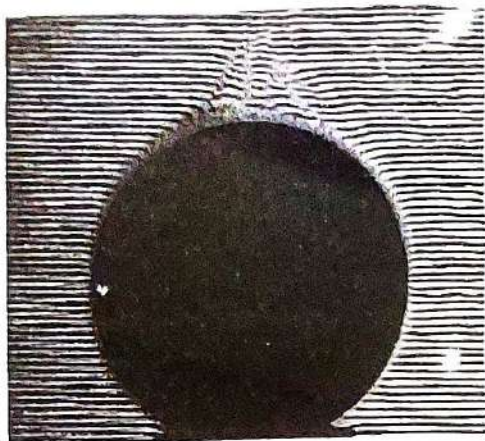


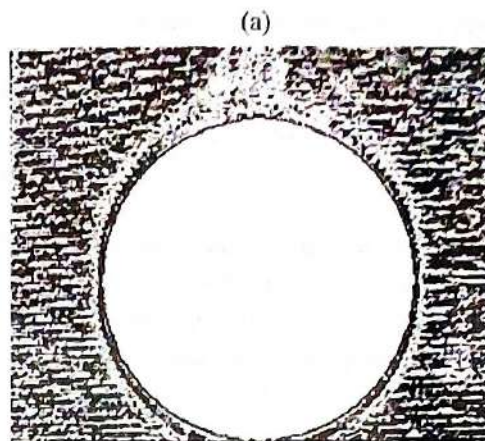
Рис. 2. Изображение экрана с горизонтальными линиями на фоне нагретого шара в воде.

теля преломления воды вокруг шара. В теневом фоновом методе видеокамера фокусируется на плоскость экрана и поэтому сам объект получается размытым. Именно поэтому процессы, происходящие в пограничном слое шара, не могут быть точно оценены и являются препятствием для качественной обработки изображения вблизи шара.

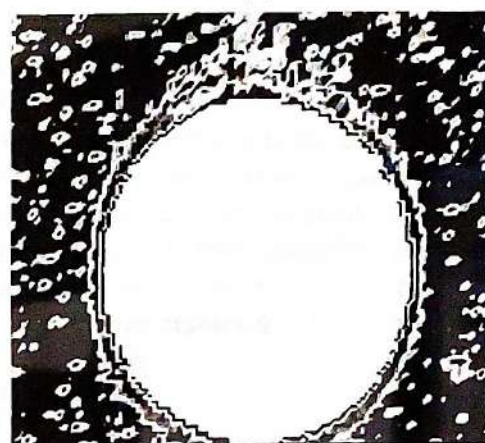
Можно считать, что самая высокая температура воды находится в области, примыкающей к поверхности шара, и уменьшается постепенно с увеличением расстояния от его поверхности. Это означает, что наименьший коэффициент корреляции яркости двух изображений должен быть около поверхности шара, а при удалении от поверхности он должен стремиться к 1. Для исследования изменения показателя преломления около поверхности шара необходимо установить границу шара. Это может быть сделано с помощью закраски его поверхности.

Были проведены исследования влияния параметров обработки (размера области опроса и перекрытия) на получаемое изображение. Для этого описанные выше экспериментальные картинки обрабатывались с помощью метода параметрической аппроксимации с различными параметрами и результаты обработки сравнивались с исходными.

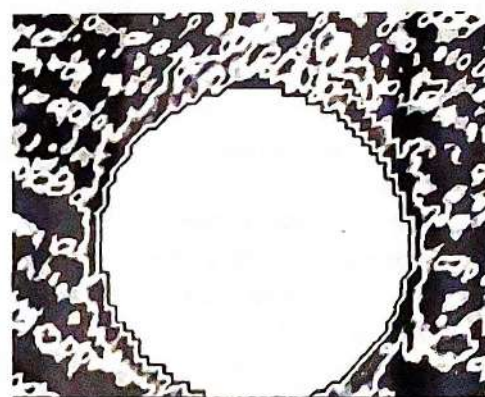
В случае, когда область опроса меньше, чем расстояние между соседними линиями, возможно ее попадание между двумя линиями. Это приводит к неверному определению направления градиента показателя преломления. В то же время возможно четко определить границу шара, а следовательно, можно более точно определить градиент показателя преломления в пограничном слое. Как видно из рис. 3а, вся область вокруг шара представляет собой чередование светлых и темных цветов, в то время как согласно предсказанной модели область около шара должна быть светлой (соответствует большому градиенту показателя преломления), а вдали от шара – темной (соответствует наименьшему градиенту показателя преломления). Если область оп-



(а)



(б)



(в)

Рис. 3. Результаты обработки картины визуализации с помощью метода параметрической аппроксимации: а – область опроса (ОО) 5 пикселей, перекрытие 50%; б – ОО – 7 пикселей, встык; в – ОО – 11 пикселей, встык.

роса намного больше, чем расстояние между соседними линиями (рис. 3в), то невозможно получить хорошие результаты около границы шара. Так как эта область представляет наибольший интерес, то большие области перекрытия не подходят для обработки изображения.

Наилучшие результаты получаются, когда область опроса равна или чуть больше расстояния между соседними линиями (рис. 3б). Тогда в область опроса попадает только одна линия и, соответственно, можно надежно построить градиент показателя

преломления. В то же время, так как область опроса не очень большая, то достаточно точно видна и граница шара, область около границы шара светлая, а вдали от границы темная.

Выводы

Рассмотрено применение теневого фонового метода для визуализации картин распределения показателя преломления оптически прозрачной среды. Получено, что в качестве фонового экрана может быть использован экран с изображением линий, а для обработки картин визуализации – цифровой метод поля направлений, который дает информацию о направлении градиента показателя преломления. Разработана методика обработки картин визуализации методом параметрической аппроксимации плоскостью. Оптимальными параметрами для обработки картин ТФМ является размер области опроса, близкий к расстоянию между соседними линиями, и перекрытие 50%. Показано, что при оптимальных параметрах обработки метод дает пространственную информацию о процессе естественной конвекции, включая граничную область.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИНТАС (грант № 2000-135) и Министерства образования России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 287 с.
2. Васильев Л.А. Теневые методы. М.: Наука, 1968.
3. Meier G.E.A. Computerized background-oriented Schlieren // Experiments in Fluids. 2002. № 33. P. 181–187.
4. Skorniyakova N.M., Popova E.M., Rinkevichius B.S., Tolkachev A.V. Correlaton processing of BOS pictures // CD Proc. of 5 Int. Symp. on Particle Image Velocimetry. Pusan, Korea, 2003. Paper 3209. 11 p.
5. Попова Е.М., Толкачев А.В., Скорнякова Н.М. Применение фонового теневого метода для исследования естественной конвекции // Тр. VII МНТК ОМИП / Под ред. Дубнищева Ю.Н., Ринкевичюса Б.С. М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 126–129.
6. Попова Е.М. Обработка картин ТФМ методом поля направлений // Тр. 3 МКМУС "Оптика-2003" / Под ред. Козлова С.А. СПб: СПбГУИТМО, 2003. С. 26–28.
7. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Сойфера В.А. М.: Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2001.