УДК 532.57, 533.6.08, 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЧАСТИЦАМИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРЕХМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СКОРОСТИ В ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ

Ахметбеков Е.К.[1], Карчевский М.Н.[2], Токарев М.П.[2]

[1]*Назарбаев Университет Исследовательские и Инновационные Системы, Астана, Республика Казахстан*
[2]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск, Россия*

Данная работа была поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант №13-08-01356), Федеральной целевой программой "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–013 гг. (проект № 8233) и Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (договор №1839).

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается совершенствование существующих и разработка новых подходов к обработке экспериментально полученных данных методом слежения за отдельно взятой частицей. Указанный подход может применяться на практике для решения актуальных научных и прикладных задач механики жидкости и газа, энергетики, транспортных систем и т.п. Так же данным алгоритмом были обработаны экспериментальные данные по исследованиям как изотермической турбулентной прямоточной воздушной струи, сформированной соплом диаметром 15 мм при режиме течения Re = 6000. Отличительной чертой данного эксперимента является использование скоростной съемки 770 Гц вместо 10 Гц, которая технически более сложно реализуема.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нефтегазового и аэрокосмического комплексов, энергетики и атомной промышленности связано с решением широкого спектра практических и фундаментальных задач по моделированию нестационарных турбулентных многофазных потоков. Современные методы исследования течений предполагают применение методов математического моделирования, основанные на результатах оптических методах исследования. К возможным объектам исследования можно отнести обтекание самолетов, потоки реактивных двигателей, форсунки горелочных устройств и т.д.

Алгоритмы слежения за частицами обладают высоким пространственным разрешением и применимы к потокам с неоднородным засевом. В то же время применение алгоритмов слежения ограничено в связи с большой погрешностью определения смещений частиц. К тому же обработка данных занимает большое количество времени и требует значительных вычислительных ресурсов. Обработка одного эксперимента может занять до нескольких суток.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ СКОРОСТИ

Каждый алгоритм из семейства PTV распадается на три составные части. Поиск положения центров частиц на проекциях камер, триангуляция координат в объеме и сопоставление каждой частице на первом кадре, пары во втором кадре, т.е. находится образ той же самой частицы, переместившейся за заданный промежуток времени в другую точку пространства. Схема работы метода представлена на Рис. 1.

Один из самых простых способов обнаружения частиц на изображении является метод простой бинаризации по порогу интенсивности, за которым следует маркировка частицы

© Ахметбеков Е.К., Карчевский М.Н., Токарев М.П.

и определение центра трассера (центроида). Другим методом по поиску трассеров на фотографии является метод PMC. PMC (Particle Mask Correlation) [1] это метод обнаружения частиц на изображении, использующий корреляционную маску. В основе этого метода лежит предположение, что представление освещенной частицы есть двумерное гауссово распределение интенсивности. Другими словами трассер на изображении имеет наибольшую интенсивность в центре и равномерно убывает на расстоянии. Для нахождения положения трассеров исходное бинаризованное изображение коррелируется с гауссовым распределением, в результате чего получается корреляционное поле. Далее происходит поиск пиков по полученному полю, которые являются центрами искомых частиц на изображении.

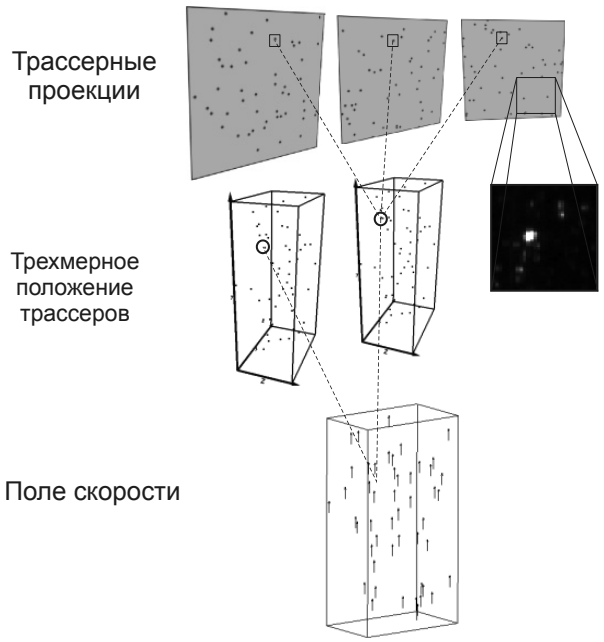

Рис.1 Иллюстрация принципа работы алгоритма оценка поля скорости в методе 3D PTV.

Задача обнаружения точного положения трассеров в объеме, заключается в обнаружении и сопоставлении частицам трехмерного вектора координат, основываясь на проекциях, сделанных фотокамерами с различных ракурсов области измерения. После триангулирования положения центров частиц необходимо произвести отсев ошибочных векторов, так называемых фантомных частиц возникающих в результате ошибки калибровки камер и погрешности работы алгоритма.

Для сопоставления частиц из первого кадра частицам из второго используется релаксационный алгоритм [2], где поиск пары, основывается на предположении, что локально поток с трассерами движется примерно в одном направлении. На основе этой гипотезы строится вероятностная модель о наиболее вероятной возможности перехода частицы из первого кадра во второй. В области локального параллельного движения выбирается окружность с заданным радиусом, считается, что трассеры из первого кадра, попавшие в эту окружность, двигаются примерно в одном направлении с минимальным отклонением от центральной частицы. Начальная вероятность совпадения пары выставляется как равновероятная для каждой частицы, попавшей в окружность максимального сдвига частицы. Далее вычисляется вероятность перехода частицы. Идея расчета заключается в следующем: чем больше соседних частиц найдут пару в направлении данной частицы, тем больше будет вероятность истинности совпадения текущей частицы. Данный алгоритм является итерационным, качество конечного поля скорости улучшается с ростом количества итераций. Одним из недостатков данного алгоритма является зависимость от внешних параметров, таких как максимальный сдвиг трассера или радиус локального движения потока. Алгоритм также плохо работает на данных с большой плотностью засева, что является общей проблемой всех алгоритмов PTV.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

На Рис. 2 приведены результаты тестирования влияния процедуры оптимизации на основные параметры алгоритма, полученные на модельных синтетических изображениях частиц. Синтетические изображения сгенерированы искусственно по набору частиц со случайными, но известными координатами в объёме. Полная ошибка расчета смещения частиц определялась как среднеквадратичное отклонение между известными и рассчитанными значениями смещений во всём объёме, где и точные и оцененные значения смещения в i-ой точке. Поле смещений (скорости) в синтетических изображениях

было периодическим по координате Y и постоянным градиентом скорости по оси Z, где (X, Y, Z) - координаты точек в объеме, w и d – полуширина и полуглубина объёма соответственно. Размеры измерительной области составляли 2w×2w×2d = 20×20×5 мм. Начало лабораторной системы координат совпадало с центром объема. Смещение в центральной плоскости объема составляло Δ_0 = 0,18 мм. Для расчетов были сгенерированы несколько наборов синтетических изображений и проекций. Концентрация частиц на проекциях Nppp изменялась от 0,01 до 0,1 частиц/пиксель. В тесте камеры были расположены в углах квадрата, плоскость которого параллельна (X, Y). Угол наблюдения был 30 градусов для всех проекций. Дисторсия и шум изображений не применялись. Размер проекций был выбран w_{img}×w_{img} = 256×256 пикселей.

На Рис. 2 а показано влияние процедуры минимизации ошибки положения частиц в синтетическом тесте. Видно, что использование оптимизации уменьшает ошибку расчета смещений частиц до 0,06 мм. Это составляет 16% от максимального перемещения в измерительном объеме. На Рис. 2 б продемонстрировано влияние алгоритма минимизации ошибок на количество восстанавливаемых частиц после процедуры кластеризации. Было замечено, что при выборе радиуса кластеризации, сравнимого с поправкой ошибки процедуры оптимизации, например, 0,1 мм, количество определенных частиц увеличивается на 1-10%. Это является дополнительным преимуществом данной процедуры. Однако при увеличении радиуса кластеризации до 0,5 мм и выше включение оптимизации перестает влиять на количество определенных частиц. Это связано с тем, что смещения центра области поиска с увеличенным радиусом больше не дает новых, еще не рассмотренных, частиц.

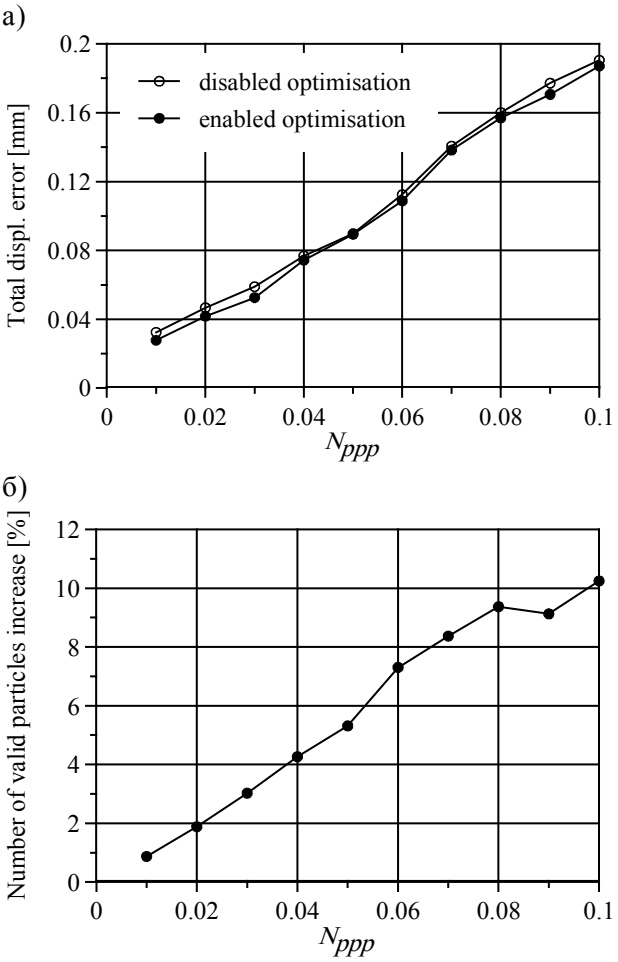

Рис.2 Полная ошибка оценки смещения частиц по сгенерированным синтетическим проекциям частиц для версии с оптимизацией положения частиц и без а); относительный прирост числа определенных частиц при включении оптимизации в зависимости от количества частиц на проекции б).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Главным отличием текущих результатов от результатов предыдущих исследований [3] является использование скоростной съемки 770 Гц вместо 10 Гц, которая технически более сложно реализуема (малая мощность лазера, низкая чувствительность камер) однако позволяет увидеть эволюцию крупномасштабных когерентных вихрей во времени. Для измерений использовалось следующее диагностическое оборудование: скоростной сдвоенный Nd:YLF импульсный лазер Pegasus PIV (10 мДж в импульсе с частотой повторения пары вспышек 1 кГц), КМОП камеры PCO 1200HS для проведения скоростной съемки (частота кадров 625 Гц в полном разрешении 1280×1024 пикс).. Причем, на установке проводились исследования как изотермической турбулентной прямоточной воздушной струи сформированной соплом диаметром 15 мм при режиме течения Re = 6000, так и турбулентного пламени предва-

рительно перемешанной пропано-воздушной смеси, фотография которого приведена здесь. В данной работе анализировались результаты только изотермического эксперимента.

Для измерения полей мгновенной скорости использовалась Tomo PIV система «ПОЛИС». Увеличение частоты съемки в двухкадровом режиме до 770 Гц достигалось за счет использования только части полного изображения размером 1280×400 пикс. Задержка между парами кадров составляла 1,3 мс. Задержка между кадрами в паре была установлена 120 мкс, что соответствовало частоте 8,3 кГц. Для формирования лазерного ножа использовались фокусирующая и цилиндрическая линзы, так что толщина ножа в области измерения составила 6 мм и вертикальный разворот ножа около 100 мм. Поток засевался частицами оксида алюминия (средний диаметр 4 мкм). Камеры системы располагались под углами в ±45°, ±15° относительно нормали к плоскости измерения.

Для калибровки оптической системы использовалась плоская калибровочная мишень размером 60x60 мм с опорными точками-окружностями на декартовой сетке с шагом 3 мм. Также использовался алгоритм самокалибровки оптической системы по отдельным изображениям частиц с целью повышения точности реконструкции.

ВЫВОДЫ

Проведена настройка процедуры оптимизации Левенберга-Марквардта положения трассерных частиц, полученных в результате триангуляции по набору плоских проекций. Выполнено тестирование влияния оптимизации на точность оценки поля смещения частиц на синтетически сгенерированных проекциях с известным аналитически заданным смещением частиц. Показано, что полная ошибка оценки смещения уменьшается до 0,06 мм (16%) при максимальной амплитуде смещении в 0,36 мм. Показано, что при использовании величины радиуса кластеризации, сравнимого с поправкой положения частиц, вызванной процедурой минимизации, количество определенных частиц увеличивается на 1-10% в зависимости от концентрации трассеров в измерительном объеме.

Указанная нелинейная оптимизация позволила снизить погрешность определения смещения зарегистрированных частиц в объеме потока максимум на 0,09 мм для реального тестового эксперимента по исследованию турбулентной затопленной струи жидкости. Это составило около 11% от максимального смещения частиц в потоке (0,8 мм).

Выполнено распараллеливание кода процедуры триангуляции положения частиц в объеме потока с использованием технологии OpenMP. Время обработки данных снизилось в 4,7 раз по сравнению с последовательным режимом обработки.

Применение модифицированного метода в томографическом эксперименте продемонстрировало применимость данного алгоритма к такому сорту данных с получением новых характеристик потока.

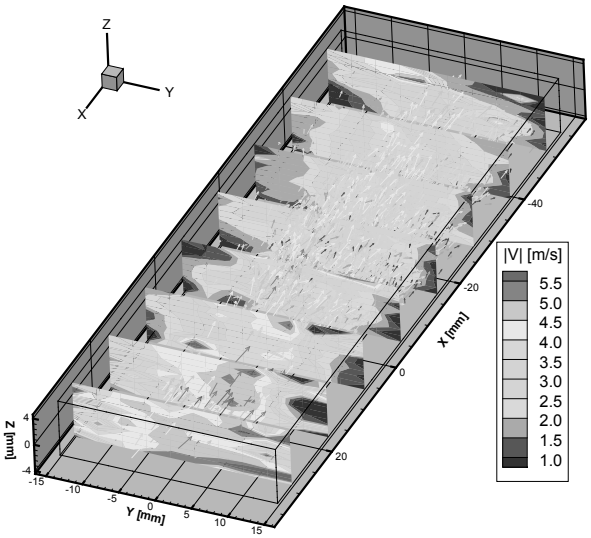

Рис.3 Полученное трехмерное распределение скорости в измерительном объеме (объединено 100 мгновенных последовательных распределений скорости за время измерения 142 мс).

В целях дельнейшего повышения качества получаемых данных и извлечения новой информации планируется модификация алгоритма, направленная на извлечение треков отдельно взятых частиц. Также в будущем планируется создание методов для оценки

поля скорости в объеме путем отслеживания положений отдельных частиц по реконструированному томографическими методами объемному изображению. Это позволит повысить рабочую концентрацию трассеров в измерительном объеме для алгоритмов трассировки отдельных частиц, по сравнению с получением распределения частиц путем триангуляции по зарегистрированным проекциям, используемому в настоящее время. Все это даст возможность более детально изучать дисперсные потоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Takehara, K. and Etoh, T. A Study on Particle Identification in PTV Particle Mask Correlation Method // 1999 The Visualization Society of Japan and Ohmsha, Ltd. Journal of Visualization, Vol. 1, No. 3 (1999) 313-323
2. Ohmi K., Li H.-Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithms // Osaka Sangyo University, Department of Information Systems Engineering, 3-1-1 Nakagaito, Daito-shi, Osaka 574-8530, Japan
3. Akhmetbekov Y.K., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P. Multiset Triangulation 3D PTV and its Performance Compared to Tomographic PIV // 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – PIV'11 Kobe, Japan, July 21-23, 2011

© Ахметбеков Е.К., Карчевский М.Н., Токарев М.П.