Научно-производственное предприятие «Геотек»

(ООО НПП «Геотек»)

Процедура определения полей деформаций в песчаных и глинистых грунтах методом PIV

Автор: Мельников А.В.

Технический директор

ООО НПП «Геотек»

д.т.н. профессор _____ Г.Г. Болдырев

(подпись, дата)

Пенза 2012

Содержание

Введение 2

1. Краткое описание процедуры определения полей деформаций методом PIV 3

2. Алгоритм работы метода PIV 3

3. Калибровка камеры 8

4. Текстура 12

5. Освещение 13

6. Настройка фотокамеры 13

7. Размер расчетных областей 14

8. Проведение эксперимента 18

9. Оценка точности измерений 18

10. Вычисление полей перемещений и графическое оформление результатов 20

Список литературы 22

Введение

Particle Image Velocimetry (PIV) относится к классу бесконтактных методов измерений, где путем обработки цифровых изображений могут быть получены поля перемещений частиц, распределение их скоростей, деформаций сдвига и объема и др. PIV – международное название метода цифровой трассерной визуализации (первые наблюдения за течением жидкости в водоемах при помощи естественных природных трассеров были описаны еще Леонардо да Винчи [3]). Появление термина связывают с работой Adrian [6] по механике жидкостей и газов, в которой метод PIV был выделен как частный случай метода лазерной спеклометрии LSV (Laser Speckle Velocimetry), базирующегося на оптическом преобразовании Фурье картин яркости. Надо отметить, что методы LSV развивались изначально применительно к анализу деформаций при нагружении образцов твердых тел.

Область применения PIV-метода довольно обширна. Она включает в себя как фундаментальные, так и прикладные научные исследования. Среди них можно выделить задачи оптимизации обтекания летательных аппаратов и судов в авиастроении, кораблестроении, конструкций промышленных агрегатов в энергетике и нефтегазовой промышленности, изучение процессов в двигателях внутреннего сгорания, физическое моделирование работы искусственных сосудов и клапанов в медицине и др.

White [17] впервые использовал модифицированный подход для реализации системы PIV в геотехнических исследованиях. Применявшиеся ранее методы (метод непосредственного фотографирования движения грунтовых частиц (метод Курдюмова [4]), методы цветных полосок, муаров, парафинированных листов, рентгенографии и др.) не позволяли получать необходимую при решении поставленных задач количественную и качественную информацию о деформировании сыпучих грунтов либо были чрезвычайно трудоемки из-за ручной обработки данных (методы фотограмметрии и рентгенографии).

PIV-метод можно применять всегда, когда есть возможность использовать фотокамеру для съемки деформируемых поверхностей: испытания в условиях плоской деформации в лотках с различными штампами [2], с армированными основаниями [9], с моделями свай [12], испытания в приборах трехосного сжатия [10, 14], испытаниях железобетонных [8] и деревянных [16] балок, железобетона [7] и даже как метод мониторинга склонов [18] и др.

1. Краткое описание процедуры определения полей деформаций методом PIV

1. Изучить принцип работы метода PIV.
2. Подготовить сетку калибровочных мишеней.
3. Нанести, если требуется, текстуру на объект исследования.
4. Создать освещение для объекта съемки.
5. Установить и настроить фотокамеру.
6. Выбрать размер расчетных областей.
7. Выполнить эксперимент.
8. Оценить погрешность измерения полей перемещений.
9. Вычислить поля перемещений и графически оформить результаты.

Подробное описание шагов алгоритма приводится ниже.

2. Алгоритм работы метода PIV

Измерение поля перемещений в заданной плоскости основано на измерении перемещения отдельных частиц, для чего поверхность должна иметь некоторую текстуру, например частицы песка. Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру). Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за некоторое время, например, между ступенями нагрузки, построить двухкомпонентное поле перемещений (в настоящее время развиты модификации метода, позволяющие измерять поля перемещений в объеме

(голографический PIV, томографический PIV [1]). Алгоритм работы PIV-метода показан на рис.1.

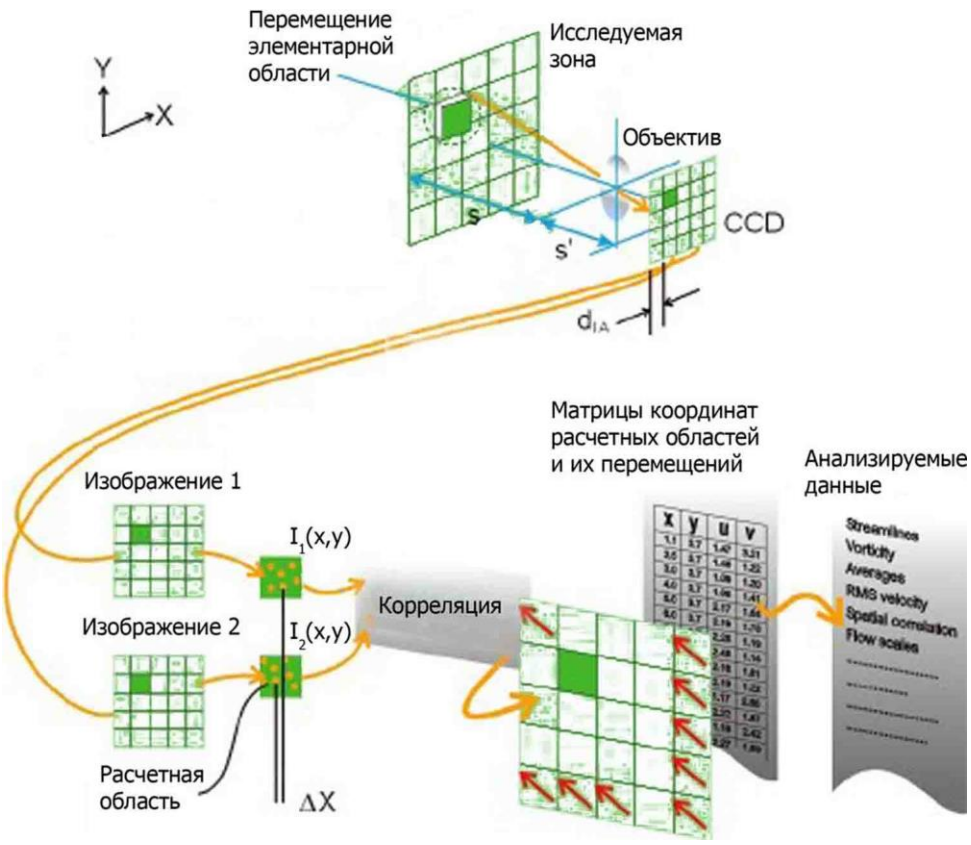

Рис. 1. Процедура PIV-метода

Стандартный алгоритм включает следующую процедуру:

1. Разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера (рис. 1);

2. Расчет кросскорреляционной функции;

3. Нахождение максимума корреляционной функции;

4. Подпиксельная интерполяция максимума корреляционной функции.

В работе метода применяется кросскорреляционный алгоритм, когда начальные и конечные положения частиц фиксируются на разные снимки. На вход алгоритма подается два изображения образов частиц, полученных в два последовательных момента времени с задержкой между ними, например, на разных ступенях нагрузки. Каждое изображение разбивается на элементарные области (расчетные области) размером *X* на *X* пикселей, таким

образом, чтобы в каждую расчетную область попало хотя бы несколько частиц. Для стандартного алгоритма размер и количество расчетных областей в течение вычисления всего поля перемещений остается постоянным. На конечном изображении определяется зона поиска (рис. 2),размер которой, как следуем из теоремы Найквиста, следует ограничивать. Оптимальное измеряемое смещение частиц внутри области расчета в случае PIV измерений равно четверти области расчета [5].

Интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света (степень серого) можно представить дискретной функцией двух переменных $I_1(U)$ и $I_2(U+s)$ для первого и второго кадра соответственно. Используя эти переменные, находится корреляционная функция вида:

$$R_n(s) = \sum_U I_1(U) \cdot I_2(U+s) \tag{1}$$

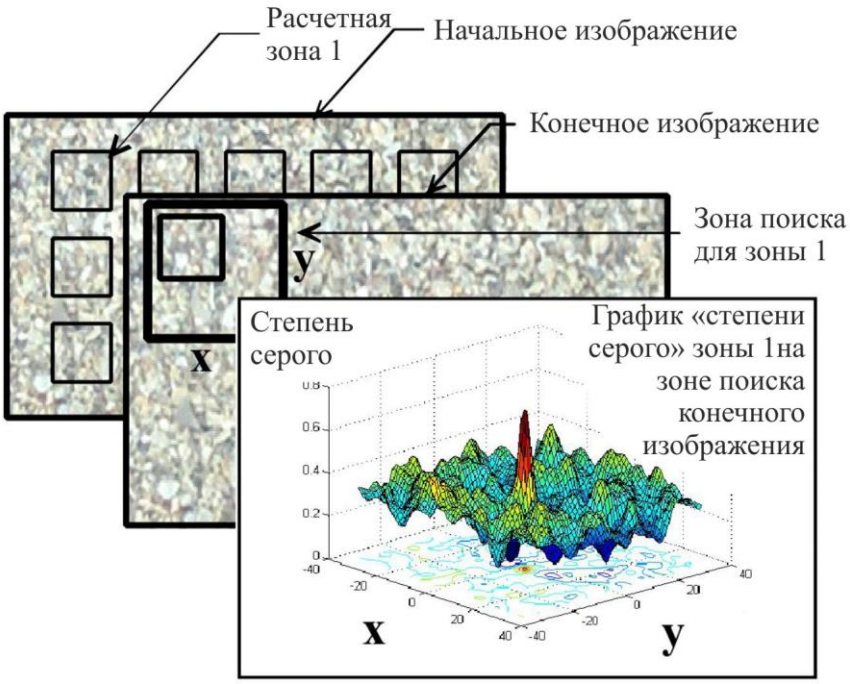

Рис. 2. Нахождение корреляционной функции по двум изображениям

Максимум корреляционной функции соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области (рис. 3). При этом в идеальном случае предполагается, что все частицы в элементарной области имеют

одинаковое перемещение, т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для более точного определения координат максимума используется подпиксельная интерполяция корреляционной функции в окрестности ее максимума (рис. 3*в*). Интерполяция может проводиться независимо по обеим координатам, а интерполирующая функция может быть самой различной (например, полином второй степени или Гауссиан).

Координатой максимума считается координата максимума интерполирующей функции. Обычно, бикубическая интерполяция, позволяет (в зависимости от алгоритмов обработки) получить точность 0,1 пикс., а при использовании итерационных методов до 0,03 пикс, [3].

Для повышения точности расчета векторов перемещений и увеличения динамического диапазона в современных PIV системах используют адаптивные подходы расчета поля перемещений, которые по своей сути являются итерационными методами с компенсацией смещения частиц.

Основная идея итерационных методов состоит в обработке одной и той же области несколько раз, при этом используя результат предыдущей итерации в качестве оценки для параметров обработки на следующей итерации. Таким образом, можно добиться сходимости результатов обработки и получить некоторое увеличение точности получаемых данных. При расчете корреляционной функции используются элементарные области, смещенные на вектор, найденный на предыдущей итерации. При этом на каждой итерации проводится отсев ошибочных векторов, их интерполяция, а также переразбиение изображения на расчетные области меньшего размера. Целью смещения окон является желание добиться максимального совпадения между ними.

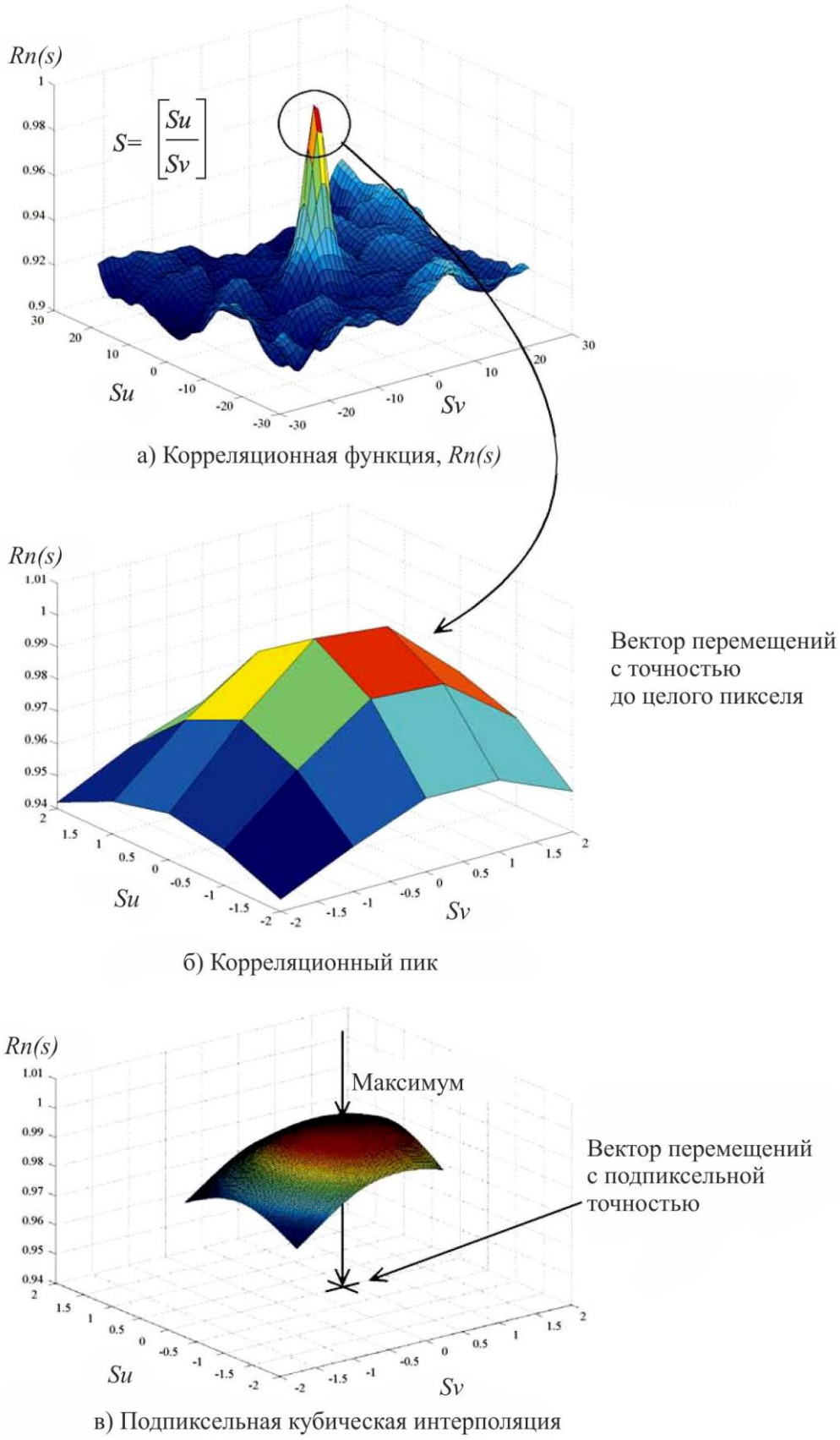

Рис. 3. Отображение корреляционной функции и её интерполяция для достижения подпиксельной точности

Смещение расчетных областей позволяет существенно уменьшить эффект «потери пары» за счет лучшего совпадения трассерных картин и тем самым повысить отношение сигнал/шум. Кроме того, высокая степень «совпадения» частиц на изображениях позволяет (при достаточной концентрации частиц) уменьшить размеры конечной элементарной области, повысив тем самым разрешающую способность метода без ущерба для качества получаемых данных. Главным недостатком алгоритма является увеличенное время обработки по сравнению со стандартными методами. Основы адаптивных алгоритмов можно найти в работе [14].

Для выявления и исправления ошибочных векторов используют процедуры коррекции ошибок [3]. Выделяют два вида коррекции ошибок. Первый метод заключается в отсеивании векторов, не удовлетворяющих определенным критериям, и замещении их интерполированными. Интерполяцию выполняют по соседним векторам, которые прошли отбор. Это - так называемый «post-interrogation» метод, когда на выходе получаются не точные значения, а приближенные, интерполированные по какому-либо закону (median фильтр, local median фильтр). Второй, «non-post-interrogation» метод, в отличие от первого, дает точное положение максимума, соответствующего наиболее вероятному смещению в данной области, и позволяет получить более высокое отношение сигнал/шум.

Для улучшения качества обработки изображений могут применяться также различные фильтры [5]: по соотношению сигнал/шум, по локальному среднему, статистическая фильтрация и др.

3. Калибровка камеры

Для сопоставления параметров модели отображения системы координат эксперимента с системой координат изображения применяется калибровка камеры. Калибровка — это процесс переопределения координат изображения (в пикс) в физические координаты объекта (в мм). Калибровка

осуществляется по набору калибровочных маркеров (калибровочной мишени).

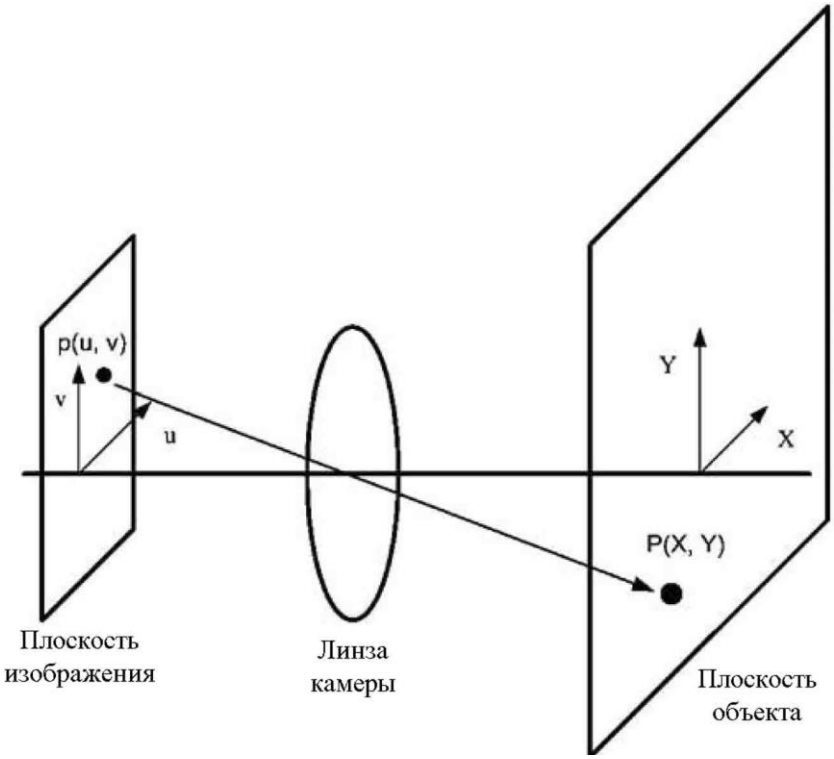

Рис. 4. Схема калибровки камеры [21]

Модель, представленная на рис. 4 и отображающая пучок световых лучей, проходящих прямо через единую точку для формирования проекции объекта на матрицу камеры, является приблизительной. Радиальные искажения линз приводят к тому, что лучи света отклоняются от оси объектива. Вторая ошибка возникает из-за того, что центры кривизны поверхности линз, через которые свет преломляется, не всегда лежат на одной прямой. Это создает искажение имеет как радиальную, так и тангенциальную составляющие [21]. Также пиксели матрицы не имеют идеально квадратную форму. Если на оптическом пути между камерой и мишенью встречается граница раздела сред, например, оргстекло-воздух, то необходимо учитывать преломление лучей и соответствующее изменение углов обзора мишени камерами в оргстекле.

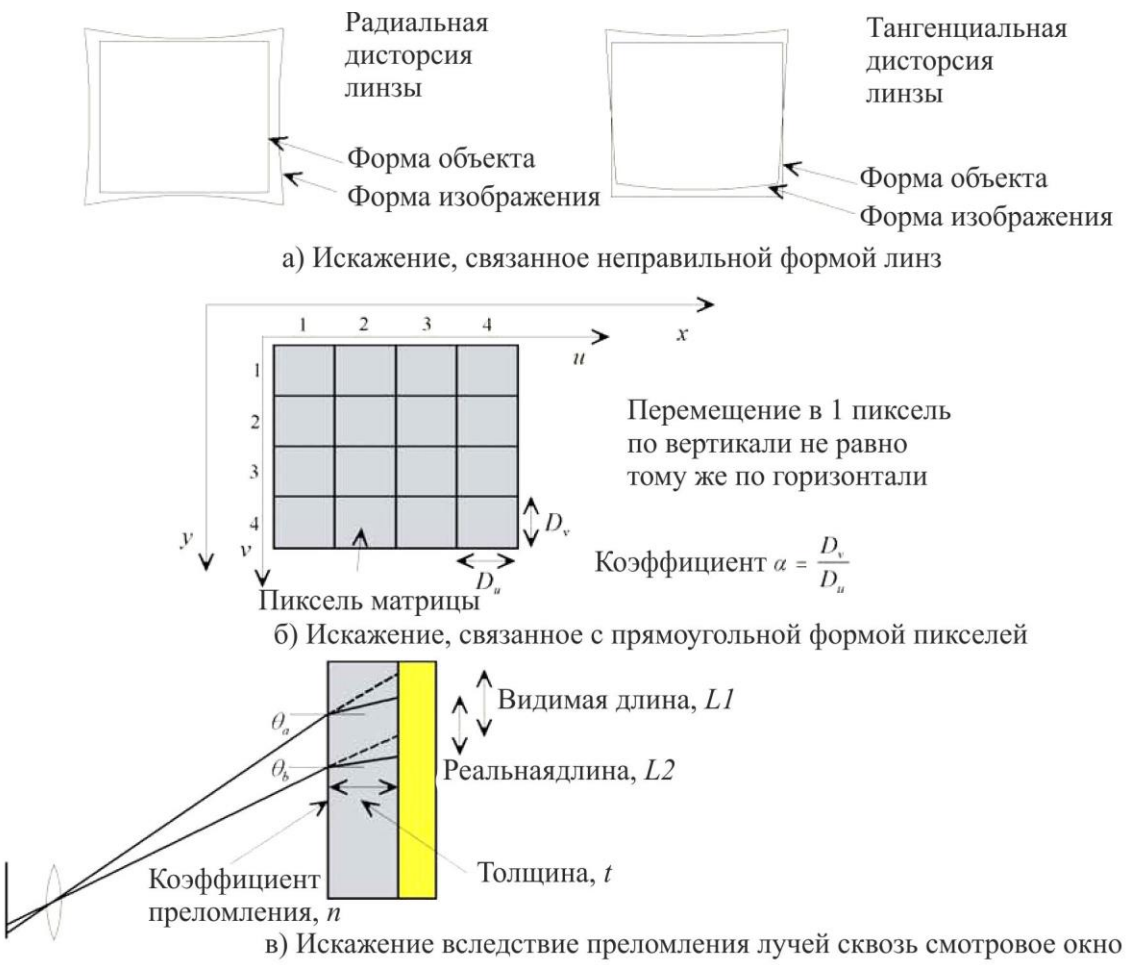

Рис. 5. Искажение изображений

Для калибровки в первом приближении можно использовать линейную зависимость. В реальности координаты связаны постоянно меняющимся коэффициентом масштабирования. При точности измерения перемещений 0,1% и выше это необходимо учитывать. Нивелировать последствия искажения изображения можно, используя полиномиальную матрицу перевода координат (реализовано в большинстве программ, например, в GeoPIV [19], MatPIV [15], Actual Flow [5], PIVview (http://www.pivtec.com/) и др.).

Для учета искажений изображения при калибровке применяются калибровочные мишени (рис. 6), представляющие собой набор маркеров, расположенных в узлах прямоугольной координатной сетки.

Форма калибровочных мишеней может быть различной. К примеру для MatPIV [15] подходят крупные мишени круглой формы (рис. 6*а*), маленькой точки, в виде креста или даже шахматной доски для GeoPIV [19] (рис. 6*б*). В большинстве случаев применяются мишени круглой формы. Главное условие – хорошо определяемый центр калибровочной мишени.

Минимальное количество калибровочных мишеней девять – по три в каждом направлении, по вертикали и горизонтали. Точность нанесения должна быть максимально возможной, так как от неё зависит точность определения координат точек и в меньшей степени перемещений.

При испытания в лотке с прозрачной стенкой мишени нужно наносить на внутренней стороне прозрачной, чтобы учесть искажение, возникающее при прохождении света через границу раздела сред.

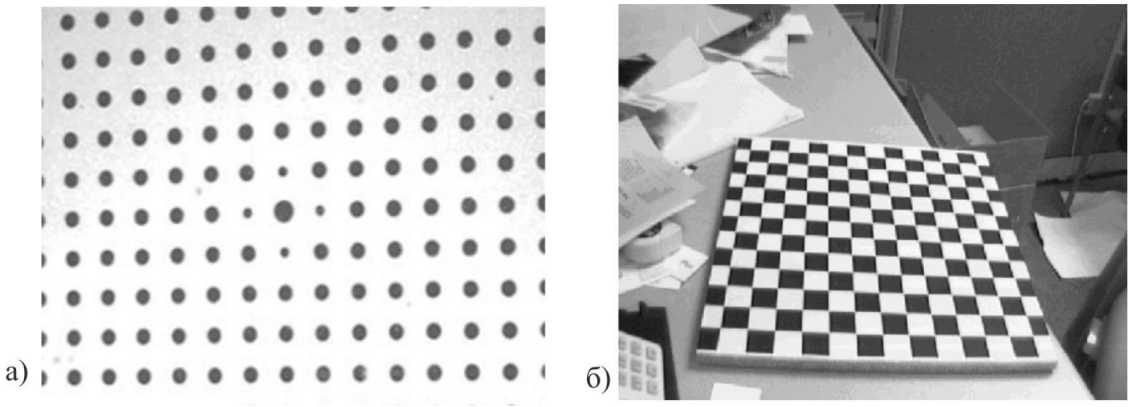

Рис. 6. Примеры калибровочных мишеней

В отличие от линейной модели калибровки, полиномиальные модели могут более точно отображать модель при наличии нелинейных искажений оптической системы в процессе регистрации изображений. Однако полиномиальные модели более чувствительны к отклонению параметров оптической конфигурации, поэтому в некоторых случаях получить точную калибровку с использованием этих моделей не удается - увеличивается случайный шум, не связанный с физической моделью проецирования на плоскость изображения, который варьируется от снимка к снимку. Поэтому

полиномиальные модели следует использовать там, где ошибка, связанная с дисторсией оптической системы, много больше случайной погрешности [20].

В 2008 году Zhao H. и Ge L. [21] предложили более точный алгоритм калибровки камеры с применением нейронной сети для анализа изображений при измерении деформаций в грунтах. Результаты измерений указывают на увеличение точности в 2 ÷ 277 раз в сравнении со стандартными линейными и полиномиальными методами калибровки.

4. Текстура

Расчетная область должна содержать достаточную текстуру для получения острого корреляционного пика. Естественный песок имеет собственную текстуру из частиц различной формы, яркости, теней на гранях и между частицами при освещении. На другие материалы (глина, бетон, дерево и др.) часто необходимо нанести дополнительную искусственную текстуру, например, добавить на снимаемую глинистую поверхность промытого песка, желательно однородного гранулометрического состава. Следует заметить, что оптимальный размер частиц на изображении должен быть порядка 1.5 ÷ 2.5 пикселя [13]. Этого можно добиться, варьируя гранулометрический состав песка. При создании текстуры на поверхностях другими способами оптимальных результатов можно добиться, придерживаясь рекомендованного выше размера частиц, а также хорошего контраста света и тени на текстуре.

Используя лоток с прозрачной стенкой, нужно следить, чтобы стенка достаточно хорошо пропускала свет, была без крупных царапин (перемещения за ними не будут вычислены).

При использовании пыльного песчаного грунта мелкая пыль имеет особенность прилипать к стенкам лотка, что занижает величину измеряемых перемещений. Обычный антистатик может решить эту проблему.

При испытаниях с глинистыми грунтами песчаная текстура наносится следующим образом. В лоток со смазанными (лучше всего прозрачной

силиконовой смазкой) стенками укладывается грунт, затем лоток переворачивают и снимают переднюю стенку. На открывшуюся поверхность грунта наносят слой однородного песка, вдавливают в глину, лишнее стряхивают и возвращают на место прозрачную стенку.

5. Освещение

Освещение выбирается так, чтобы объект съемки был равномерно освещен. Размещение осветительных приборов не должно создавать бликов и отражений на снимке. При исследовании грунтов поверхность, как правило, снимается через прозрачное стекло, в котором отражается окружающая обстановка: камера и находящиеся сзади неё предметы. Желательно исключить такие отражения, повесив, к примеру, позади камеры темную материю либо затемнив помещение.

Как известно, наименьшее количество шумов на цифровом снимке наблюдается при минимальных значениях ISO, следовательно яркость подсветки должна быть достаточно высокой.

6. Настройка фотокамеры

Режим съемки выбирается ручной (Manual). Поскольку снимаемый нами объект, как правило, малоподвижен, для начала выбираем глубину резкости (ГРИП). ГРИП зависит от значения диафрагмы объектива. Диафрагму устанавливаем так, чтобы все интересующие нас участки снимаемого объекта находились в зоне резкости, а диафрагма при этом имела максимальную величину. Это даст минимальную ГРИП.

Значение ISO, как говорилось выше, устанавливаем минимальные. Теперь, глядя на индикатор экспозиции, перебираем значения выдержки и останавливаемся, когда индикатор покажет ноль. Таким образом более полно используется динамический диапазон матрицы и улучшается текстура. Всё.

Для контроля можно сделать пробный снимок и посмотреть по гистограмме, нет ли засвеченных или излишне затененных участков.

Гистограмму снимка можно посмотреть либо на самой камере, либо на компьютере через программу. Пересвеченное изображение частицы имеет «полочку» из максимально светлых значений в центре, где должен находиться пик.

Фотокамеру устанавливаем так, чтобы матрица камеры была компланарна плоскости фотографируемой поверхности. Для уменьшения геометрических искажений. Искажения изображения увеличиваются также с расширением угла обзора, потому предпочтительнее использовать телеобъективы. При использовании зуммируемого объектива помним, что в самом дальнем конце искажения (дисторсия, аберрации) значительно больше, поэтому следует оставить некоторый запас фокусного расстояния.

Во время фотосъемки нужно исключить прикосновения к камере. Для этого можно подключить камеру через USB-порт к компьютеру и управлять оттуда, либо использовать поставляемое к камере устройство дистанционного управления.

7. Размер расчетных областей

Для начала рассмотрим ограничение на максимально измеряемое перемещение, которое накладывает размер расчетной области, а также динамический диапазон измерений.

Из теоремы Котельникова (Найквиста) [5] следует ограничение на максимальное измеряемое смещение частиц внутри области расчета, которое в случае PIV измерений равно четверти области расчета:

$$D_x^{max} = \Delta x_0 < d_x/4, D_y^{max} = \Delta y_0 < d_y/4$$

Динамический диапазон измерений определяется отношением максимального измеряемого смещения частиц к минимальному. Таким образом, оптимальное измеряемое максимальное смещение – четверть области расчета (в итерационном методе – четверть области на первой итерации). Минимальное смещение зависит от алгоритмов обработки и его

типичным значением является 0,1 пикс для стандартного кросскорреляционного алгоритма и 0,03 пикс для итерационных алгоритмов. Для расчетной области размером 32x32 пикселя стандартный кросс-корреляционный алгоритм дает динамический диапазон около 80. Итерационные алгоритмы с переразбиением областей, например, с 64x64 до 32x32 пикселей, дадут динамический диапазон порядка 500. Иначе говоря, если максимальное перемещение за один шаг составляет 10 пикс, то минимальное измеряемое перемещение будет равняться 10/80=0,125 пикс.

White [17] выполнил серию тестов для установления точности метода PIV при наблюдении процесса движения песка и глины (рис. 7). По результатам экспериментальных исследований D.J.White установил, что точность определения перемещений функционально прочно связана с размером расчетных областей PIV и гораздо менее – с текстурой объекта съемки.

На рис. 7 точность выражается универсальным способом – через долю от поля зрения камеры. Для более удобного представления о точности, выразим её в мм: для этого предположим, что в поле зрения камеры попадает исследуемая зона 1x1 м. Тогда точность 1/18000 будет соответствовать 0,056 мм. В том случае, если мы приблизим камеру к объекту, и исследуемая зона уменьшится до 0,5 x 0,5 м, точность увеличится вдвое. Дело в том, что алгоритм метода работает с пикселями изображения, а не с реальными объектами. Точность, выражаясь через пиксели изображения или через долю от поля зрения камеры, дает более универсальное и удобное для сравнения с другими опытами значение.

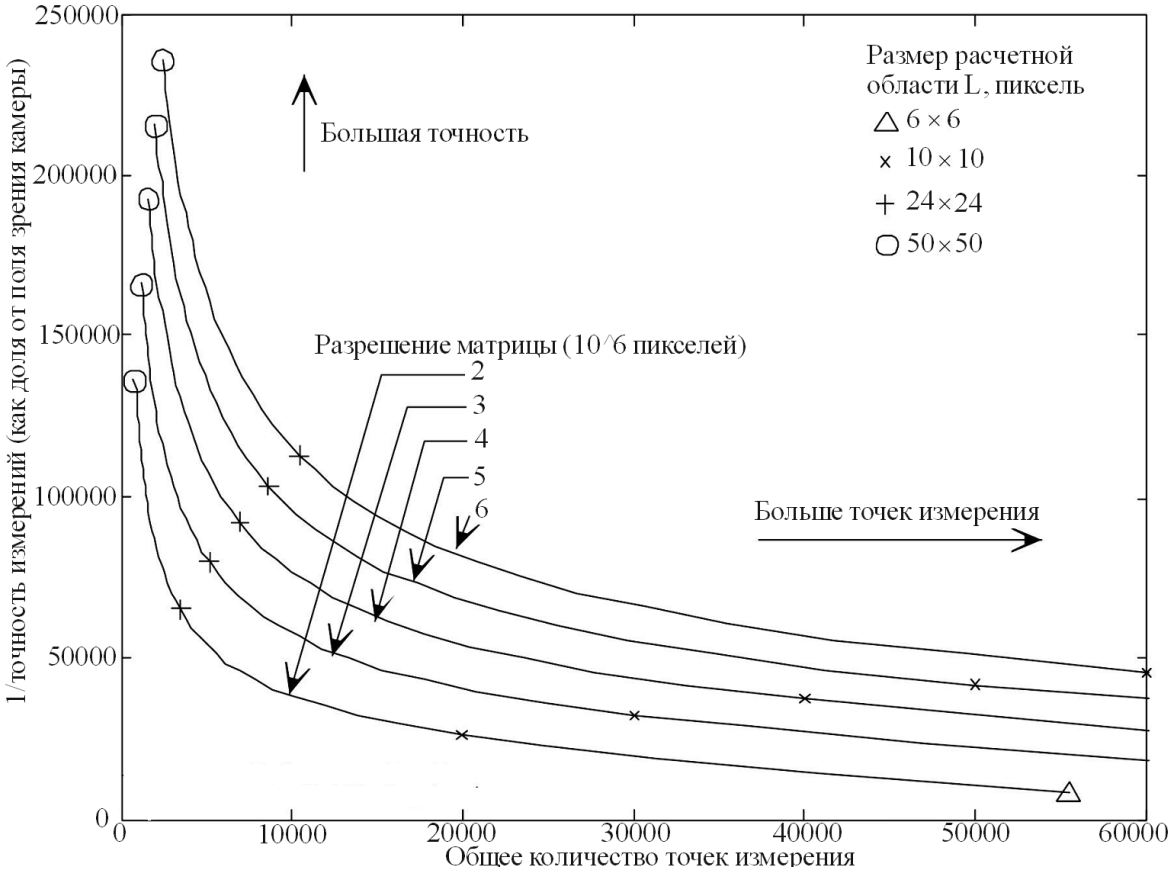

Рис 7. Зависимости между размером расчетной области и точностью измерений [17]

Отмеченная выше точность относится к одиночному приращению перемещения. Если расчетные области отслеживаются через последовательность изображений, когда перемещенная на одном шаге область формирует начальное положение области для следующего приращения, то случайная ошибка на каждом шаге должна суммироваться для нахождения полной ошибки перемещения области на конечном изображении. Следовательно, эта случайная ошибка должна быть помножена на $\sqrt{n}$, где n – число приращений перемещения.

Стоит заметить, что перемещение расчетной области – это некое усредненное перемещение всех частиц области. При значительном градиенте поля перемещений в сочетании с крупными расчетными областями это

может дать погрешности гораздо большие, чем суммарная погрешность при использовании мелких областей пусть даже с малыми шагами перемещений.

Перед исследователем встает дилемма: либо выбрать густую сетку, либо большую точность измерений.

Вывод

Малые расчетные области, в сравнении с крупными, дают меньшую точность измерений при малых градиентах перемещений. Также увеличивается число шагов нагружения, при этом суммируются случайные ошибки и на конечной ступени становится невозможным измерить малые перемещения. Плюсом малых расчетных областей можно большую густоту точек измерений и более высокую точность измерений при наличии больших градиентов перемещений. Измерить малые перемещения можно, если при ступенчатом нагружении не суммировать перемещения большое число раз.

Для выбора размера расчетных областей предлагается следующий алгоритм.

1. Определиться с размером зоны на интересующем нас объекте, для которой будет строиться поле перемещений.
2. Установить фотокамеру так, чтобы интересующая нас область занимала большую часть снимка (но не всю – большие искажения).
3. Определиться, какое максимальное перемещение нужно будет измерить; вычислить его в пикс, уже зная физические размеры области, попадающей на снимок.
4. Приблизительно оценить погрешности измерений при использовании расчетных областей различного размера в соответствии с рис. 7.
5. В зависимости от целей эксперимента и ожидаемых градиентов перемещений выбрать размер расчетных областей.

8. Проведение эксперимента

Процедура проведения эксперимента с применением метода PIV практически не отличается от обычной. Фотофиксация выполняется на каждой ступени нагружения или через определенные промежутки времени в соответствии с особенностями эксперимента.

9. Оценка точности измерений

На погрешность метода оказывают влияние несколько факторов. Во-первых, это погрешности, связанные с проведением эксперимента, во-вторых, это погрешности вычислений. В общем случае ошибку измерения ε_{tot} можно представить как сумму систематической ошибки ε_{biax} и случайной ошибки ε_{rms}:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{biax} + \varepsilon_{rms} \tag{2}$$

Основной вклад в погрешность PIV измерений вносит точность измерения перемещений частиц. Точность измерений и систематическая ошибка может быть оценена несколькими способами.

Один из них – это использование реальных PIV измерений, сделанных на физическом объекте с известными распределениями перемещений. Понятно, что такой способ дает наиболее реальную оценку точности измерений. При этом, однако, он не позволяет исследовать полностью вклад в погрешность таких параметров, как диаметр частиц или уровень шума на изображении. Оценка точности измерений выполняется в этом случае с использованием экспериментальной установки (рис. 8), включающей контейнер с песком, который передвигается по специальным направляющим, что позволяет плавно перемещать его при помощи микрометрической головки.

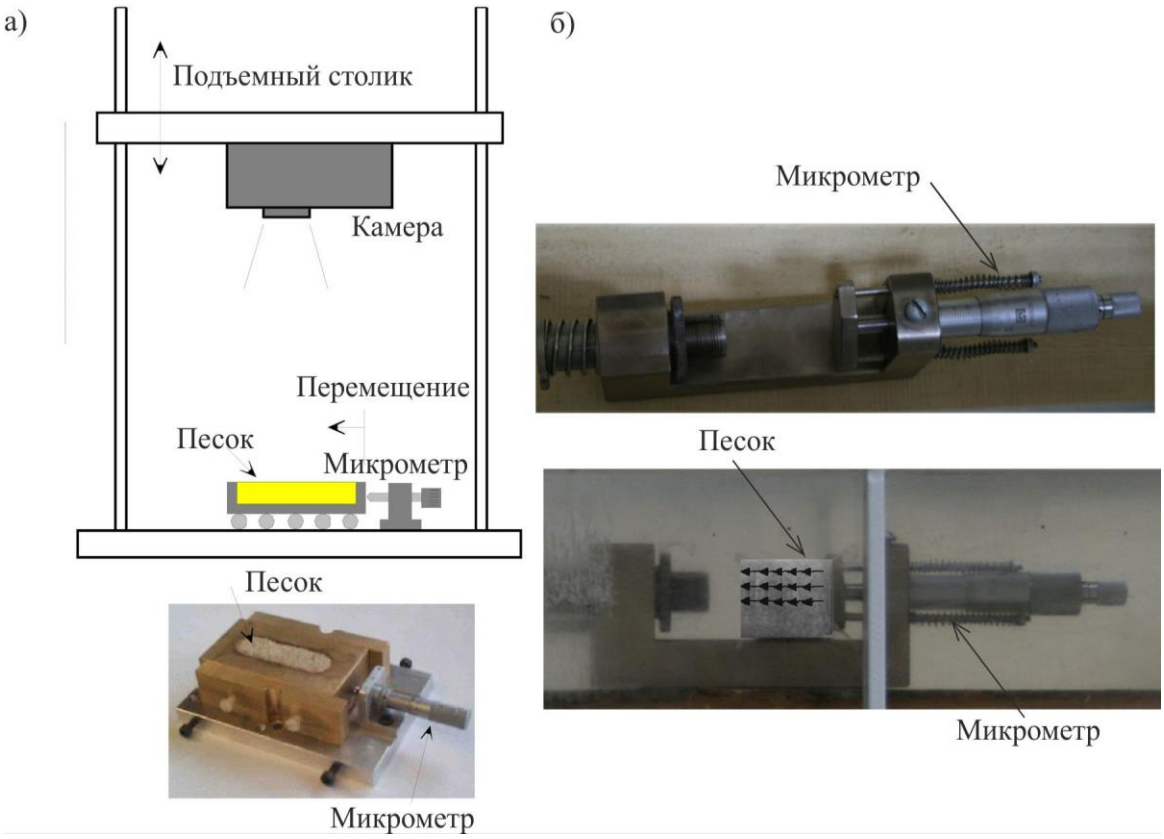

Рис. 8. Примеры установок для экспериментального определения точности измерений: а) [17], б) [2]

Контейнер движется малыми заданными шагами, например, 0,001 мм. С помощью PIV анализируются пары последовательных снимков, и оцениваются полученные векторы смещений частиц. Поскольку грунт, находящийся в контейнере, смещается как единое целое, векторы должны быть идентичны и в идеале равняться заданному микрометрической головкой перемещению. Есть возможность оценить точность при различном расстоянии до объекта, освещенности, угле поворота и др. и подобрать оптимальный вариант.

Другой способ оценки погрешности измерений – применение алгоритмов обработки к искусственным изображениям, сгенерированные методом Монте-Карло [11]. В прямоугольной области пространства, моделирующей световой «нож» создается случайное распределение частиц. После дискретизации и оцифровки изображений выполняется обработка данных при помощи метода PIV и сравнение результатов с

известным распределением перемещений, что позволяет оценить погрешность измерений. Изменяя параметры тестовых изображений, можно определить их вклад в погрешность по отдельности.

10. Вычисление полей перемещений и графическое оформление результатов

Основная часть программного обеспечения представлена в виде модулей для MatLab (http://www.mathworks.com/). Наиболее известные из них:

- GeoPIV (http://www.eng.cam.ac.uk);
- MatPIV (http://folk.uio.no/jks/matpiv/);
- OpenPIV (http://www.openpiv.net/);
- PIVlab (http://pivlab.blogspot.ru/);
- JPIV (http://www.jpiv.vennemann-online.de/);
- mpiv (http://www.oceanwave.jp/softwares/mpiv/index.php) ;
- Gpiv (http://gpiv.sourceforge.net/index.html) ;
- PIV analyser (http://fiji.sc/wiki/index.php/PIV_analyser) ;
- AnaPIV (http://pivproc.nambis.de/downloads/index.html) ;
- PPIV (http://sourceforge.net/projects/ppiv/);
- OSIV (http://osiv.sourceforge.net/index.html).

Алгоритм действия большинства программ соответствует следующему:

1. Загрузка изображений.
2. Назначение сетки расчетных областей.
3. Наложение масок для исключения из расчета ненужных зон.
4. Определение центров калибровочных мишеней.
5. Задание истинных координат калибровочных мишеней.
6. Выбор метода расчета корреляционной функции, определения подпика и т.д.
7. Расчет поля перемещений.
8. Фильтрация результатов для исключения случайных векторов.

9. Выполнение калибровки.

10. Расчет полей сдвиговых, объемных деформаций и другие дополнительные операции по желанию пользователя.

11. Графический вывод результатов в удобном виде

Коммерческое программное обеспечение представлено такими программами как:

– Actual Flow (http://www.polis-instruments.ru/);
– PIVview (http://www.pivtec.com/);
– ProVISION (http://www.idtpiv.com/);
– VidPIV (http://www.oxfordlasers.com).

Если обратить внимание на PIVview, можно заметить, что программа обладает большими возможностями по выбору итерационных методов, методов корреляции, определения подпика корреляционной функции, множеством фильтров и гибкими возможностями по графическому выводу результатов. Демо-версия не позволяет проводить калибровку камеры, а настройки по графическому оформлению результатов урезаны, однако бесплатная версия дает возможность сохранить результат расчета поля перемещений в универсальном формате Plane ASC-II. Дальнейшую обработку данных, расчет полей сдвиговых, объемных деформаций и другие дополнительные операции, а также графическое оформление результатов можно проводить в MatLab как полностью своими силами, так и с применением отдельных функций из GeoPIV, MatPIV и др.

По каждому из описанных выше программных продуктов существуют подробные руководства. Описывать вторично последовательность действий при работе с этими программами не имеет смысла еще и потому, что без знания основных принципов работы метода PIV, навыков работы в среде MatLab, а также времени и желания чтобы разобраться в работе каждой конкретной программы пользователь не сможет получить хороших

результатов. Данное руководство призвано лишь направить исследователя в правильном направлении, дать полезные рекомендации в работе.

Список литературы

1. Ложкин В. А., Ложкин Ю. А., Токарев М. П. Использование высокопроизводительных вычислительных платформ в задачах томографической цифровой трассерной визуализации // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – т. 13. – с. 20-27.

2. Мельников А.В., Новичков Г.А., Болдырев Г.Г. Исследование деформированного состояния песчаного основания с использованием метода цифровой обработки образов // Международный журнал «Геотехника». – 2012. – №1. – с. 28-41.

3. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скоростей, Вычислительные технологии. – 2007. – Том 12. – No. 3. – с. 109-131.

4. Христов Х. Санкт-Петербург, 1889 г.: первое фотографическое исследование процесса разрушения грунта под фундаментом // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. –No. 7. – с. 197-192.

5. Actual Flow. Руководство пользователя Программы. Версия 1.16. – Электрон. дан. – Новосибирск: Институт Теплофизики СО РАН, 2008. – Режим доступа: http://www.polis-instruments.ru (24.12.2012).

6. Adrian, R. J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1991. – Vol. 23. – pp. 261-304.

7. Aghlara R. Application of 2-dimensional Digital Image Correlation for mapping bond strain and stress distribution in concrete // Faculty of Civil Engineering University Technology Malaysia. – 2010. – p. 110.

8. Barazzetti L., Scaioni M. Development and Implementation of Image-based Algorithms for Measurement of Deformations in Material Testing // Sensors. – 2010. – No. 10 – pp. 7469-7495.

9. Bostwick L., Rowe R. K., Take W. A., Brachman R. W. I. Anisotropy and directional shrinkage of geosynthetic clay liners // Geosynthetics International. – 2010. – No. 3. – pp. 157-170.

10. Dutton M. G., Hoult N. A., Take W. A. Towards a digital image correlation based strain sensor // The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring. – 2011. – Vol. 4. – p. 2195-2203.

11. Keane R.D., Adrian R.J. Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems // Meas. Sci. Technol. – 1990. – Vol. 1. – pp. 1202-1215.

12. Ni Q., Hird C. C. Guymer I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry // Geotechnique 60. – 2010. – No. 2. – p. 121-132.

13. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle image Velocimetry. A practical guide, Springer: Berlin.–2007. – p. 460.

14. Scarano F. Iterative image deformation methods in PIV. Review article // Meas. Sci. Technol.– 2002. –No. 1.–Vol. 13. –pp. 1-19.

15. Sveen J. K An introduction to MatPIV v. 1.6.1 // Mechanics and applied mathematics. – 2004. – No. 2.

16. Tsakiri M., Ioannidis C., Papanikos P., Kattis M. Load testing measurements for structural assessment using geodetic and photogrammetric techniques // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. – 2004. – p. 14.

17. White D.J. An investigation into the behaviour of pressed-in piles // A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Cambridge. - 2002. - p. 390.

18. White D.J., Richards D.J., Lock A.C. The measurement of landfill settlement using digital imaging and PIV analysis // In, Ninth International Waste Management & Landfill Symposium. – 2003.–CD. – p. 10.

19. White D. J., Take W.A. GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing // University of Cambridge. – 2002.–p. 14.

20. Willert C. Assessment of camera models for use in planar velocimetry calibration // Exp. Fluids. –2006.–Vol. 41. – pp. 135-143.

21. Zhao H., Ge L. Camera calibration using neural network for image-based soil deformation measurement systems // Geotechnical Testing Journal. – 2008. – Vol. 31. – No. 2. – pp. 192-197.