

Литература

1. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры: Пер. с англ. М., 1977.
2. Richmond J.H. Scattering by a Dielectric Cylinder of Arbitrary Cross Section Shape // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1965. V. AP-13. No. 3. P. 334–341.
3. Mei K.K. On the Integral Equations of Thin Wire Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1965. V. AP-13. No. 3. P. 374–378.
4. Лифанов И.К., Ненашев А.С. Новый подход к теории тонких проволочных антенн // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 5. С. 25–41.
5. Harrington R.F. Time-Harmonic Electromagnetic Fields. Ch. 3. N.Y.: McGraw-Hill, 1961. P. 358–359.
6. Келлер Ю. А. Моделирование рассеяния электромагнитной волны двумя параллельными проводниками // Материалы XIX Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Воронеж, 2006. С. 182–185.
7. Келлер Ю. А. Исследование электромагнитного рассеяния структурами, составленными из нескольких непересекающихся проводников // Изв. Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 4. С. 15–20.
8. Марков Г.Т. Антенны. Л., 1960.

Поступила в редакцию 03. 11. 2006

УДК 004.932

*Н.И. Ксенов**, *В.И. Сырякин**, *С.В. Шидловский***

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ СТРУКТУР

*Томский государственный университет

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Введение

Перспективной тенденцией при разработке и создании мультипроцессорных вычислительных структур различного назначения является децентрализация их управления, а определяющим принципом их построения является параллельная обработка задач управления. При этом отдельные задачи должны реализовываться специальными вычислительными структурами. Использование подобного подхода дает возможность максимально учитывать специфику отдельных алгоритмов, что повышает эффективность систем в целом.

Одним из путей повышения производительности, вычислительной мощности и надежности функционирования таких систем является создание специализированных вычислительных структур, однако при этом возникает проблема выбора метода решения и оперативного изменения вычислительных структур, обеспечивающих необходимое быстродействие и отвечающих современным требованиям информационных технологий [1].

Указанные принципы заложены при создании перестраиваемой вычислительной структуры [2] исследования алгоритмов обработки изображения поверхности для оценки деформации твердых тел. При этом основные усилия были направлены: а) на получение экспериментальных данных при построении адекватных математических моделей для проведения компьютерного моделирования поведения нагруженных материалов; б) на разработку подхода к неразрушающему контролю, основанному на выявлении стадии

предразрушения; в) на экспериментальное исследование процессов пластической деформации на мезоуровне, развивающихся в конструкционных материалах при различных условиях нагружения [3]. Последнее должно позволить выработать рекомендации по новым методам упрочнения, созданию оптимальных типов покрытий, определению оптимальных соотношений механических свойств покрытия и матрицы (основы), составам композиционных материалов.

Для получения информации о механическом состоянии нагруженного твердого тела путем анализа изменений топологии поверхности используют ряд алгоритмов, позволяющих оценивать смещения участков поверхности исследуемого материала с пространственным разрешением, достаточным для выявления характера развития пластической деформации на мезоуровне, в том числе следить за эволюцией напряженно-деформированного состояния поверхности.

Задание алгоритмов управления

Большинство реально созданных вычислительных структур логического управления построено непосредственно по словесному описанию их работы без применения формализованных методов, основанных на использовании автоматных таблиц, графов переходов и т.п., и применяются лишь в некоторых наиболее сложных случаях, как правило, для построения и минимизации отдельных небольших подсистем.

Высокая стоимость разработки топологии интегральных схем диктует необходимость применения повторяющихся модульных структур, т.е. небольшо-

го числа разных типов простых элементов. Таким образом, задача состоит в определении набора элементарных ячеек (многофункциональных логических модулей (МЛМ)), реализуемых наиболее эффективно и позволяющих оптимальным образом использовать потенциальные возможности технологии изготовления новых устройств.

На основании проведенных исследований [4] установлено, что настраиваемые логические модули для построения логических устройств, исходя из специфики булевых формул, описывающих алгоритмы их функционирования, должны быть способны реализовывать путем настройки не произвольные функции h переменных, а лишь только те из них, для которых булевы формулы неповторны или обладают малой повторностью переменных, что обеспечит построение модулей с малой элементной сложностью и числом внешних выходов.

С конструированием матричных однородных структур связан целый ряд важнейших проблем, в частности проблем соединений и их модульной организации. Изотропные среды из многофункциональных логических модулей можно организовывать таким образом, чтобы обеспечить выполнение различных видов обработки информации. Возможности и ограничения при организации соединений в изотропной среде существенным образом сказываются на быстродействии и оперативной гибкости данного устройства.

Разные алгоритмы требуют разной степени связи. Чтобы эффективно использовать специфические свойства способов организации соединений, математические операции, необходимые для обработки информации и для выполнения вычислений, должны быть обличены в форму соответствующих алгоритмов.

При выполнении точечных операций каждая точка одномерной или двумерной матрицы должна обрабатываться совершенно независимо. Если одномерный входной сигнал представляет собой временную последовательность, то такие операции относятся к операциям «без запоминания». Все точки входной матрицы могут обрабатываться одинаковым образом, или же для каждой из них может иметься свой независимый набор правил обработки. В обоих этих случаях очевидно, что после ввода матрицы входных данных в матрицу изотропной среды каждый элемент может выполнять свою собственную задачу обработки независимо от остальных элементов среды. Поэтому необходимая для таких операций связь минимальна и проявляется только при вводе данных в изотропную среду или выводе из нее. Следовательно, такие операции могут выполняться параллельно.

Многие алгоритмы обработки информации могут быть выражены посредством матричных операций. Одной из основных операций матричной алгебры является умножение двух матриц (частным случаем такой операции можно считать умножение вектора на

матрицу). Математически такое умножение описывается следующим образом:

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^N A_{ik} B_{kj}, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где для удобства через A , B и C обозначим квадратные матрицы $N \times N$. Результирующую матрицу иначе можно определить как сумму N матриц внешнего произведения, полученных умножением вектор-столбцов матрицы A на соответствующие вектор-строки матрицы B :

$$C = \sum_{k=0}^N C^{(k)}, \quad C_{ij}^{(k)} = A_{ik} B_{kj}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Здесь вторая строка – это внешнее произведение k -го столбца матрицы A на k -ю строку матрицы B . Из вышеприведенных уравнений очевидно, что при данной операции высока степень связанности элементов входных матриц и результирующей матрицы. Так, все элементы данной строки матрицы A и данного столбца матрицы B дадут вклад в один элемент результирующей матрицы C , и наоборот, один элемент матрицы A (или B) дает вклад во все элементы соответствующей строки (или столбца) матрицы C .

Регулярный характер связи, задаваемый уравнениями (1) и (2), означает, что операции можно выполнять также посредством рекуррентных и локально связанных алгоритмов, реализуемых с помощью изотропных сред из многофункциональных логических модулей [5].

Две важные операции обработки информации, требующие непростых связей между всеми элементами матрицы входных данных, – это фурье-преобразование и сортировка. Иными словами, при этих операциях на каждый элемент выходной матрицы влияют все элементы входной матрицы и каждый элемент входной матрицы влияет на все элементы выходной матрицы. Вычисление при фурье-преобразовании сводится к умножению и сложению комплексных чисел, тогда как сортировка является операцией сравнения.

Операция сортировки числовой последовательности включает в себя элементарные операции сравнения двух чисел и расположение их на выходе в убывающем порядке. Одним из эффективных алгоритмов сортировки является сортирующий алгоритм Батчера. Основной принцип, положенный в основу этого алгоритма, состоит в применении метода «разделяй и властвуй», т.е. крупная задача делится на несколько задач меньшего масштаба и комбинация их решений на выходе позволяет получить решение общей задачи. Сеть взаимосвязей изотропной среды для реализации этого алгоритма приведена на рис. 1.

Таким образом, на основе МЛМ можно построить различные проблемно-ориентированные комплексы, которые могут настраиваться на реализацию конкретного алгоритма из заданного класса.

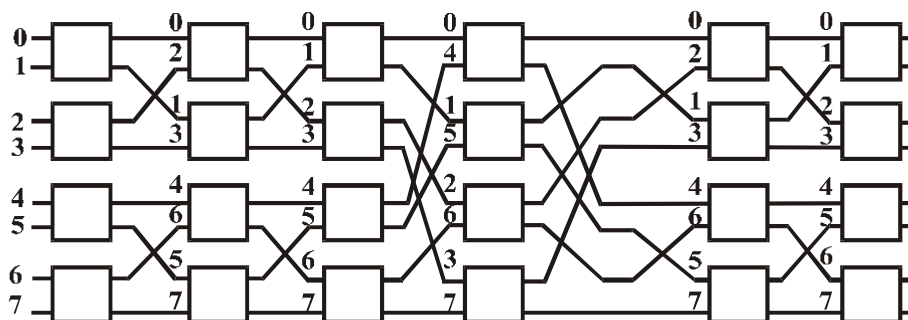


Рис. 1. Изотропная среда

Алгоритмы оценки смещения участков изображений

Общее описание измерительной системы вычислительной структуры может быть представлено в виде, показанном на рис. 2, а.

Не останавливаясь подробно на вопросе калибровки оптической системы, отметим, что конечный результат измерительной системы – картина распределения деформации – зависит от качества обработки информации на этапах: 1) формирования изображения; 2) его предварительной обработки; 3) расчета информативных признаков; 4) посткорректировки результатов расчета (фильтрации), а также участия

оператора в настройке параметров расчета и ручной корректировке промежуточных данных.

Традиционно, для определения смещения участков изображения используются корреляционные алгоритмы (КА). Наиболее распространенным является «классический» КА, в котором производится вычисление взаимно корреляционной функции (ВКФ) или интеграла типа свертки с последующим поиском максимума этого функционала. Реализация КА в «классическом варианте» требует значительных вычислительных затрат для осуществления операций умножения и интегрирования при всех сдвигах и разворотах текущего изображения (ТИ) и эталонного изображения (ЭИ) [6].

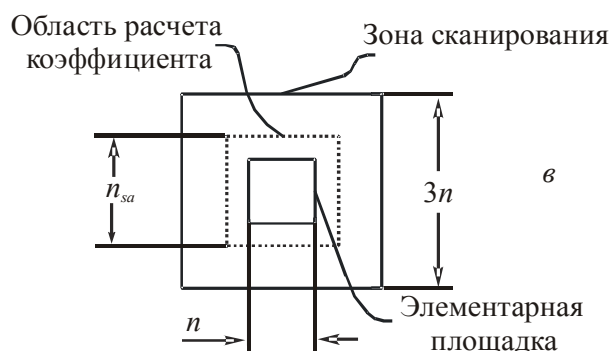
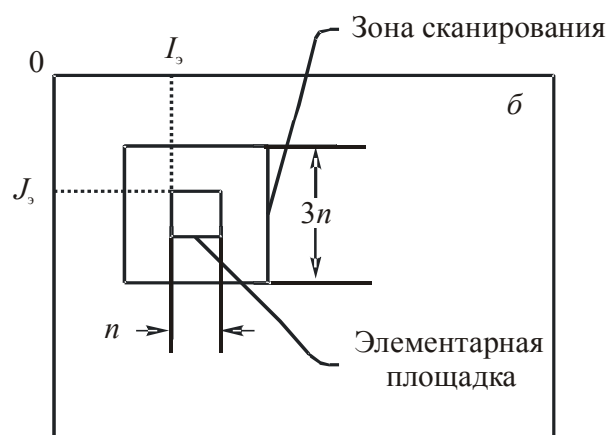
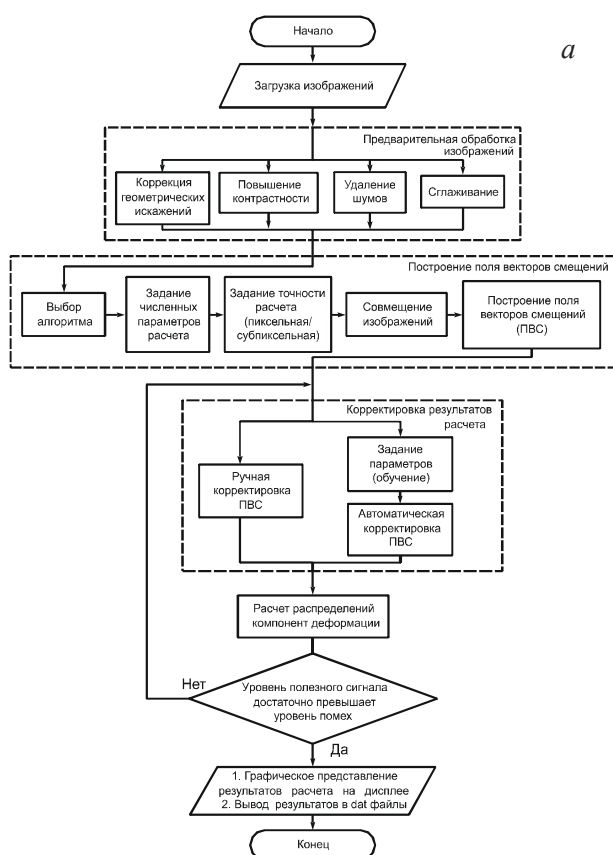


Рис. 2. Пояснения к принципу работы измерительной системы: а) блок-схема алгоритма работы измерительной системы; б, в) принципы определения смещения путем сканирования в пределах зоны поиска

Алгоритмы оценки смещений основаны на использовании процедуры установления соответствия между участками двух изображений путем вычисления оценки следующего вида [6]:

$$\hat{v} = \arg \operatorname{extr}_v J(F_1, F_2(v)),$$

где v – геометрические параметры, имеющие смысл сдвигов по декартовым координатам, по углу, масштабу и т.п.; F_1 – ТИ; $F_2(v)$ – ЭИ, полученное до деформации или в определенный момент времени; J – мера близости ТИ и ЭИ.

Для определения меры близости одинаковых по форме и размеру участков ТИ и ЭИ используется коэффициент корреляции или коэффициент разности. Коэффициент разности можно представить следующим выражением [6]:

$$k_{\text{dif}} = \left(1 - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |I_{1,i,j} - I_{2,i,j}| \right)^r,$$

где I_1, I_2 – значения яркости пикселей сравниваемых участков ТИ и ЭИ соответственно; r – степень, возведение в которую позволяет производить усиление полезной составляющей.

Коэффициент корреляции может быть записан в следующем виде:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - m_1)(I_{2,i,j} - m_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - m_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{2,i,j} - m_2)^2}},$$

где m_1, m_2 – среднееарифметические значения I_1, I_2 соответственно; n – размер сторон участков изображений.

Рассмотрим более подробно основные алгоритмы, реализованные в ходе проведенных исследований.

Базовый алгоритм. Для удобства обозначим наиболее простой алгоритм построения полей векторов смещений (ПВС) как базовый, принцип функционирования которого заключается в нахождении максимума коэффициента k_r или k_{dif} в пределах зоны сканирования [3]. В рамках базового алгоритма, в зависимости от использования меры близости (коэффициента корреляции или разности), подразделяют корреляционный и разностный подходы. Принцип определения смещения можно сформулировать следующим образом: в пределах зоны сканирования (которая, как правило, имеет размер $3n$, где n – размер стороны элементарной площадки, в пределах которой определяется коэффициент $k_r (k_{\text{dif}})$) построено с шагом 1 пиксел производится поиск его максимума. Перед проведением сканирования в пределах зоны поиска коэффициент $k_r (k_{\text{dif}})$ определяется без смещения в точке (I_3, J_3) ЭИ. Этим из рассмотрения вычитаются два предельных случая, когда яркости всех элементов площадки совпадают (смещения по осям абсцисс и ординат равны 0) или имеют значения 0 и 255 (для полутонового изображения, содержащего 256 уровней

серого): в этом случае из черного участка вычитается белый и значение коэффициента вырождается в 1 или 0. Подобным образом путем разбиения изображения на участки одинакового размера n производится построение полного поля векторов смещений.

Алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции (разности). Данный алгоритм наиболее требователен к вычислительным ресурсам. Его отличие от базового в том, что размер области n_{sa} , в пределах которой производится расчет коэффициента $k_r (k_{\text{dif}})$, задается больше размера элементарной площадки, в то время как размер зоны сканирования остается неизменным – $3n$. Обычно размер области n_{sa} выбирается равным $2n$. Принципиальная особенность алгоритма в том, что максимально возможное абсолютное смещение искомой площадки остается равным размеру элементарной площадки.

Алгоритм с усреднением окрестности заданного радиуса. Алгоритм позволяет отфильтровывать единичные выбросы функции распределения $k_r (k_{\text{dif}})$ в зоне сканирования (по базовому алгоритму), которые по амплитуде значительно больше окрестности (значений соседних коэффициентов). Коэффициент определения меры близости участков рассчитывается как среднееарифметическое окрестности коэффициентов $k_r (k_{\text{dif}})$ заданного радиуса R . Результирующее распределение коэффициентов будет иметь размер $(2n - 1 + 2R)(2n - 1 + 2R)$.

Алгоритм с оптимизацией по времени расчета (предварительным сканированием). Оптимизация расчета (определения смещения) по времени достигается за счет уменьшения объема вычислений, которое реализуется за счет введения в базовый алгоритм предварительного этапа сканирования с грубым шагом, равным $n/4$.

Алгоритм расчета с субпиксельной точностью. Известно, что определение смещений с точностью до одного пиксела может носить существенную погрешность при последующем определении компонентов деформации, что связано с аппаратом численного дифференцирования. Повышение точности расчета может быть достигнуто путем интерполирования либо фрагментов изображения [7], либо распределения ВКФ. В настоящей работе реализован второй подход. При этом после проведения процедуры интерполирования определяется положение максимума найденного распределения, по которому находят величину и направление смещения участка изображения (элементарной площадки). Поскольку реализованный метод работает не с изображением, а с распределением ВКФ, искажения изображения не происходит. Интерполирование производится в двух плоскостях: первоначально по вертикали и затем по горизонтали. Нами реализовано два метода сплайнового интерполирования: кубическое и квадратичное.

Автоматическая корректировка результатов построения векторов смещений (фильтрация). В

данной работе был предложен подход для проведения фильтрации векторов, смещения которых превышали значение некоторой заданной величины порога. Как правило, значение порога фильтрации подбиралось экспериментально в зависимости от условий и параметров нагружения, а также типа материала. В проводившихся тестовых расчетах величина порога для проведения автоматической корректировки ПВС по осям x и y была выбрана равной 4.

Компоненты деформации. Конечным результатом работы измерительной системы является расчет компонент деформации, которые вычисляются путем численного дифференцирования горизонтальной и вертикальной составляющих векторов смещений. Выражения для продольной ε_{xx} , поперечной ε_{yy} , сдвиговой ε_{xy} и поворотной ω_z компонент тензора дисторсии имеют следующий вид [3]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{dU_x}{dx}, \varepsilon_{yy} = \frac{dU_y}{dy},$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_x}{dy} + \frac{dU_y}{dx} \right), \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_y}{dx} - \frac{dU_x}{dy} \right),$$

где dU_x, dU_y – приращение смещений элементарных площадок вдоль соответствующих осей.

В вычислительной среде также реализованы модули для определения главного пластического сдвига (инвариантного к разворотам) и интенсивности скорости деформации (учитывающей время между регистрацией изображений поверхности нагруженного материала) [8]:

$$\gamma = \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + 4\varepsilon_{xy}^2},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xy}^2},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xy}^2}, \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0,$$

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2}.$$

Заключение

В работе рассмотрены алгоритмы построения векторов смещений для последующего расчета компонент деформации и освещены вопросы к заданию алгоритмов управления и переработки информации в проблемно-ориентированных комплексах. Реализованная вычислительная среда позволяет проводить расчет от качественных показателей ПВС до количественных результатов в виде компонент деформации с возможностью корректировки промежуточных результатов.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующее:

1. Наиболее эффективным с точки зрения «помехоустойчивости» при построении поля векторов смещений является корреляционный алгоритм с заданием области расчета коэффициента корреляции, так как это наиболее точный метод (из реализованных) при приемлемых вычислительных затратах.

2. Во всех исследованных в работе алгоритмах, за исключением оптимизированных по времени расчета, при увеличении размера стороны элементарной площадки увеличивается «помехоустойчивость» построения ПВС. Алгоритмы, оптимизированные по времени расчета, могут быть использованы для быстрой предварительной оценки ПВС.

3. Предложенный алгоритм построения ПВС с субпиксельной точностью показал свою эффективность при расчете компонент тензора дисторсии как с точки зрения увеличения точности расчета, так и с позиции трактовки физики наблюдаемых явлений. Повышение точности определения векторов смещений до долей пиксела не приводит к значительному увеличению временных затрат на построение ПВС.

Литература

1. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления: Пер. с англ. Б.И. Копылова. М., 2002.
2. Syryamkin V.I., Panin S.V. Television-optical technique for materials investigation and diagnostics of state of loaded materials and structure parts // *Computation Technologies*. 2003. V.8. P. 10–25.
3. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск, 1995. Т. 1, Т. 2.
4. Артюхов В.Л., Копейкин Г.А., Шалыто А.А. Настраиваемые модули для управляющих логических устройств. Л., 1981.
5. Пат. РФ № 2251141 / С.В. Шидловский. Ячейка однородной среды // *Опуб.* в Б.И. 2005. № 12.
6. Кориков А. М., Сырямкин В. И., Титов В.С. Корреляционные зрительные системы роботов. Томск, 1990.
7. Sutton M. A., McNeill S. R., Jang J., Babai M. // *Optical Engineering*, October. 1988. V. 27. No. 10. P. 870–877.
8. Панин С.В., Сырямкин В.И., Любутин П.С. // *Физическая мезомеханика*. 2001. Т.4. № 6. С. 105–117.

Поступила в редакцию 13. 12. 2006