

УДК 681.3

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА Трёхмерного рекурсивного поиска при построении поля векторов перемещений с использованием иерархического подхода*

С. В. Панин^{1,2}, В. В. Титков¹, П. С. Любутин^{1,2}

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4*

²*Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30*

E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Предложен и исследован подход к автоматическому определению параметров функционирования иерархического трёхмерного рекурсивного поиска (3D Recursive Search — 3DRS). Проведены сопоставительные исследования быстродействия и помехоустойчивости функционирования алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска для построения полей векторов смещений, включающего использование пирамид Гаусса (иерархический поиск). Показано, что при применении иерархического алгоритма 3DRS с определёнными в работе параметрами его функционирования может быть значительно повышена помехоустойчивость и снижены вычислительные затраты.

Ключевые слова: трёхмерный рекурсивный поиск, пирамиды Гаусса, вектор смещения, вычислительные затраты, помехоустойчивость.

Введение. Ключевыми проблемами развития оптического метода оценки деформации (в частности, с использованием подхода Digital Image Correlation (DIC) — корреляции цифровых изображений), а также систем технического зрения, в основе действия которых лежит нахождение поля движения, являются повышение точности (и помехоустойчивости) определения смещений и увеличение быстродействия (снижение вычислительных затрат) [1, 2]. Среди алгоритмов нахождения поля движения можно выделить следующие: блочные методы, методы оптического потока, фазовой корреляции, глобальной оценки движения, слежения за характерными элементами (объектами), многокадровой оценки движения и комбинированные алгоритмы [3]. Универсальность, невысокая вычислительная сложность и достаточная эффективность блочных методов способствовали созданию множества подходов для данного способа оценки движения. К базовым подходам блочной оценки движения следует отнести: полный перебор, шаблонные методы, иерархический поиск и методы, использующие векторы-кандидаты [3].

Пирамиды изображений (подход, основанный на иерархическом рассмотрении) активно применяются в разнообразных приложениях компьютерного зрения [4–6]. Получение пирамиды изображения (пирамиды Гаусса [7]) как набора изображений различного размера реализуется путём последовательного сжатия исходного изображения до достижения

*Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-07-00009, № 14-08-31747 мол.а) и Совета по грантам Президента РФ (гранты № СП-816.2012.5, № СП-3788.2013.3).

заданного либо определяемого в процессе вычислений порогового уровня. В задаче нахождения поля движения основным достоинством метода иерархического поиска является перебор сокращённого числа векторов, что позволяет повысить вычислительную эффективность, а также помехоустойчивость, поскольку при уменьшении изображений, как правило, удаляются высокочастотные шумы [3]. Однако вместе с высокочастотными шумами могут исчезнуть и мелкие объекты, что приведёт к появлению ошибок определения поля движения в малых по размеру областях.

Метод трёхмерного рекурсивного поиска (3D Recursive Search — 3DRS) относится к подходам, основанным на использовании векторов-кандидатов, и достаточно хорошо зарекомендовал себя [8–10]. В работе [11] были показаны преимущества его применения совместно с иерархическим поиском векторов движения. Выявлено, что предложенный метод оценки поля движения превосходит существующие подходы (как и стандартный алгоритм 3DRS) по параметру производительности при невысоком уровне вычислительной сложности. В частности, отмечено, что оптимальной величиной коэффициента масштабирования является 2. Таким образом, применение иерархического подхода в алгоритме 3DRS не требует сложных наборов векторов-кандидатов для достижения требуемой точности и минимизации вычислительных затрат: уже при относительно небольшом количестве кандидатов достигается приемлемая производительность расчёта. В то же время в [11] исследуемое количество проходов ограничено одним либо двумя, что может быть недостаточным для достижения требуемой помехоустойчивости расчёта в оптическом методе оценки деформации.

В предлагаемой работе решалась задача выработки правил автоматического подбора параметров алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска и проверки их функционирования. Для этого исследовали помехоустойчивость и быстродействие построения векторов смещений алгоритма 3DRS в различных комбинациях: с использованием иерархического подхода/без такового, с использованием правил/без них и т. п.

1. Метод 3DRS получил широкое распространение при обработке видеопотоков данных. С его помощью становится возможным в разы снизить время построения векторного поля [9]. При этом формирование каждого вектора смещений происходит путём сравнения блоков: изображения делятся на фрагменты и для каждого из них в текущем кадре производится поиск наиболее подобного (похожего) блока в предыдущем кадре. Для определения смещения каждого блока первоначально формируется набор векторов-кандидатов. Например, в качестве первого кандидата принимается вектор, построенный для данного блока в предыдущем кадре. Второй, третий и четвёртый — это векторы, полученные для соседних, уже обработанных блоков для данного кадра (при последовательном анализе, начиная с верхнего левого угла изображения, — это левый верхний и правый верхний). Затем кандидат определяется как вектор, компоненты которого равны медиане компонент двух-четырёх кандидатов. Последующие векторы-кандидаты задаются случайным образом и являются кандидатами обновления. После составления набора векторов-кандидатов для каждого блока изображения по выбранной схеме сканирования (например, начиная с левого верхнего угла путём перемещения слева направо и сверху вниз) производится построение вектора смещения на основании выбора из набора векторов-кандидатов с применением процедуры поиска минимума меры подобия, в качестве которой используется сумма абсолютных разностей (SAD — Sum of Absolute Differences) яркостей фрагментов изображения — текущего и предыдущего кадров. Затем процедура сканирования повторяется в обратном направлении. Одна выполненная процедура сканирования называется «проходом». Проход повторяется заданное количество раз. Если кадр в серии первый и осуществляется первый проход, то набор кандидатов заполняется нужным количеством случайных кандидатов. Метод 3DRS имеет вероятностный характер, когда векторы-кандидаты указывают предположительное направление смещения фрагментов изображения. Набор кандидатов

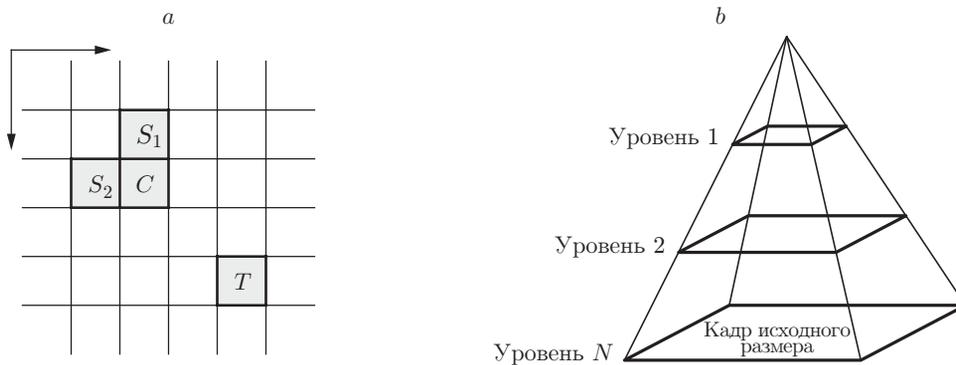


Рис. 1. Схемы алгоритмов, используемых при построении векторных полей: a — принцип составления набора векторов-кандидатов [9] (C — текущий блок, пространственные S_1 , S_2 и временной T кандидаты, стрелки указывают направление сканирования); b — схема иерархических уровней [3]

(рис. 1, a) содержит как временной (вектор смещения данного блока на предыдущем кадре), так и пространственные векторы (в соседних блоках), а также пространственные векторы обновления [9].

Принцип работы алгоритма иерархического поиска (рис. 1, b) заключается в следующем [3]. Перед началом поиска задаются уровни пирамиды, т. е. количество уменьшенных в $2n$ раз (n — натуральное число) подызображений относительно исходного изображения. Уровни нумеруются согласно размеру от меньшего к большему: уровень 1 содержит кадры минимального размера, уровень N — кадры исходного размера. Процесс оценки поля движения состоит из N итераций, на каждой из которых обрабатывается пара кадров на соответствующем уровне, при этом обработка выполняется от кадров меньшего размера к большему. На каждой итерации производится поиск перемещений. Далее, на каждой очередной итерации уточняются векторы, вычисленные на предыдущем шаге. При переходе на следующий уровень (пирамиды) размеры области поиска и блоков, для которых строятся векторы, остаются постоянными. За счёт этого повышается помехоустойчивость построения векторов в малококонтрастных областях, поскольку вероятность попадания контрастных деталей (объектов) возрастает вместе с увеличением размера блока, что является одной из основных проблем для блочных методов поиска перемещений.

Поиск перемещений при фиксированном размере блока на «низких» уровнях пирамиды (с малым размером кадра) позволяет повысить вероятность попадания (нахождения) в блок контрастных деталей (что повышает возможность правильного определения смещения) по сравнению со случаем изменения размера блока при переходе на следующий уровень. Кроме того, при постоянном размере области поиска можно находить большие по величине смещения по сравнению со случаем, когда размер области поиска уменьшается вдвое при переходе на очередной уровень.

1.1. *Выбор параметров алгоритма 3DRS.* В рамках исследования были построены зависимости коэффициента корреляции K_r [12, 13] (рис. 2, a) и времени расчёта векторного поля t (рис. 2, b) от количества кандидатов C и количества проходов S в алгоритме 3DRS. Данные зависимости изображены в виде поверхностей. Видно, что различные сочетания C и S могут давать схожий характер изменения анализируемого параметра. Был построен график, отражающий изменение двух описанных выше зависимостей (рис. 2, c) при одновременном линейном росте параметров C и S . Отчётливо видно, что существует соотношение S и C ($S = 4$ и $C = 8$), по достижении которого помехоустойчивость перестаёт значительно увеличиваться ($K_r \sim 0,8 \sim \text{const}$), при этом время расчёта возрастает. Таким

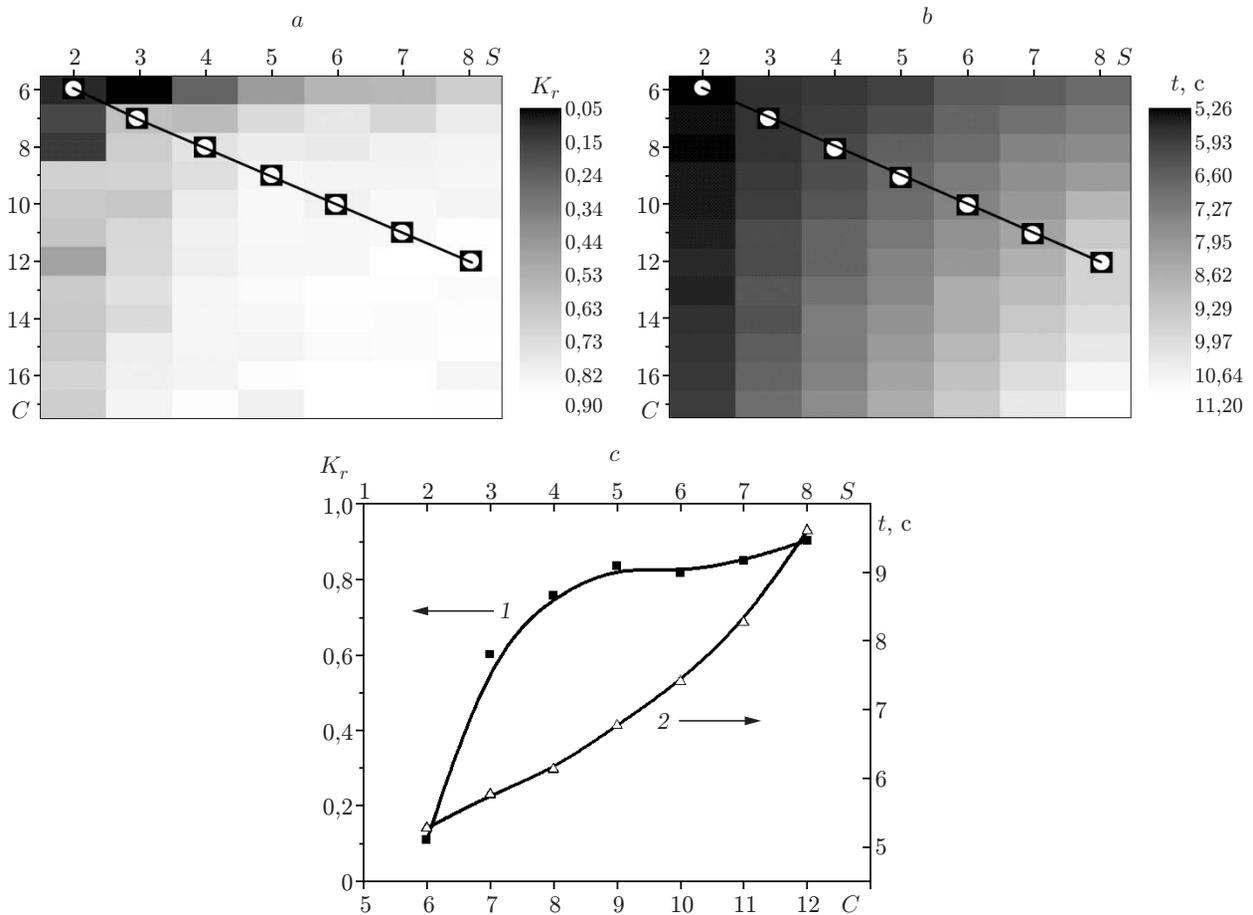


Рис. 2. Поверхности, иллюстрирующие взаимосвязь между количеством проходов S и количеством кандидатов C в методе 3DRS: зависимость коэффициента корреляции векторных полей (а) и времени расчёта векторного поля (б) от значений параметров S и C ; графики данных зависимостей (кривая 1 — коэффициент корреляции векторных полей, кривая 2 — время расчёта векторного поля) (с)

образом, для исключения избыточных вычислений необходимо решить задачу автоматического выбора значений S и C , при которых требуемая точность построения векторного поля будет достигаться за минимальное время, т. е. с учётом специфики изображений, используемых при построении векторных полей в оптическом методе оценки деформации:

$$K_r = \frac{\sum(D_1 - \bar{D}_1)(D_2 - \bar{D}_2)}{\sqrt{\sum(D_1 - \bar{D}_1)^2 \sum(D_2 - \bar{D}_2)^2}}, \quad (1)$$

где D_1, D_2 — поля расстояний [14] соответствующих векторных полей, необходимые для перехода от двухкомпонентных данных векторного поля к однокомпонентным; \bar{D}_1, \bar{D}_2 — среднеарифметические значения соответствующих полей расстояний. В нашем случае каждый элемент поля расстояний вычисляли следующим образом:

$$D_{i,j} = \sum_{k=1}^w \sum_{l=1}^h (|x_{i,j} - x_{k,l}| + |y_{i,j} - y_{k,l}|), \quad i = 1, \dots, w, \quad j = 1, \dots, h.$$

Для определения значения параметра S в качестве меры подобия применяли сумму значений нормированных абсолютных разностей векторных полей NSAD:

$$\text{NSAD} = \frac{1}{2NM} \sum_j^N \sum_i^M \left(\left| \frac{x1_{j,i} - x2_{j,i}}{x1_{j,i}} \right| + \left| \frac{y1_{j,i} - y2_{j,i}}{y1_{j,i}} \right| \right),$$

где N, M — ширина и высота векторного поля; $x1, y1, x2, y2$ — компоненты векторов по соответствующим координатам. С помощью NSAD оценивается различие между векторными полями, построенными на соседних проходах. Если её величина меньше заданного порога, то корректировка векторов на текущем проходе прекращается.

Анализ параметра C предполагает наложение ограничения на повторение ранее использованных кандидатов. При этом формируется набор кандидатов с заданным максимальным значением C . Если выясняется, что вновь рассматриваемый кандидат ранее уже был задействован, то он отбрасывается, а параметр C уменьшается на единицу. Таким образом на каждом проходе формируется уникальный набор кандидатов, тем самым повышается вероятность более полного перебора вариантов перемещений. В результате параметр NSAD уменьшается быстрее, что повышает сходимость вычисления перемещений.

Итак, автоматический выбор параметров заключается в том, что количество кандидатов уменьшается на каждом проходе и по достижении некоторого порога точности построения векторного поля выполнение проходов прекращается.

1.2. Использование пирамид Гаусса. Проведено исследование возможности применения иерархического подхода (пирамид Гаусса) в рамках определения перемещений алгоритмом 3DRS. Предполагается за счёт иерархического рассмотрения снизить вычислительные затраты вследствие уменьшения количества вычислений меры подобия (числа кандидатов). Векторы перемещений, рассчитанные на верхних уровнях пирамиды, становятся исходными данными для формирования кандидатов обновления на нижних уровнях. Тогда количество возможных кандидатов обновления снижается и требуемый (пороговый) минимум NSAD достигается быстрее. Помимо этого пирамиды Гаусса должны способствовать повышению помехоустойчивости в случаях наличия высокочастотного шума.

Масштабирование (уменьшение в $2n$ раз относительно исходного изображения, $n = 1$) изображений проводили с сохранением размера сканирующего окна и шага сетки. Количество уровней пирамиды изображений ограничивалось размером получаемого векторного поля: минимальное число векторов по ширине или высоте не должно быть меньше 3.

Таким образом, алгоритм заключается в следующем (рис. 3). Задаётся пороговое значение th_{NSAD} минимума рассчитываемой NSAD для векторного поля на каждом проходе (2). Вычисляется количество уровней пирамиды p_{max} (3). Выбирается начальное значение уровня пирамиды p (4). Начальное изображение уменьшается до уровня p (5). Строится векторное поле на текущем уровне пирамиды (6). Рассчитывается NSAD для вычисленного векторного поля (7). Если величина NSAD больше th_{NSAD} , то происходит перерасчёт векторного поля, т. е. осуществляется проход в алгоритме 3DRS с применением автоматического выбора числа кандидатов (8). Повторяется построение векторного поля и NSAD до тех пор, пока NSAD не будет меньше заданного p . При выполнении данного условия происходит проверка (10): на всех ли уровнях пирамиды Гаусса было построено векторное поле. Если это не выполняется, то увеличиваем размер изображения и повторяем расчёты, иначе заканчиваем построение векторного поля.

2. Описание исследуемых изображений. Оценку помехоустойчивости построения векторов перемещений, а также вычислительных затрат вышеописанных алгоритмов проводили на модельных (рис. 4, *a, b*) и экспериментально полученных (рис. 4, *c, d*) изображе-

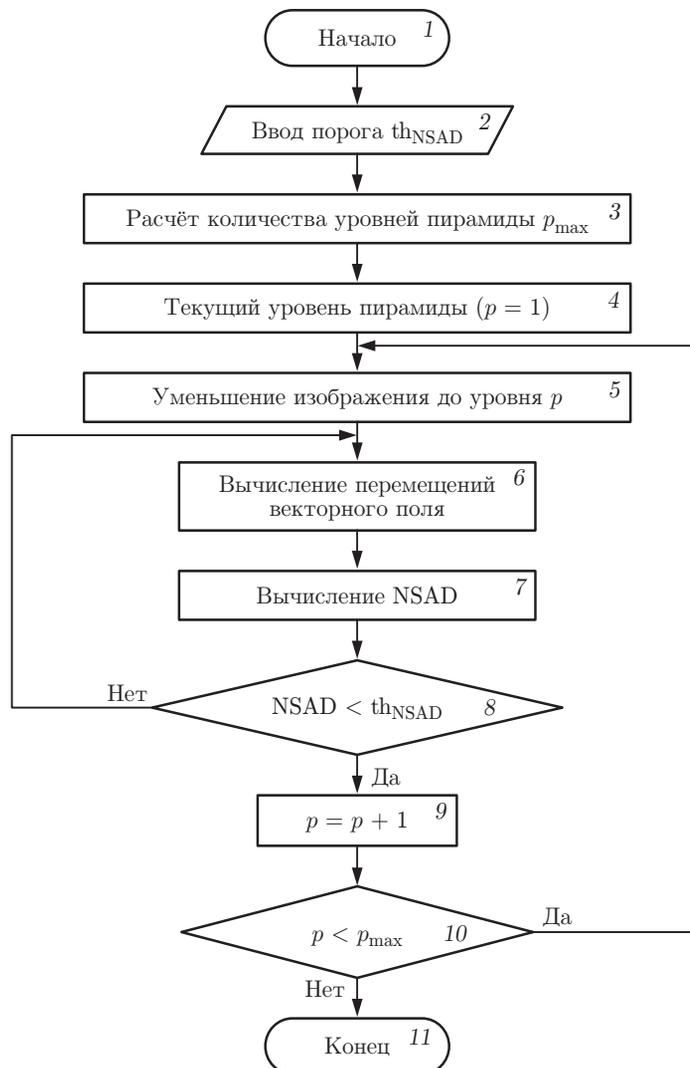


Рис. 3. Блок-схема разработанного алгоритма 3DRS с автоматическим выбором параметров и с применением иерархического подхода

ниях. Для оценки ошибки построения векторов перемещений на модельных изображениях использовали соответствующие модельные векторные поля.

2.1. *Серии модельных изображений. Формирование исходного изображения поверхности.* Стояла задача создания модельного изображения (см. рис. 4, а), внешне схожего с экспериментально получаемым при фотографировании образца (см. рис. 4, с). Для этого изображения подбирался фон, подобный тону поверхности экспериментального образца. Затем в «случайно» заданных (по нормальному закону распределения) участках генерировали окружности (имитирующие капли распыляемой краски) радиусом от 0 до 10 пикселей, уровень (градация серого) которых задавался случайным образом.

Одноосное растяжение. В целях моделирования изменений, происходящих при нагружении поверхности по схеме одноосного растяжения, задавали смещение каждой точки модельной поверхности. При этом яркость каждого пиксела изображения пересчитывается для заданного приращения деформации. Пересчёт производили с помощью B -сплайн-интерполирования. В результате из начального изображения получали серию изображений с заданным конечным приращением деформации и известным распределением векторов перемещений (см. рис. 4, б).

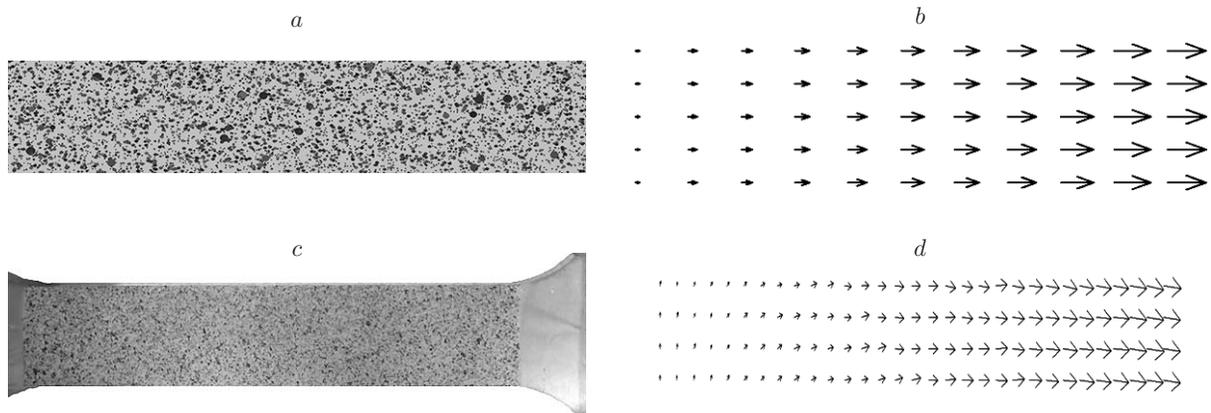


Рис. 4. Пояснение результатов тестирования алгоритма: модельное изображение (a) и соответствующее ему векторное поле (b) для случая одноосного растяжения; экспериментально полученное оптическое изображение поверхности образца (c) и его векторное поле (d)

Зашумление изображений. Была сформирована серия изображений с различным уровнем зашумления. Для этого генерировали два кадра с нулевым удлинением и с удлинением $\delta = 80$ пикселей для условий одноосного растяжения. Далее на каждое изображение накладывали гауссов шум с амплитудой σ_n в интервале от 1 до 36 % с шагом 1,5 %. В результате была сформирована серия зашумлённых изображений из 25 пар кадров.

2.2. *Серия экспериментальных оптических изображений* получена при растяжении образцов алюминиевого сплава А2024, на поверхности которого с помощью аэрозольных баллонов с чёрной и серой красками была сформирована спекл-картина (см. рис. 4, c, d). Регистрацию изображений проводили по методике, описанной в [15].

3. Методика тестирования алгоритмов. Быстродействие алгоритмов оценивали по удельному времени расчёта t одного вектора, т. е. по отношению полного времени построения векторного поля к количеству векторов в нём. Для проведения расчётов использовали ПК со следующими характеристиками: процессор AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 3600+ 1.90 GHz, объём оперативной памяти 2,00 Гб, операционная система Windows 7. Быстродействие алгоритмов исследовалось на описанных в разд. 2 сериях изображений. Для количественного сравнения помехоустойчивости определения перемещений с применением тестируемых алгоритмов вычисляли коэффициент корреляции полей расставленных векторных полей (1).

4. Результаты тестирования. Для исследования функционирования алгоритмов с учётом подбора параметров метода 3DRS и его сочетания с иерархическим подходом использовали следующие комбинации расчётов:

- без пирамид и настройки параметров (3DRS);
- с автоматическим выбором числа проходов (3DRS-AS);
- с автоматическим выбором числа кандидатов (3DRS-AC);
- с применением пирамид в качестве источника данных ещё об одном кандидате (3DRS-P);
- с использованием пирамид и с автоматическим выбором числа проходов и кандидатов (3DRS-P-AS-AC); подробности автоматического выбора параметров алгоритма описаны в разд. 1.

Исследования помехоустойчивости (рис. 5, b; рис. 6, a) и быстродействия (рис. 5, a, c; рис. 6, b) проведены на модельных и экспериментальных изображениях. В результате были установлены следующие характерные отличия (см. рис. 5, a, b) относительно базового алгоритма 3DRS (см. рис. 5, 6, кривые 1):

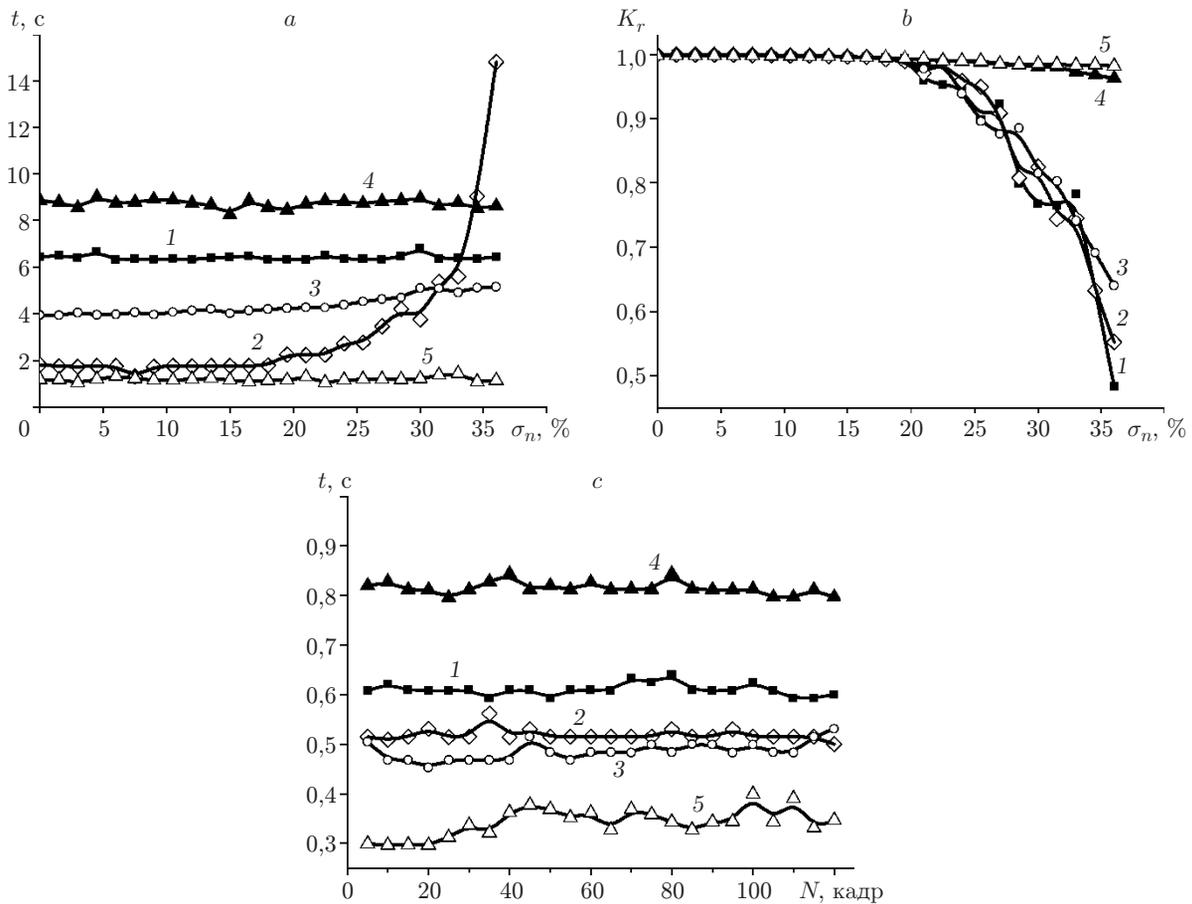


Рис. 5. Результаты тестирования алгоритмов: зависимости времени построения векторного поля (a, c) и коэффициента корреляции векторных полей (b) от амплитуды шума σ_n и степени деформации N для серии модельных (a, b) и экспериментальных изображений (c). Используемые алгоритмы: 3DRS (кривые 1), 3DRS-AS (2), 3DRS-AC (3), 3DRS-P (4), 3DRS-P-AS-AC (5)

1) при наложении шума с σ_n менее 20 % (см. рис. 5, b, кривая 2) использование 3DRS-AS снижает время вычислений в 3,6 раза при сохранении помехоустойчивости; дальнейшее возрастание вычислительных затрат обусловлено увеличением числа проходов, которые не сопровождаются повышением помехоустойчивости;

2) время расчёта при применении 3DRS-AC (см. рис. 5, a, кривая 3) не позволяет повысить скорость вычислений более чем в 1,6 раза при сохранении того же уровня помехоустойчивости;

3) применение 3DRS-P (см. рис. 5, a, кривая 4) повышает время вычислений в 1,5 раза, что связано с возрастающим числом расчётов при использовании пирамид без ограничения на число проходов; в то же время величина K_r не уменьшается ниже уровня 0,96 (см. рис. 5, b, кривая 4);

4) применение 3DRS-P-AS-AC (см. рис. 5, a, кривая 5) позволяет в 5,5 раза увеличить быстродействие, что сопровождается сохранением K_r на уровне не ниже 0,98 (см. рис. 5, b, кривая 5).

Аналогичные исследования, проведённые с использованием экспериментальных изображений, показали подобные временные результаты (см. рис. 5, c). При этом для всех алгоритмов ошибка (максимальное отклонение K_r от единицы) также не превышает $1 \cdot 10^{-2}$, что связано с отсутствием на экспериментальных изображениях значительных по уровню шумов и помех. По этой причине график K_r для данных изображений не приведён.

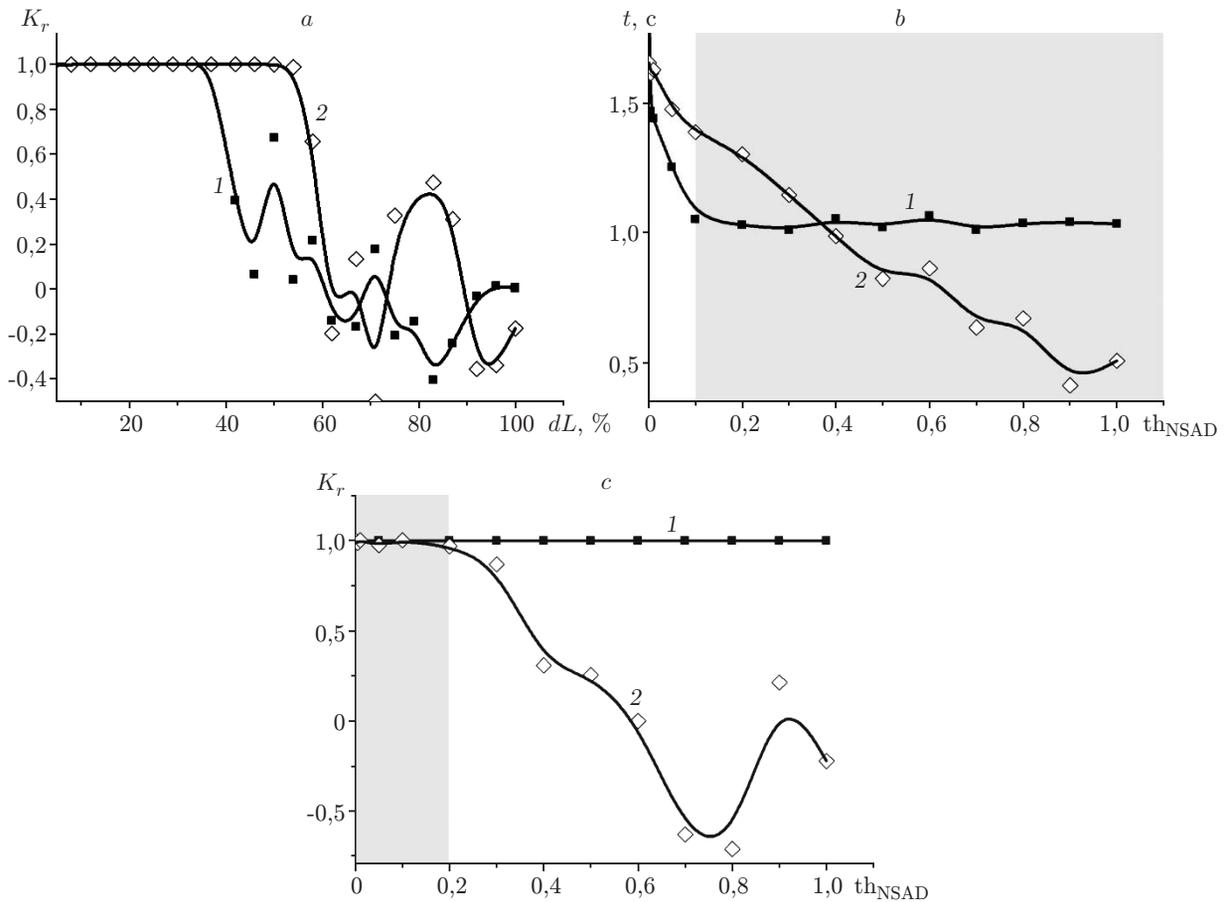


Рис. 6. Результаты тестирования алгоритмов: зависимости коэффициента корреляции векторных полей от степени деформации dL (a), времени построения векторного поля (b) и коэффициента корреляции векторных полей от величины параметра th_{NSAD} (c) для модельного изображения с $\sigma_n = 36\%$ (кривые 1 — 3DRS, 2 — 3DRS-P-AS-AC)

Помимо помехоустойчивости существенным лимитирующим фактором оптического метода оценки деформации является величина её приращения (в частности, удлинение) между двумя соседними кадрами (например, параметр dL при растяжении образца) при обеспечении приемлемой помехоустойчивости оценки перемещений. Влияние данного параметра было исследовано (см. рис. 6, a) для базового 3DRS, а также 3DRS-P-AS-AC как наилучшего способа, выявленного в ходе предварительных исследований. Видно, что за счёт применения алгоритма 3DRS-P-AS-AC диапазон удлинения, при котором уверенно строятся векторы перемещений, увеличился в 1,5 раза (с 40 до 60 %).

Далее было выяснено, каким образом величина задаваемого параметра th_{NSAD} влияет на помехоустойчивость и быстродействие. Для этого были рассчитаны зависимости времени построения векторного поля t и K_r от th_{NSAD} (см. рис. 6, b, c) для пар модельных изображений с наложенным шумом ($\sigma_n = 36\%$) при $dL = 4\%$ и $dL = 46\%$. Полученные результаты показывают, что вычислительные затраты при увеличении th_{NSAD} снижаются в 1,8 раза (см. рис. 6, b, кривая 1) для малых смещений ($dL = 4\%$) при $NSAD \geq 0,1$ и в 3,2 раза для больших смещений ($dL = 46\%$) при $th_{NSAD} = 1$ (см. рис. 6, b, кривая 2). Причём при величине th_{NSAD} более чем 0,1 дальнейшее уменьшение вычислительных затрат не происходит (при малых величинах смещений). Помехоустойчивость (максимальное отклонение K_r от единицы) в этом случае не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ во всём диапазоне th_{NSAD} для малых смещений и начинает значительно уменьшаться при $th_{NSAD} > 0,1-0,2$ для больших

смещений. Таким образом, автоматическое определение числа проходов способствует как сокращению вычислительных затрат, так и повышению помехоустойчивости. На основании этих данных рекомендуется для проведения подобного типа вычислений использовать диапазон изменения данного параметра $0,1 \leq th_{NSAD} \leq 0,2$.

Заключение. В отличие от существующих подходов к реализации алгоритма 3DRS, в которых параметры алгоритма задаются фиксированно, что не обеспечивает требуемой помехоустойчивости и быстродействия, предложен автоматический способ выбора параметров. На его основе разработан алгоритм построения полей векторов перемещений, включающий трёхмерный рекурсивный поиск и иерархический подход к анализу изображений. Исследованы помехоустойчивость и быстродействие алгоритма 3DRS при применении пирамид Гаусса для построения полей векторов перемещений с использованием автоматического выбора количества проходов и кандидатов обновления. Анализ модельных и экспериментальных изображений показывает, что по сравнению с классической реализацией алгоритма 3DRS с помощью подбора параметров его функционирования (количество проходов и кандидатов) время построения векторного поля может быть уменьшено до 5,5 раза при применении пирамид Гаусса.

Помимо повышения быстродействия описанный в данной работе подход даёт возможность повысить помехоустойчивость алгоритма 3DRS более чем в 2 раза, о чём свидетельствуют результаты расчёта коэффициента корреляции как функции уровня наложенных шумов. Кроме того, алгоритм позволяет надёжно оценивать перемещения при увеличении приращения деформации между кадрами до 1,5 раза.

Установлено пороговое значение коэффициента $th_{NSAD} = 0,2$, превышение величины которого приводит к уменьшению помехоустойчивости, но в то же время позволяет снизить вычислительные затраты. Показано, что по совокупности требований обеспечения быстродействия и увеличения помехоустойчивости величина th_{NSAD} должна находиться в диапазоне $0,1 \leq th_{NSAD} \leq 0,2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Xu L., Jia J., Matsushita Y.** Motion detail preserving optical flow estimation // PAMI. 2012. **34**, N 9. P. 1744–1757.
2. **Sun D., Sudderth E., Black M. J.** Layered segmentation and optical flow estimation over time // Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, USA, June 2012. P. 1768–1775.
3. **Гришин С. В., Ватолин Д. С., Лукин А. С. и др.** Обзор блочных методов оценки движения в цифровых видеосигналах // Программные системы и инструменты. 2008. № 9. С. 50–62.
4. **Adelson E. H., Anderson C. H., Bergen J. R. et al.** Pyramid methods in image processing // RCA Eng. 1984. **29**, N 6. P. 33–41.
5. **Lopes F., Ghanbari M.** Hierarchical motion estimation with spatial transforms // IEEE Intern. Conf. on Image Processing. Vancouver, Canada, 2000. Vol. 2. P. 558–561.
6. **Ahn T. G., Moon Y. H., Kim J. H.** Fast full-search motion estimation based on multilevel successive elimination algorithm // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. 2004. **14**, N 11. P. 1265–1269.
7. **Rosenfeld A.** Some uses of pyramids in image processing and segmentation // Proc. DARPA Image Understanding Workshop. Univ. Maryland, College Park, Apr. 1980. P. 112–120.
8. **De Haan G., Biezen P. W. A. C., Huijgen H., Ojo O. A.** True-motion estimation with 3-D recursive search block-matching // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. 1993. **3**, N 5. P. 368–379.

9. **Braspenning R. A., de Haan G.** True-motion estimation using feature correspondence // Proc. SPIE. 2004. **5308**. P. 396–407.
10. **Панин С. В., Титков В. В., Любутин П. С.** Снижение вычислительных затрат с применением алгоритма трёхмерного рекурсивного поиска при построении векторов перемещений в оптическом методе оценки деформации // Вычислительные технологии. 2013. **18**, № 5. С. 91–101.
11. **Heinrich A., Bartels C., van der Vleuten R. J. et al.** Optimization of hierarchical 3DRS motion estimators for picture rate conversion // Journ. Sel. Topics Signal Process. 2011. **5**, N 2. P. 262–274.
12. **Giachetti A.** Matching techniques to compute image motion // Image and Vision Comput. 2000. **18**, N 3. P. 247–260.
13. **Панин С. В., Сырямкин В. И., Любутин П. С.** Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности // Автометрия. 2005. **41**, № 2. С. 44–58.
14. **Воскобойников Ю. Е., Белявцев В. Г.** Нелинейные алгоритмы фильтрации векторных сигналов // Автометрия. 1999. № 5. С. 97–105.
15. **Панин С. В., Алтухов Ю. А., Любутин П. С. и др.** Влияние билатеральной фильтрации на фрактальную оценку оптических изображений поверхности нагруженных материалов // Автометрия. 2013. **49**, № 3. С. 25–35.

Поступила в редакцию 31 марта 2014 г.
