

Алгоритм одномерного структурно-аппроксимационного анализа изображений ячеистых поверхностей в задаче входного метрологического контроля промышленных изделий

М.М. Гавриков, Р.М. Синецкий

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова*

Аннотация: В работе представлено решение задачи фотографического входного метрологического контроля промышленных изделий на основе метода структурно-аппроксимационного синтеза и анализа одномерных структурных образов. Изложены математические модели структурных образов, алгоритмы их синтеза, анализа и интерпретации результатов обработки. Приводятся результаты экспериментальной апробации предложенных алгоритмов, позволяющие оценить их вычислительную эффективность и надежность процедуры метрологического контроля.

Ключевые слова: метрологический контроль, обработка изображений, распознавание образов, структурно-аппроксимационный метод, динамическое программирование.

Введение

Многие крупногабаритные корпуса и несущие оболочечные конструкции изделий различного назначения имеют поверхности с ячеистой структурой. Изготовление изделий с ячеистой поверхностью позволяет уменьшить их вес при сохранении прочностных характеристик. Особую роль в общем техпроцессе изготовления подобных изделий приобретает этап метрологического контроля (МК), к которому предъявляются повышенные требования по показателям точности и достоверности результатов контроля. Одним из возможных перспективных вариантов автоматизированного МК является технология, состоящая из двух стадий: стадии предварительного входного контроля и стадии трехмерного контроля (3D-контроля). На первой стадии выполняется предварительный контроль, позволяющий выявить узлы с существенными дефектами поверхности. Эти узлы не должны попадать на вторую стадию и снимаются с технологического процесса. Если же первая стадия успешно пройдена, то на второй стадии выполняется полный 3D-контроль поверхности с применением триангуляционных дальномеров

(лазерных сканеров) и соответствующего программного обеспечения (ПО) для обработки результатов сканирования [1].

В работе [2] были представлены результаты апробации версии ПО системы метрологического 3D-контроля, разработанной авторами. Апробация показала, что 3D-контроль изделий с большими площадями поверхностей представляет достаточно трудоемкую и дорогостоящую процедуру, поэтому эффективность технологии МК в целом в значительной степени зависит от эффективности реализации стадии входного контроля. К существенным дефектам, которые необходимо выявить на этой стадии, можно отнести структурные дефекты ячеистой поверхности (отсутствие ячеек в отдельных местах, наличие лишних ячеек) и визуально заметные нарушения геометрии отдельных ячеек.

Для реализации входного МК предлагается использовать обработку растровых изображений поверхностей, получаемых при помощи нескольких фотокамер, устанавливаемых в рабочей зоне изготавливаемого узла или на конвейере.

В упомянутом ПО 3D-контроля были реализованы алгоритмы, использующие метод структурной аппроксимации одномерных образов объектов с регулярной структурой [3, 4], которые показали достаточно высокую эффективность. В настоящей работе предлагается модифицированная версия структурно-аппроксимационной схемы (СА-схемы), применимая к задаче анализа растровых изображений ячеистых поверхностей, представляемых множеством одномерных образов. Определив при помощи СА-схемы требуемые параметры каждого из одномерных образов, можно составить общее описание структуры всего изображения и определить параметры его элементов.

Целью настоящей работы является разработка СА-алгоритмов одномерного анализа изображений промышленных изделий с ячеистой

структурой поверхностей, предназначенных для реализации стадии входного МК этих изделий, и оценке их эффективности.

Содержательная характеристика одномерной схемы анализа изображения

Поясним задачу и схему одномерного анализа изображения на примере фрагмента узла с ячеистой поверхностью, из которых может быть собран корпус изделия. На рис. 1 показано изображение поступающего на входной контроль узла, регистрируемое фотокамерой, а на рис. 2 чертеж проекции, на которой представлены только полностью видимые на изображении контуры основных элементов поверхности. Этих элементов достаточно для выявления грубых дефектов структуры и геометрии поверхности, поэтому частично видимые нижние контуры донышек ячеек игнорируются и не отражены в проекции.

Таким образом, для реализации входного фотографического контроля предлагается выполнять пространственную идентификацию и вычислять размеры контуров, показанных на рис. 2. Разумеется, речь идет о размерах, вычисляемых в относительных единицах и с учетом погрешностей, обусловленных несовпадением значений оптических параметров ориентации объектива по отношению к разным участкам поверхности.

На проекции показаны также по две горизонтальные и вертикальные линии двух типов: сложных, помеченных как (а), и простых, помеченных как (б). Сложные линии – это линии, которые в показанной проекции пересекают контуры ячеек, а простые их не пересекают. На линиях сложного типа римскими цифрами помечены краевые точки, точки пересечения с границами гладких зон и верхними контурами ячеек. Эти точки будем называть *существенными*, а соответствующие им пиксели на изображении – *существенными пикселями*.



Рис. 1. – Тестовое изделие

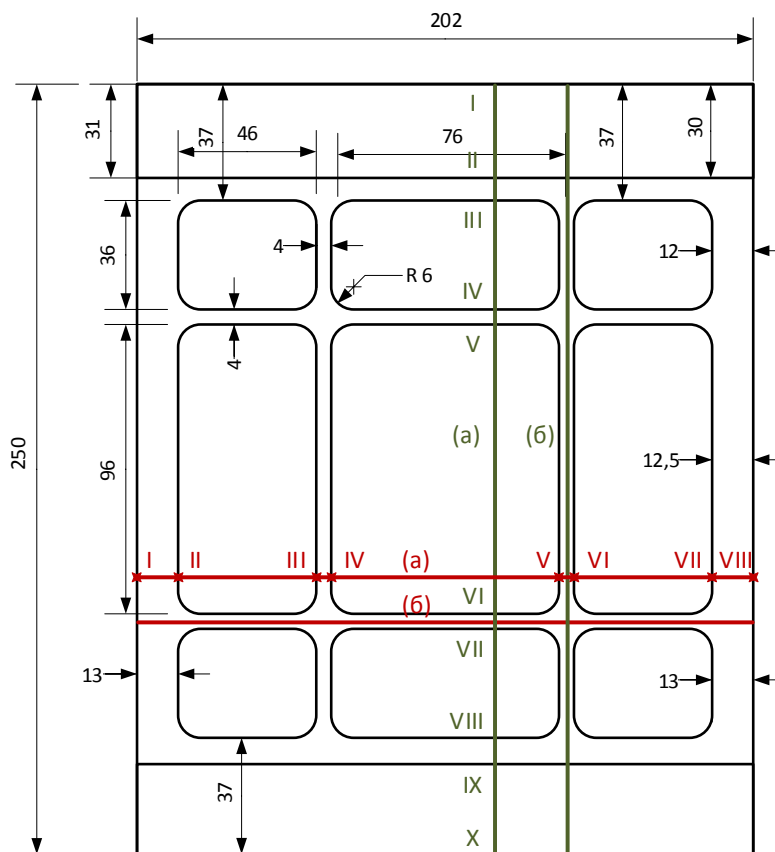


Рис. 2. – Чертеж проекции изделия

Если построить множество всех возможных горизонтальных и вертикальных линий и выделить существенные пиксели, то полученное множество пикселей будет представлять контуры всех элементов изображения, подлежащих пространственной идентификации. Располагая этими данными, можно в относительных единицах и с определенной погрешностью определить геометрические параметры этих элементов и выявить дефекты, если таковые имеют место.

Основываясь на этих соображениях, в качестве исходных одномерных образов дискретного изображения $f(x, y)$ размерностью $N \times M$:

$$f(x, y), x \in \vec{I} = \{1, \dots, N\}, y \in \vec{J} = \{1, \dots, M\}$$

естественно рассматривать «строковые» и «столбцовые» сигналы.

Строковый сигнал – это одномерная функция $f(x) = f(x, y^*)$ с фиксированной координатой y^* , а столбцовый сигнал – это одномерная функция $f(y) = f(x^*, y)$ с фиксированной координатой x^* . Предполагается, что система позиционирования обеспечивает ориентацию изображения, при которой с допустимой погрешностью можно считать, что строковые и столбцовые сигналы в плоскости изображения соответствуют горизонтальным и вертикальным линиям. Сигналы, представляющие в изображении линии простого и сложного типа, будем называть сигналами простого и сложного типа.

Обработка изображения включает выполнение следующих этапов:

- перевод заданных в документации значений геометрических параметров элементов ячеистой поверхности в относительные единицы и последующий перевод относительных значений в значения индексов и количество пикселей изображения;
- последовательная обработка всех строковых сигналов изображения, в результате которой выделяются существенные пиксели,

- соответствующие левым и правым сторонам контуров ячеек на изображении;
- последовательная обработка всех столбцовых сигналов, в результате которой выделяются существенные пиксели, соответствующие верхним и нижним сторонам контуров ячеек на изображении;
 - аппроксимация координат существенных пикселей, выделенных на втором и третьем этапах, прямоугольниками, аппроксимирующими в изображении контуры ячеек и гладких зон;
 - анализ и интерпретация полученных данных, в результате которых формируется признак допуска или отбраковки изделия.

Схема структурной аппроксимации

Ключевыми этапами в общей схеме анализа, от которых зависит достоверность результатов выделения контуров элементов изображения, являются второй и третий этапы. Алгоритмически каждый из этих этапов реализуется при помощи упомянутой СА-схемы синтеза одномерных структурных образов строковых и столбцовых сигналов простого и сложного типа. СА-схема оперирует с тремя типами структурных образов [5, 6]: *идеальными* s , *деформированными* \tilde{s} и *аппроксимационными* \hat{s} *структурными образами* [4].

Элементы произвольного структурного образа определяются как отрезки сигнала $f^T(x) = [f(x, y^*), x \in T]$, определенные на подмножествах $T \subset \vec{I}$ при фиксированных значениях y^* (или как $f^T(y) = f(x^*, y)$, $T \subset \vec{J}$ при фиксированных значениях x^*). Идеальный структурный образ строкового/столбцового сигнала, как и само изображение, является гипотетическим и может не строиться в явной форме. Предполагается, что его элементами являются отрезки сигнала, совпадающие на границах с существенными пикселями, в которых на изображении имеет место резкий перепад значений

яркости, а внутри этих отрезков не содержится других пикселей, имеющих сходные свойства с существенными (т. е. существенные пиксели хорошо различимы среди других). Описание идеального образа задается в форме набора параметров его элементов:

- образ $c = (g_1, g_2, \dots, g_m)$ имеет заданную мощность m ;
- элемент $g_i \equiv f^{T_i}(x)$, $T_i = [\underline{x}(i), \bar{x}(i)] \subset \vec{I}$ характеризуется заданной пространственной длиной $d_i = \bar{x}(i) - \underline{x}(i)$ интервала T_i , задаваемой в относительных единицах или в количестве пикселей на соответствующем отрезке сигнала);
- элемент g_i характеризуется пространственной координатой начала отрезка сигнала $f^{T_i}(x)$, задаваемой в относительных единицах или значением индекса $\underline{x}(i) \in \vec{I}$ – начального пикселя.

Деформированный образ $\tilde{c} = (\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \dots, \tilde{g}_n)$ строится путем обработки реального изображения $f(x, y)$ при помощи алгоритма, который разбивает строковые $f(x)$ и столбцовые $f(y)$ сигналы на отрезки, стыкующиеся в пикселях, которые удовлетворяют признакам существенных пикселей. Алгоритм выполняет следующие действия (для определенности будем использовать обозначение сигнала $f(x)$):

1) Для сигнала $f(x)$ вычисляется функция $R(x)$ – модуля первых разностей

$$R(x) = |f(x + 1) - f(x)|.$$

2) Используя $R(x)$, определяются индексы существенных пикселей t , ($t \in \vec{I}$), в которых выполняется признак:

$$\langle R(t) - \text{экстремум} \rangle \wedge \langle R(t) > P \rangle,$$

где P – пороговое значение, вычисляемое на этапе автоматической настройки алгоритма.

3) Строится деформированный образ $\tilde{c} = (\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \dots, \tilde{g}_n)$, элементы которого $\tilde{g}_k \equiv f^{\tilde{T}_k}(x)$, $x \in \tilde{T}_k = [\underline{x}(k), \bar{x}(k)] \subset \tilde{I}$ представляют отрезки сигнала с краевыми существенными пикселями, найденными на предыдущем шаге. Эти элементы характеризуются дескрипторами:

$$[\tilde{g}_k] = [\underline{x}(k), \bar{x}(k), \tilde{s}_k], \quad \tilde{s}_k = \max_{\underline{x}(k) \leq x < \bar{x}(k)} \{R(x)\}.$$

Качественное различие между идеальными и деформированными образами иллюстрируют рис. 3 и 4. На рис. 3 показан один из строковых сигналов $f(x)$ сложного типа (как функция яркости от индекса пикселя в строке), а на рис. 4 – соответствующая функция $R(x)$. Среди ее экстремумов красными точками отмечены те, которые соответствуют существенным пикселям. У идеального образа не должно быть других существенных пикселей, а значит и экстремумов, сравнимых по амплитуде с указанными на рис. 4.

Однако, как видно из рис. 4, в реальном изображении всегда присутствует множество других пикселей, в которых амплитуды экстремумов функции $R(x)$ сравнимы с амплитудами экстремумов в существенных пикселях. Будем называть эти пиксели ложно-существенными. Наличие ложно-существенных пикселей приводит к тому, что деформированные образы имеют большее число элементов, чем идеальные. Поэтому при синтезе аппроксимационного образа предполагается обязательное выполнение условия:

$$m \leq n. \tag{1}$$

Алгоритм синтеза аппроксимационного образа

В соответствии с общей концепцией СА-схемы образ \hat{c} является результатом преобразования $P: (c, \tilde{c}) \rightarrow \hat{c}$, а критерий $E = E(c, \tilde{c}, \hat{c})$ качества структурной аппроксимации зависит от характеристик всех трех образов и в общей форме определяется соотношением:

$$E(c, \tilde{c}, \hat{c}) = E(c, \hat{c}) + E(\tilde{c}, \hat{c}) \quad (2)$$

где $E(c, \hat{c})$, $E(\tilde{c}, \hat{c})$ – меры расхождения между соответствующими образами.

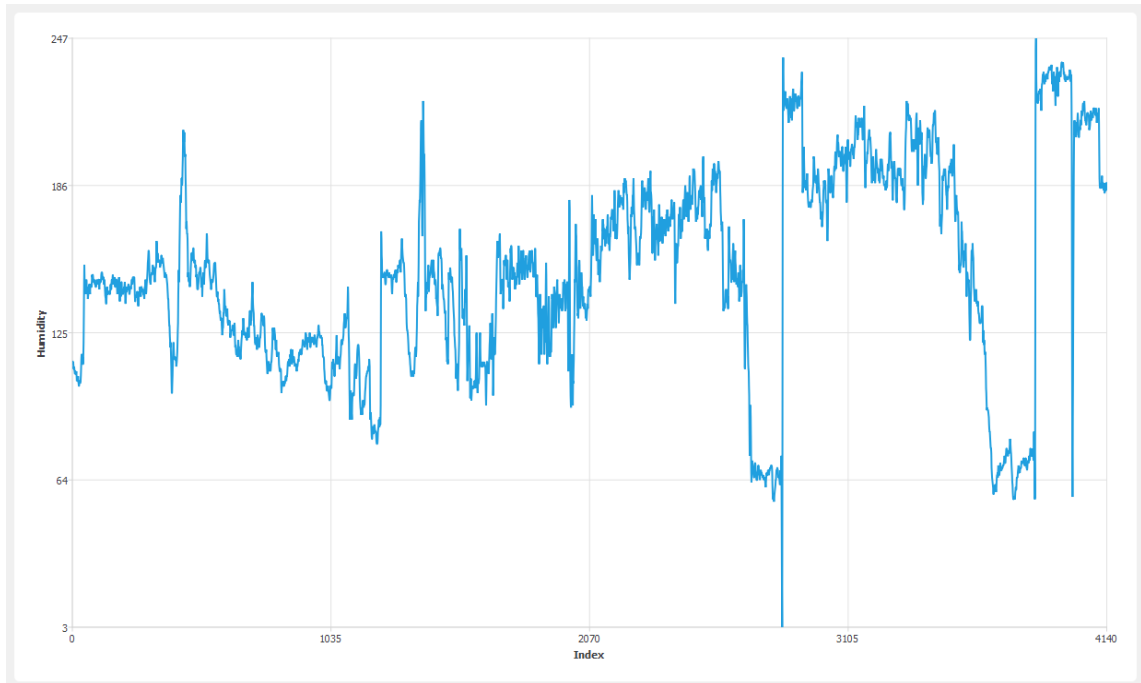


Рис. 3. – Строковый сигнал $f(x)$

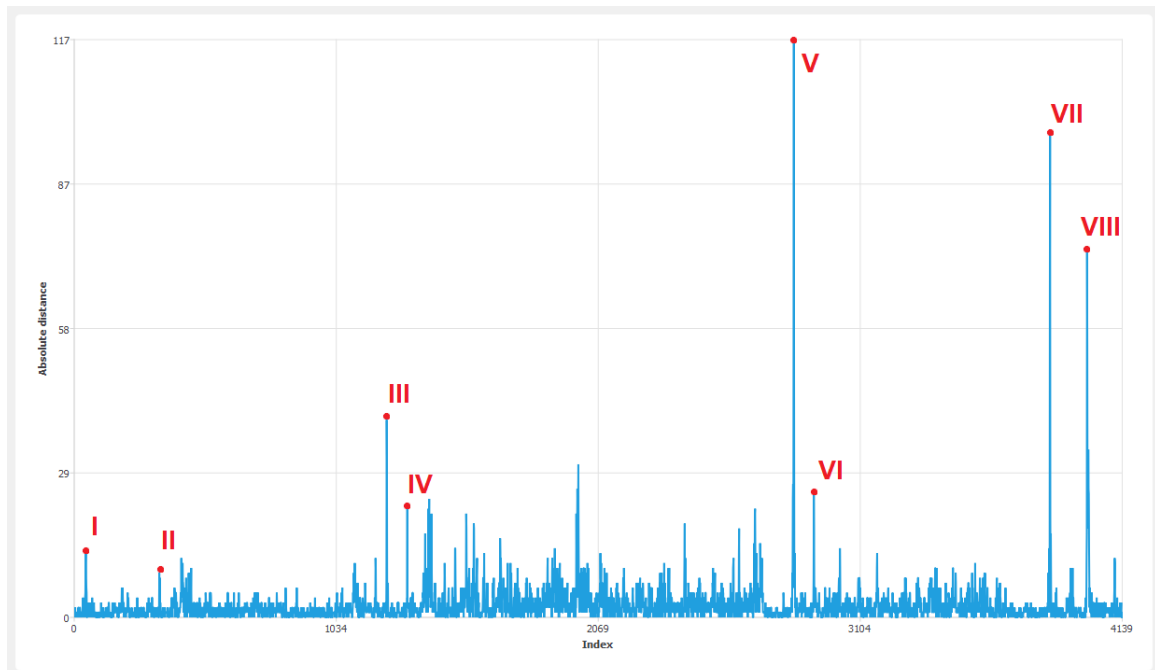


Рис. 4. – Функция $R(x)$

Условия структурной и параметрической согласованности (СПС) [4] образов c и \hat{c} выражаются следующими ограничениями:

- 1) Образы c и \hat{c} имеют равное количество элементов:

$$\text{мощность}(c) = \text{мощность}(\hat{c}) = m. \quad (3)$$

- 2) Расхождения в длинах d_i и \hat{d}_i элементов g_i и \hat{g}_i не должны превышать заданной величины Δ_1 :

$$\hat{d}_i \in [d_i - \Delta_1, d_i + \Delta_1], i = 1, \dots, m. \quad (4)$$

- 3) Расхождения в пространственных координатах элементов g_i и \hat{g}_i не должны превышать заданной величины Δ_2 :

$$\hat{x}_i \in [x_i - \Delta_2, x_i + \Delta_2]. \quad (5)$$

Согласно (3) и (4), меру расхождения $E(c, \hat{c})$ из (2) можно задать в форме суммы штрафов U , накладываемых на элементы \hat{g}_i :

$$E(c, \hat{c}) = \sum_{i=1}^m (\lambda_i + \beta_i) U, \quad (6)$$
$$\lambda_i = \begin{cases} 0, & \text{если выполняется (4),} \\ 1, & \text{иначе,} \end{cases}$$
$$\beta_i = \begin{cases} 0, & \text{если выполняется (5),} \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Так как, согласно (1), деформированный образ \tilde{c} имеет большее число элементов, чем аппроксимационный образ \hat{c} , то построение последнего выполняется путем операции Θ – *поглощения* (слияния) некоторых подобразов (последовательностей элементов) деформированного образа в образующие $g^* = \hat{g}_i$ аппроксимационного образа:

$$\Theta: (\tilde{g}_l, \tilde{g}_{l+1}, \dots, \tilde{g}_f) \rightarrow g^*, i \in \{1, \dots, m\}, l, f \in \{1, \dots, n\}, l \leq f.$$

Каждое поглощение характеризуется *штрафом поглощения*, определяемым как:

$$\mu_i(l, f) = \max_{l \leq j \leq f} \{\tilde{s}_j\}.$$

Таким образом в конструктивной форме критерий качества структурной аппроксимации принимает вид:

$$E(c, \tilde{c}, \hat{c}) = \sum_{i=1}^m [(\lambda_i + \beta_i)U + \min_{l,f} \{\mu_i(l, f)\}], i \in \{1, \dots, m\}, l, f \in \{1, \dots, n\}, l \leq f$$

Задачу синтеза оптимального аппроксимационного образа \hat{c}^ можно сформулировать следующим образом: для заданных идеального c и деформированного \tilde{c} образов, имеющих составы $c = (g_1, g_2, \dots, g_m)$ и $\tilde{c} = (\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \dots, \tilde{g}_n)$, $n \geq m$, требуется построить образ $\hat{c}^* = (\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_m)$, доставляющий минимум функционалу:*

$$\Omega(\hat{c}^*) = \min_{\hat{c} \in \hat{C}} \left\{ \sum_{i=1}^m (\lambda_i + \beta_i)U + \min_{l,f} \{\mu_i(l, f)\} \right\},$$
$$i \in \{1, \dots, m\}, l, f \in \{1, \dots, n\}, l \leq f. \quad (7)$$

Граничные пиксели (с индексами \hat{x}_i и $\bar{\hat{x}}_i$) отрезков сигнала, соответствующих элементам $\hat{g}_i \equiv f^{\hat{T}i}(x)$ получаемого аппроксимационного образа \hat{c} , будут представлять искомые существенные пиксели.

Задача (7) эффективно решается с применением метода динамического программирования [7]. При реализации метода в рассматриваемом приложении мы модифицировали применяемую в предшествующих работах традиционную схему вычислений. Причины и содержательный смысл модификации состоят в следующем. Так как аппроксимационный образ синтезируется из деформированного, качественный результат синтеза во многом зависит от состава и характеристик ложно-существенных пикселей, координаты которых содержатся в описании деформированного образа. Среди ложно-существенных всегда присутствуют пиксели, расположенные на частично регистрируемых в изображении боковых стенках и нижних контурах донышек ячеек (см. рис. 1), которые не входят в состав идентифицируемых элементов, но наличие которых может ухудшать качество идентификации существенных пикселей, расположенных на верхних контурах. Для улучшения качества идентификации при построении

отрезков сигнала $\hat{g}_i \equiv f^{\hat{T}_i}(x)$, расположенных между существенными пикселями верхних контуров, можно игнорировать все ложно-существенные пиксели, содержащиеся внутри интервалов \hat{T}_i , значения индексов которых (индексы интервалов) известны и определяются структурой ячеистой поверхности. В формальном смысле это означает, что для элементов с указанными значениями индексов i в критерии (7) следует оставить только первые два слагаемых, связанных с ограничениями (4) и (5), а штраф $\mu_i(l, f)$ положить равным нулю. Тогда уравнения синтеза (уравнения Беллмана) приобретают вид уравнений с переменными критериями для разных шагов алгоритма динамического программирования:

$$\begin{aligned} W_l^i &= \min_{\gamma=l, \dots, n-i-1} \{ \max \{ \mu(l, \gamma) + (\lambda_{m-i+1} + \beta_{m-i+1})U \}, W_{\gamma+1}^{i-1} \}, \\ w_l^i &= \operatorname{argmin}_{\gamma=l, \dots, n-i-1} \{ \max \{ \mu(l, \gamma) + (\lambda_{m-i+1} + \beta_{m-i+1})U \}, W_{\gamma+1}^{i-1} \}, \\ i &= 1, 3, 5, \dots, m_1, \quad m_1 = m - 1, \text{ если } m - \text{четно, иначе } m_1 = m; \quad (8) \\ W_l^i &= \min_{\gamma=l, \dots, n-i-1} \{ \max \{ (\lambda_{m-i+1} + \beta_{m-i+1})U \}, W_{\gamma+1}^{i-1} \}, \\ w_l^i &= \operatorname{argmin}_{\gamma=l, \dots, n-i-1} \{ \max \{ (\lambda_{m-i+1} + \beta_{m-i+1})U \}, W_{\gamma+1}^{i-1} \}, \\ i &= 2, 4, 6, \dots, m_2, \quad m_2 = m - 1, \text{ если } m - \text{нечетно, иначе } m_2 = m. \end{aligned}$$

Индексы искоемых существенных пикселей определяет функция переходов w_l^i , полученная после последнего m -го шага.

Изложенная схема решает задачу синтеза оптимального структурно-аппроксимационного образа \hat{c}^* для сигнала одного конкретного типа, характеризуемого идеальным образом c . Так как изображение ячеистой поверхности представлено двумя типами сигналов (простыми и сложными), характеризуемых идеальными образами c_1, c_2 , СА-схема дополняется функцией распознавания. Для каждого сигнала $f(x)$, представляемого деформированным образом \tilde{c} , процедура синтеза выполняется дважды:

$$\begin{aligned} P: (c_1, \tilde{c}) &\rightarrow \hat{c}_1^*, \\ P: (c_2, \tilde{c}) &\rightarrow \hat{c}_2^*. \end{aligned}$$

Полученные в результате аппроксимационные образы \hat{c}_1^* и \hat{c}_2^* характеризуются соответствующими значениями критерия $E(c_1, \tilde{c}, \hat{c}_1^*)$ и $E(c_2, \tilde{c}, \hat{c}_2^*)$. Индекс класса распознаваемого образа определяется как [8]:

$$K = \operatorname{argmin}_{i=1,2} \{E(c_i, \tilde{c}, \hat{c}_i^*)\}. \quad (9)$$

Значение этого индекса идентифицирует тип строкового (столбцового) сигнала, структуру которого представляет аппроксимационный образ (\hat{c}_1^* или \hat{c}_2^*) и используется в заключительной процедуре анализа изображения – интерпретации результатов, рассматриваемой ниже.

Интерпретация результатов структурной аппроксимации изображения

Приведенная выше процедура синтеза применяется для всех строковых и всех столбцовых сигналов изображения. В результате формируется два соответствующих множества: $\{\hat{z}_i\}$, $i \in \vec{I} = \{1, \dots, N\}$ – структурно-аппроксимационных образов строковых сигналов; $\{\hat{v}_j\}$, $j \in \vec{J} = \{1, \dots, M\}$ – структурно-аппроксимационных образов столбцовых сигналов. Составы образов (множества элементов, из которых они состоят) будем обозначать как $s(\hat{z}_i)$ и $s(\hat{v}_j)$ соответственно.

Задача интерпретации заключается в построении соответствия типа $\varphi(t, l) = k$ между индексами t элементов образов $\hat{g}_t^l \in s(\hat{z}_l)$, $\hat{z}_l \in \{\hat{z}_i\}$ – строковых (или $\hat{g}_t^l \in s(\hat{v}_l)$, $\hat{v}_l \in \{\hat{v}_j\}$ – столбцовых) сигналов с индексами l и номерами ячеек k , области которых на изображении образуют эти элементы \hat{g}_t^l . Ячейки на изображении нумеруются от 1 до K (K – количество ячеек) в порядке следования слева направо, сверху вниз. Диапазоны значений индексов l для строковых сигналов, формирующих -ю ячейку, определяются из описания параметров идеальных образов столбцовых сигналов, приведенных выше (значениями индексов: $\underline{x}(t)$ – начального и $\bar{x}(t)$ – конечного пикселя отрезка). Аналогично, диапазоны значений индексов l для

столбцовых сигналов определяются из описания параметров идеальных образов строковых сигналов.

Так как изображения ячеек образуются сигналами сложного типа, то найденные соответствия и последующее определение пространственных координат ячеек будут корректными только в том случае, если для большинства (или значительной доли) этих сигналов процедура распознавания типа сигнала (9) выдаст правильный результат, т. е. найденное значение индекса K идентифицирует сигнал сложного типа. В алгоритме интерпретации предполагается, что ячейка идентифицирована верно, если не менее wL сигналов распознаны как сложные (L – количество сигналов, формирующих изображение ячейки, $0 < w \leq 1$ – эмпирический параметр).

Алгоритм использует два множества: V, H – индексов элементов эталонных образов столбцовых и строковых сигналов, которым в изображении соответствуют области ячеек. Размерности этих множеств определяются количествами ячеек в изделии по вертикали и по горизонтали.

На каждом шаге алгоритма идентифицируется одна ячейка, для чего определяется два множества G_z и G_v элементов образов строковых и столбцовых сигналов соответственно, которые образуют область ячейки с индексом m .

Пространственные координаты изображения идентифицированной ячейки определяются путем усреднения координат граничных пикселей элементов, входящих в множества G_z (для левой и правой координат x) и G_v (для верхней и нижней координат y).

На выходе алгоритма формируется множество C – кортежей, определяющих положение идентифицированной прямоугольной ячейки на изображении:

$$C = \{(x_0^l, y_0^l, x_1^l, y_1^l)\},$$

где $(x_0^l, y_0^l), (x_1^l, y_1^l)$ – координаты левого верхнего и правого нижнего углов l -й ячейки соответственно, $l = 1, \dots, L, L$ – количество идентифицированных ячеек.

Алгоритм выполняет следующую последовательность действий:

Начало

$$C = \emptyset;$$

Для $\forall r \in V, \forall p \in H, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$ выполнить:

$$G_z = \{\hat{g}_i^p | \hat{g}_i^p \in s(\hat{z}_i), i = \underline{x}(\hat{g}_j^r), \dots, \bar{x}(\hat{g}_j^r), \hat{g}_j^r \in s(\hat{v}_j)\};$$

$$G_v = \{\hat{g}_j^r | \hat{g}_j^r \in s(\hat{v}_j), j = \underline{x}(\hat{g}_i^p), \dots, \bar{x}(\hat{g}_i^p), \hat{g}_i^p \in s(\hat{z}_i)\};$$

Если $|G_z| \geq w(\bar{x}(\hat{g}_i^r) - \underline{x}(\hat{g}_i^r))$ и $|G_v| \geq w(\bar{x}(\hat{g}_j^p) - \underline{x}(\hat{g}_j^p))$, выполнить:

$$x_0 = \frac{1}{|G_z|} \sum_{k=1 \dots |G_z|} \underline{x}(\hat{g}_k^p); x_1 = \frac{1}{|G_z|} \sum_{k=1 \dots |G_z|} \bar{x}(\hat{g}_k^p);$$

$$y_0 = \frac{1}{|G_v|} \sum_{k=1 \dots |G_v|} \underline{x}(\hat{g}_k^r); y_1 = \frac{1}{|G_v|} \sum_{k=1 \dots |G_v|} \bar{x}(\hat{g}_k^r);$$

$$C = C \cup \{(x_0, y_0, x_1, y_1)\};$$

Вернуть C ;

Конец.

Экспериментальное исследование алгоритмов

Для апробации алгоритмов использовался тестовый фрагмент ячеистой поверхности изделия из алюминиевого сплава, содержащий 9 ячеек. Его изображение показано на рис. 1, а размеры контролируемых областей – на рис. 2. На основе этих размеров были рассчитаны наборы параметров $(m, d_i, \underline{x}(i))$ идеальных образов строковых и столбцовых сигналов простого и сложного типов. После расчета эти параметры представляются целочисленными значениями, которые являются параметрами структурно-аппроксимационного алгоритма, реализующего анализ изображения. Фрагмент изделия считается удовлетворяющим требованиям входного фото контроля, если на нем идентифицированы все 9 ячеек, и отклонения

геометрических размеров контуров ячеек не превышают заданных пределов. В этом случае алгоритм формирует признак допуска, в противном случае алгоритм формирует признак отбраковки.

На рис. 5, а показано фотоизображение тестируемого фрагмента изделия, а на рис. 5, г – результат его обработки. Синим цветом поверх изображения отмечены выделенные существенные пиксели строковых сигналов, зеленым цветом – столбцовых сигналов. Красными прямоугольниками выделены границы найденных на изображении ячеек поверхности.

На рис. 5, б приведено модифицированное изображение тестового фрагмента, на котором отсутствует левая нижняя ячейка. Результат обработки такого изображения приведен на рис. 5, д. Отсутствие ячейки приводит к тому, что все другие ячейки, находящиеся в одной строке или столбце с отсутствующей, не идентифицируются. Количество найденных на данном фрагменте ячеек составляет 4, и соответственно, фрагмент отбраковывается.

На рис. 5, в показана другая модификация изображения. Помимо отсутствия левой нижней ячейки вторая ячейка в правом столбце заметно заужена и отклонение от заданных размеров, приведенных на рис. 2, превышает допустимое. На рис. 5, е приведен результат обработки данного изображения. Видно, что на данном фрагменте идентифицированы только 2 ячейки, и следовательно, данный фрагмент также отбраковывается.

Для оценки надежности и производительности представленных алгоритмов были произведены эксперименты над представленными тремя фрагментами, в ходе которых эти изображения подвергались дополнительным искусственным искажениям и зашумлению при помощи алгоритмов библиотеки OpenCV [9].

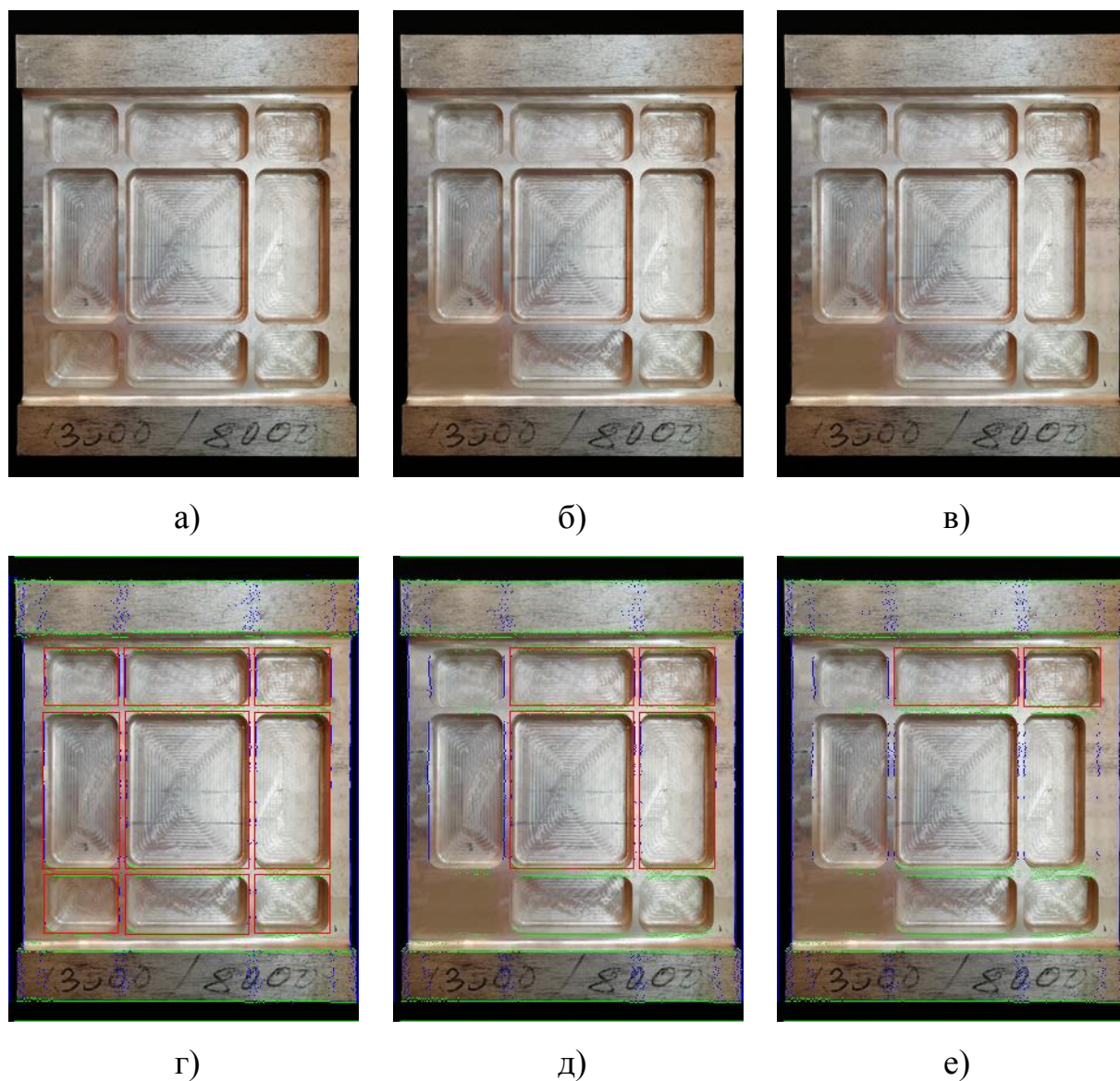


Рис. 5. – Апробация алгоритмов

По результатам проведенных экспериментов были определены характеристики надежности алгоритмов, в качестве которых использованы оценки вероятностей P_1 – ошибки первого рода (ложной отбраковки «хороших» изделий) и P_2 – ошибки второго рода (ложного допуска «плохих» изделий) [10]:

$$P_1 = 1 - K_{TA}, K_{TA} = n_x / N_x,$$

$$P_2 = 1 - K_{TR}, K_{TR} = n_{\Pi} / N_{\Pi},$$

где K_{TA} – оценка вероятности правильной идентификации «хороших» изделий, вычисляемая как отношение числа допусков n_x к общему числу N_x

обработанных изображений изделий, не содержащих грубых дефектов; K_{TR} – оценка вероятности правильной идентификации «плохих» изделий, вычисляемой как отношение количества отбраковок n_{Π} к общему числу N_{Π} обработанных изображений изделий, содержащих грубые дефекты.

Таблица № 1

Оценка надежности алгоритмов

Параметр	Значение для изображений различных размеров		
	2976×3968	744×992	298×397
K_{TA}	1,000	1,000	1,000
K_{TR}	0,983	0,991	0,993
P_1	0,000	0,000	0,000
P_2	0,017	0,009	0,007

Таблица № 2

Оценка вычислительной эффективности алгоритмов

Размер изображения, точек	Объем памяти, Мбайт	Среднее время обработки, мс
2976×3968	45	7 921
744×992	2,8	1320
298×397	0,5	495

Полученные значения характеристик надежности алгоритмов приведены в таблице № 1, а оценка вычислительной сложности алгоритмов – в таблице № 2.

Приведенные в таблицах результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Предложенные алгоритмы обладают высокими показателями надежности и производительности, достаточными для реализации эффективного входного МК.

2) С повышением разрешения изображения существенно возрастает время обработки изображения и заметно возрастает (хотя и не критично для реализации входного МК) вероятность ошибки второго рода.

Последнее объясняется тем, что при увеличении частоты дискретизации изображения увеличивается и содержание в нем шумов, что может приводить к увеличению числа ложно-существенных пикселей, выделяемых алгоритмом, и, как следствие, к дополнительным ошибкам идентификации. Напротив, понижение частоты дискретизации равносильно применению процедуры низкочастотной фильтрации, которая приводит к уменьшению числа ложно-существенных пикселей, выделяемых алгоритмом. Разумеется, следует использовать некоторое оптимальное разрешение, которое можно подобрать в натурном эксперименте в ходе выполнения операции МК.

Литература

1. Chopra P., “Study of Laser Triangulation Distance Sensors”, University of Houston, 2008, 274 p.
2. Gavrikov M., Sinetsky R., Knyazev D. Technology and software of system of the metrological analysis of cellular cylindrical surfaces of large-size products // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, IEEE. p. 4.
3. Гавриков М.М., Синецкий Р.М. Алгоритмическая и численная реализация структурно-аппроксимационного метода распознавания речевых образов. // Изв. вузов. Электромеханика. 2007. №2. с. 52-59.
4. Гавриков М.М. Структурная аппроксимация и распознавание одномерных временных образов. Концепция и применения. // Изв.вузов. Электромеханика. 2003. №6. с.52-60.
5. Grenander U. Lectures in Pattern Theory. Volume I. Springer. 1976. Berlin. 509 p.



6. Grenander U. Lectures in Pattern Theory. Volume II. Springer. 1978. Berlin. 616 p.
7. Bellman R.E., Dreyfus S.E. Applied Dynamic Programming. 1st Edition — Princeton University Press, 1966 — 388 p.
8. Fukunaga K. Introduction to Statistical Pattern Recognition. 2nd edition. — Academic Press. 1990. 592 p.
9. Culjak I., Abram D., Pribanic T., Dzapo H., Cifrek M. A brief introduction to OpenCV. 2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. 21-25 May 2012. ieeexplore.ieee.org/document/6240859
10. Christodoulides C., Christodoulides G.. Analysis and Presentation of Experimental Results. With Examples, Problems and Programs. — Springer. 2017. 526 p.

References

1. Chopra P., “Study of Laser Triangulation Distance Sensors”, University of Houston, 2008, 274 p.
 2. Gavrikov M., Sinetsky R., Knyazev D. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, IEEE. p. 4.
 3. Gavrikov M.M., Sineczkij R.M. Izv. vuzov. Elektromehnika. 2007. №2. pp. 52-59.
 4. Gavrikov M.M. Izv. vuzov. Elektromehnika. 2003. №6. pp. 52-60.
 5. Grenander U. Lectures in Pattern Theory. Volume I. Springer. 1976. Berlin. 509 p.
 6. Grenander U. Lectures in Pattern Theory. Volume II. Springer. 1978. Berlin. 616 p.
 7. Bellman R.E., Dreyfus S.E. Applied Dynamic Programming. 1st Edition. Princeton University Press, 1966. 388 p.
-



8. Fukunaga K. Introduction to Statistical Pattern Recognition. 2nd edition. Academic Press. 1990. 592 p.
9. Culjak I., Abram D., Pribanic T., Dzapo H., Cifrek M. 2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO. 21-25 May 2012. ieeexplore.ieee.org/document/6240859
10. Christodoulides C., Christodoulides G. Analysis and Presentation of Experimental Results. With Examples, Problems and Programs. Springer. 2017. 526 p.