

СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

УДК 681.3

О. И. Битюцкий, Г. И. Громилин, В. А. Иванов, В. С. Киричук
(Новосибирск)

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЛЬЕФНОГО ШТРИХОВОГО КОДА
НА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Решена задача распознавания кода по координатам центров штрихов, нанесенных на поверхность цилиндрических изделий, с минимизацией вероятностей пропусков и ложных обнаружений.

Введение. В промышленности существует задача считывания маркировки, нанесенной в виде штрихов на поверхность металлических цилиндрических изделий. В отличие от общеизвестного штрихового кода с различной шириной полос рассматривается случай, когда информация о коде содержится в расстояниях между штрихами одинаковой ширины и глубины.

В данной работе не будем подробно описывать систему кодировки, а лишь приведем сведения, необходимые для дальнейшего изложения. Маркировка представляет собой алфавитно-цифровой код (состоящий из одного буквенного символа и семи цифр), который наносится на поверхность изделия. Структура штрихового кода маркировки состоит из девяти кадров, заключенных в двойные граничные штрихи (стробы). Внутри кадра интервал разделен на пять позиций, на которые могут быть нанесены два штриха, соответствующие цифрам (0—9). Буквы маркировки кодируются двумя кадрами цифр.

Считывание информации о расположении штрихов осуществляется фотодиодной линейкой (ФДЛ) с использованием триангуляционного метода [1] в процессе вращения изделия приводом. При равномерном вращении изделия через равные промежутки времени производится считывание строк данных с ФДЛ, и тем самым формируется изображение, содержащее информацию о штрихах. Результатом считывания является изображение форматом $r \times h$, где r — размер строки, h — количество строк. Фрагмент такого изображения (кадр) размером 64×200 точек (пиксел) приведен на рис. 1. На изображении можно выделить ряд областей: фон, яркую полосу, «провал» на этой полосе, «отскок» части полосы в области провала. Полоса может иметь значительные вариации яркости, а провалы или отскоки могут быть нечетко выражены или отсутствовать. Для более надежного считывания кода на изделие наносятся две одинаковые маркировки, что при считывании дает два независимых изображения.

Ставится задача распознавания цифрового кода по координатам центров штрихов, которым соответствуют провалы и отскоки на изображении, с возможно меньшими вероятностями пропусков и ложных обнаружений.

Модель сигнала:

$$D_{ij} = F_i \begin{cases} q + \xi_{ij}, & r \geq j > y_0(x) + \Delta/2 + \delta, \\ q + \sum_{i=1}^k a_i \varphi(x_i - i), & y_0(x) + \Delta/2 + \delta \geq j > y_0(x) + \Delta/2, \\ g + \sum_{i=1}^k b_i \psi(x_i - i), & y_0(x) + \Delta/2 > j > y_0(x) - \Delta/2, \end{cases} \quad (1)$$

где D_{ij} — яркость в точке изображения с координатами (i, j) ; q — средний уровень яркости фона; g — средняя яркость полосы; $y_0(x)$ — функция, описывающая поведение центра полосы; Δ — ширина освещенной полосы; δ — ширина зоны провала; $\varphi(x)$ — функция, описывающая изменение яркости фона в зоне провала; $\psi(x)$ — функция, описывающая изменение яркости полосы в зоне штриха; a_i, b_i — амплитуды этих изменений; k — число штрихов; ξ — шум, сопровождающий измерения; F_i — функция амплитудного преобразования. Кроме того, известно, что

$$x_i \in T_\theta(l) + T_0 + \eta, \quad (2)$$

где $T_\theta(l)$ — множество допустимых координат штрихов для данной конкретной задачи: $\theta = 28 \cdot 10^7$ (7 цифр и одна буква); T_0 — начало считывания относительно начала записи; η — координатная погрешность нанесения штрихов.

Оптимальный вариант решения задачи (максимизация вероятности правильного считывания) заключается в поиске минимума выбранного функционала J по всем неизвестным параметрам. Для некоррелированных гауссовых шумов

$$J = \min_{T_\theta, T_0, F_i, q, g, a_i, b_i} \sum_{ij} \{D_{ij} - F_i\{\cdot\}\}^2.$$

При этом также необходимо задаться параметрическим видом функций F_i и $y_0(x)$. В такой общей постановке задача практически неразрешима, и поэтому предлагается поэтапное ее решение, а именно: для исключения в (1) зависимости от F_i осуществляется предварительное преобразование исходных данных, оценивание поведения центра полосы (функции $y_0(x)$), далее переход к одномерным статистикам, по которым производится оценка координаты штрихов и распознавание кода.

Предварительное преобразование данных. Существующие значительные вариации средней яркости по строкам обусловлены различными условиями отражения падающей на изделие узкой полосы света от его исходной поверхности (в фотоприемнике сигнал близок к насыщению) и поверхности со штрихами (сигнал мал из-за рассеяния света). Исходное изображение приведено на рис. 2. Для того чтобы функция F_i была одинакова для всех строк изображения, необходимо предварительно привести гистограммы яркости в каждой строке к единому виду. Однако выборка в строке для построения гистограммы не представительна, и поэтому используется преобразование, основанное на минимальной (D_{\min}) и максимальной (D_{\max}) яркостях в строке, а также оценке среднего значения яркости фона (q). Использовано следующее преобразование яркости в каждой j -й точке строки i :

$$D_{ij}^p = D_f(D_{ij} - \bar{D}_{\min}) / (q - D_{\min}), \quad \text{если } \bar{D}_{ij} - D_{\min} < c(q - D_{\min}),$$

$$D_{ij}^s = D_f + D_f(D_{ij} - \bar{D}_{\min}) / (D_{\max} - q), \quad \text{если } \bar{D}_{ij} - D_{\min} \geq c(q - D_{\min}),$$

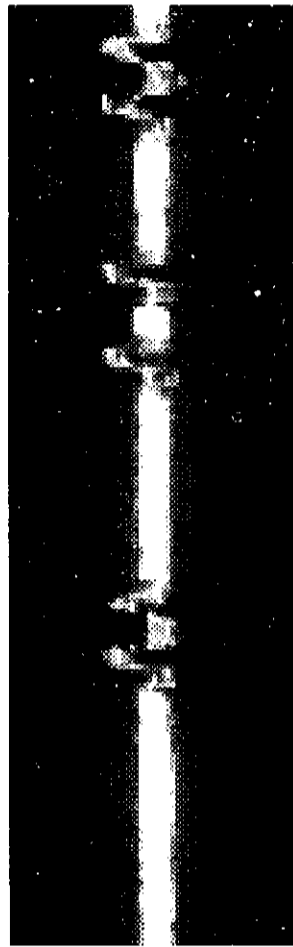


Рис. 1

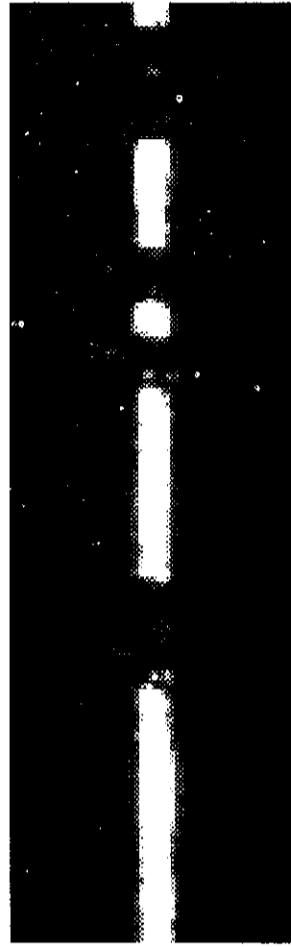


Рис. 2

где D_j^p — преобразованное значение яркостей; D_f — задаваемое среднее значение яркости фона; $D_p = (255 - D_f)$ — диапазон изменения полезного сигнала; c — некоторая постоянная (от 1 до 4). Это преобразование выравнивает фон со средним D_f и приводит изменения яркости полосы света в изображении к одинаковому диапазону D_p независимо от положения отраженного пучка (на штрихе или нет). Пример преобразованного изображения представлен на рис. 1.

Оценивание координат центра полосы. Биения изделия при его вращении приводят к смещению световой полосы на изображении. Для исключения эффекта смещения необходимо оценить ее центр, т. е. определить функцию $y_0(x)$. В качестве координаты центра используется оценка центра тяжести (ЦТ) наиболее яркой части полосы, выделенной по пороговому уровню. В работе [2] показано, что такая оценка является несмещенной, там же даны рекомендации по выбору порогового уровня L , минимизирующие ошибки в определении ЦТ, который вычисляется согласно выражению

$$\hat{y}(i) = \sum_j jD_{ij} / \sum_j D_{ij} \quad \text{для } D_{ij} > L$$

(L — выбранный порог). Математическое ожидание $\hat{y}(i)$ имеет вид

$$M\{\hat{y}(i)\} = y_0(i) + \sum_I \delta/2\varphi(i - x_i),$$

где $\delta/2$ — смещение центра тяжести в зоне штриха. Поэтому для получения несмещенных оценок необходимо исключить участки, содержащие штрихи, а значения координаты центра полосы на этих участках восстановить интерполяцией. Предполагая достаточную гладкость функции $y_0(x)$ (что подтверждается на практике), рассмотрим усредненную «разнесенную» разность

$$R(i) = \sum \{D(i - l, j) - D(i + l, j)\}^2,$$

где l — задаваемый интервал. Функция $R(i)$ имеет $2\sigma^2\chi_m^2$ -распределение, если точки $(i - l)$ и $(i + l)$ не попадают в зону нахождения штриха, и нецентральное χ^2 -распределение $2\sigma^2\chi_m^2(\rho^2)$, если одна из точек попадает в зону штриха, где

$$\rho^2 = a_i^2\delta + b_i^2\Delta.$$

Зная средние значения a_i и b_i , а также распределение случайного шума, по заданной вероятности ложной тревоги выбираем пороговые значения, и в тех случаях, когда $R(i) > C\alpha$, такие точки не участвуют в оценивании центра полосы.

Определив центр полосы и приведя все столбцы изображения D_{ij} к единой системе координат, получим следующее описание:

$$D_{ij} = \begin{cases} q + \xi_{ij}, & r \geq j > y_0 + \Delta/2 + \delta, \\ q + \sum a_i \varphi_i(x_i - i), & y_0 + \Delta/2 + \delta > j > y_0 + \Delta/2, \\ g + \sum b_i \psi_i(x_i - i), & y_0 + \Delta/2 \geq j \geq y_0 - \Delta/2. \end{cases} \quad (3)$$

В силу того что в (3) математическое ожидание D_{ij} не зависит от j , достаточным (без потери информации) является переход к одномерным статистикам:

$$d_L(i) = (1/\Delta) \sum_j D_{ij} \quad \text{при } y_0 - \Delta/2 < j < y_0 + \Delta/2,$$

$$d_O(i) = (1/\delta) \sum_j D_{ij} \quad \text{при } y_0 + \Delta/2 < j < y_0 + \Delta/2 + \delta.$$

Тогда

$$d_O(i) = q + \sum a_i \varphi_i(i - x_i),$$

$$d_L(i) = g + \sum b_i \psi_i(x_i - i).$$

Разделение изображения на два информативных множества обусловлено возможными дефектами изображения, а именно отсутствием провала или отскока. Совместное использование двух функций $d_O(i)$ и $d_L(i)$ уменьшает вероятность пропуска штриха. При идеальных сигналах достаточно одной из этих функций.

Таким образом, после проведения всех предварительных преобразований задача сводится к следующей постановке: по реализациям двух одномерных сигналов с максимально достижимой вероятностью определить координаты центров штрихов x_i при условии, что они подчиняются соотношению (2). Также следует учесть, что при низком критерии качества определения кода допустимо повторное считывание исходного изображения (с изменением

позиции ФДЛ в зоне штрихов) для повышения вероятности правильного распознавания.

Определение координат пары граничных штрихов (стробов). Как уже отмечалось выше, все поле кода разбито на кадры, а каждый кадр выделен стробами, представляющими собой пару штрихов, наносимых на заданном расстоянии друг от друга.

Пусть $\varphi(i)$ и $\psi(i)$ для данного случая описывают поведение сигнала в зоне строба на линии и в области отскока. Также предположим, что $\varphi(i)$ и $\psi(i)$ предварительно отцентрированы ($\sum \varphi(i) = \sum \psi(i) = 0$). Тогда

$$\begin{aligned} d_o(i) &= q + a\varphi(i), \\ d_L(i) &= g + b\psi(i) \end{aligned} \quad (4)$$

и задача определения координат сводится к проверке в каждой точке гипотезы $H_0: a = b = 0$ (отсутствие строба) при альтернативе $K: a > 0, b < 0$. Критерий, базирующийся на максимуме отношения правдоподобия, приводит к поиску максимума величины

$$J_1 = \hat{a}^2/\sigma_a^2 + \hat{b}^2/\sigma_b^2,$$

где

$$\hat{a} = \frac{\sum d_o(i)\varphi(i)}{\sum \varphi(i)^2}, \quad \hat{b} = \frac{\sum d_L(i)\psi(i)}{\sum \psi(i)^2},$$

$$\sigma_a^2 = \sigma^2/\sum \varphi(i)^2, \quad \sigma_b^2 = \sigma^2/\sum \psi(i)^2, \quad a \in N(a, \sigma_a^2), \quad b \in N(b, \sigma_b^2),$$

а статистика $J_1 \in \chi_m^2(\rho^2)$, где $\rho^2 = a^2/\sigma_a^2 + b^2/\sigma_b^2$.

Предполагая, что изменение яркости сигнала на линии и в области отскока одинаково, т. е. $a = -b$, приходим к критерию

$$J_2 = \frac{\sum d_o(i)\varphi(i) - \sum d_L(i)\psi(i)}{\sum \varphi(i)^2 + \sum \psi(i)^2} \in N\left(a, \sigma^2/\sum\{\varphi(i)^2 + \psi(i)^2\}\right).$$

Таким образом, оценки координат стробов определяются как локальные экстремумы функционала J_1 или J_2 .

При выделении экстремумов учитываются расстояния между стробами, что позволяет ослабить зависимость процедуры от амплитуды экстремумов (т. е. повысить вероятность обнаружения стробов) и уменьшить вероятность ложного обнаружения, отбросив экстремумы, не удовлетворяющие ограничениям на расстояния. Значимость экстремумов, соответствующих стробам, проверяется либо по критерию Фишера, либо Стьюдента [3].

Пусть $1 - \beta$ — вероятность пропуска строба, т. е. вероятность того, что значение функционала J будет меньше заданного порогового уровня при выполнении альтернативы K .

Тогда вероятность правильного определения всех десяти стробов составляет $P_1 = \beta^{10}$.

Поскольку априори известна зависимость координат стробов

$$x_j = x_0 + I(j - 1), \quad j = 1, 10 \quad (5)$$

(где I — интервал между стробами), то после определения координат всех стробов осуществляем проверку соотношения (5), и если оно не выполняется, то необходимо произвести повторное считывание. При этом (5) может быть выполнено и для неверного определения координат стробов, если первый строб не найден, а найден ложный строб на расстоянии I от 10-го, вероятность этого события $(1 - \beta)\alpha$, где α — вероятность ложной тревоги, т. е. вероятность

превышения порогового уровня шумовым сигналом при отсутствии строба. Рассматривая аналогично этому все возможные случаи нахождения неверных координат стробов, удовлетворяющих соотношению (5), приходим к выражению

$$P_2 = 2 \sum_{i=1}^{10} \beta^{10-i} \alpha^i (1-\beta)^i. \quad (6)$$

Таким образом, после определения координат строба возможны варианты со следующими вероятностями:

P_1 — все границы кадров определены верно,

P_2 — хотя бы один строб определен неверно,

$P_3 = 1 - P_1 - P_2$ — границы кадров определены неверно, при этом соотношение (5) не выполняется, т. е. необходимо повторное считывание.

Распознавание кода. Перед выполнением данного этапа алгоритма возможна проверка размещения стробов на основе известных расстояний (5) или «собранный» статистики и априорных сведений с последующей коррекцией редких ошибок (пропуски и/или наличие лишних стробов), возникающих при выделении стробов.

Известно, что каждый кадр содержит два штриха, которые могут располагаться в пяти фиксированных позициях. Используя принцип отношения правдоподобия для описания (4) с соответствующим изменением функций откликов $\varphi(i)$ и $\psi(i)$ на один штрих, получаем, что необходимо определить пять значений функционала J в пяти возможных позициях $J(1), \dots, J(5)$ и выбрать из них два максимальных при условии, что они превосходят некоторый выбранный порог L . Пусть вероятность превышения функционалом J порога L при гипотезе H_0 равна ϵ , а вероятность $J < L$ при альтернативе K равна η . Тогда вероятность правильного распознавания кода равна

$$P_s = (1 - \epsilon)^3 (1 - \eta)^2. \quad (7)$$

При использовании адаптивного порога, который выбираем таким образом, что два максимальных значения J всегда превосходят порог, вероятность правильного распознавания кода по формуле условных вероятностей составляет величину:

$$P_s = \frac{(1 - \epsilon)^3 (1 - \eta)^2}{(1 - \epsilon)^3 (1 - \eta)^2 + 6\epsilon(1 - \epsilon)^2 \eta(1 - \eta) + 3\epsilon^2 (1 - \epsilon) \eta^2}. \quad (8)$$

Для определения этой вероятности необходимо знание амплитуд a_i, b_i в зоне l -го штриха, однако можно дать оценку снизу, а именно, выбрав порог L равным минимальному значению функционала из двух максимальных, получим, что $\eta \geq 1/2$ (т. е. равна в этом случае вероятности того, что L будет больше случайных величин остальных откликов, имеющих то же распределение). Используя это неравенство, получим

$$P_s \geq \frac{(1 - \epsilon)^2}{(1 - \epsilon)^2 + 6\epsilon(1 - \epsilon)^2 + 3\epsilon^2}. \quad (9)$$

Итак, мерой достоверности может служить адаптивный порог, по которому можно дать оценку снизу для вероятности правильного распознавания кода $P = P_1 P_s^9$.

Таким образом, с вероятностями:

$P_1 P_s^9$ — код определяется верно,

$P_1(1 - P_s^9) + P_2$ — код определяется неверно,

$1 - P_1 - P_2$ — необходимо повторное считывание.

Совместный анализ двух кодовых последовательностей. Наличие двух независимых маркировок одного и того же кода позволяет строить достаточно

гибкие алгоритмы, обеспечивающие необходимые вероятности верного распознавания кода. Например, потребовав совпадения кодовых последовательностей в двух реализациях, получаем, что с вероятностью $P_{\text{и}} = P_1^2 P_s^{18}$ код определен верно, а вероятность ошибочного определения кода составляет:

$$P_{\text{л}} = P_1^2 \left\{ \sum_{i=1}^9 \left[P_s^{9-i} (1 - P_s)^i \right]^2 P_f^1 \right\} + 2P_1 P_2 P_f^9 + P_2^2 P_f^9,$$

где $P_f = 0,1$ — вероятность ложного определения цифры в кадре, и соответственно вероятность повторного считывания равна $P_{\text{п}} = 1 - P_{\text{и}} - P_{\text{л}}$.

При несовпадении кодовых последовательностей выбирается последовательность с максимальным значением используемого критерия, что уменьшает вероятность повторного считывания, но при этом возрастают ошибки в определении кода:

$$\begin{aligned} P_{\text{и}} &= P_1^2 P_s^{18} + 2P_1(1 - P_1)P_s^9 + 2P_1^2 P_s^9(1 - P_s^9), \\ P_{\text{л}} &= P_1^2(1 - P_s^9)^2 + 2P_1 P_3(1 - P_s^9) + 2P_1 P_2(1 - P_s^9), \\ P_{\text{п}} &= 1 - P_{\text{и}} - P_{\text{л}}. \end{aligned}$$

Таким образом, изменяя логику (структуру) алгоритма обработки, можно контролировать все три вероятности $P_{\text{п}}$, $P_{\text{и}}$, $P_{\text{л}}$.

Дополнительные условия повторного считывания изображения. При практической реализации возникают факторы, которые не укладываются в рассматриваемую модель, но могут существенно влиять на работоспособность системы и достоверность получаемых результатов. При функционировании системы распознавания возможны сбои в работе оборудования (привода и ФДЛ), биение изделия в приводе, дефекты при нанесении штрихов как по глубине, так и по координатам, изменение освещения, расфокусировка оптики, что приводит к несоответствию изображения и модели, т. е. к ошибочному распознаванию маркировки. Случайные сбои в работе оборудования (привода и ФДЛ), которые контролируются программой обработки, иногда можно исправить повторным считыванием исходной информации. В программе есть оценка смещения световой полосы от центра изображения, что позволяет контролировать величину биения изделия и в случае больших биений сигнализировать об этом для принятия решения.

Ряд факторов нельзя исправить, например расфокусировку, и если алгоритм будет давать постоянное неверное распознавание кода или не будет находить все стробы, то необходима настройка системы.

Заключение. Разработан алгоритм распознавания цифрового кода штриховой маркировки на цилиндрических металлических изделиях. Опытная проверка программной реализации алгоритма на реальных данных показала высокую эффективность (все предъявленные маркировки были прочитаны без ошибок).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feutlinske K., Gast Th. Berührungslose optisch-elektrische Prüfung von Lagen und Dimensionen // Qualität und Zuverlässigkeit. 1985. 30. II. 7.
2. Киричук В. С., Пушной Б. М., Чейдо Г. П. Построение процедур считывания изображений с выпуклыми границами // Автометрия. 1977. № 3.
3. Лемани Э. Проверка статистических гипотез. М.: Наука, 1964.

Поступила в редакцию 12 апреля 1996 г.