

УДК 681.51:007.5

Е. П. ПУТЯТИН, д-р техн. наук, *В. Г. АБДУЛА*, *Ю. А. УТКИН*

СТРУКТУРНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ, ДВИЖУЩИХСЯ НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЕ

Значительные успехи в области вычислительной техники подготовили почву для перехода на качественно новый уровень в области автоматизации, что находит выражение в цеховых и заводских автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП). Новизна подхода в области определения дефектов деталей, движущихся на конвейерной ленте, прежде всего в создании легко переналаживаемого на новые типы деталей оборудования, управляемого от микроЭВМ, которая имеет оптический ввод изображения.

В данном случае определить точно геометрический дефект детали зрительной системой человека невозможно по причине утомляемости, малой точности, инерционности зрительной системы и малой производительности. Речь идет о создании искусственных систем распознавания, не имеющих перечисленных

недостатков зрительной системы человека, правда, в особых условиях.

Однако технические трудности, в частности требуемое большое быстродействие и хранилище изображения большой емкости, сдерживают разработку и применение таких систем.

Структурные принципы распознавания позволяют существенно продвинуться в решении этих вопросов. Рассмотрим процесс распознавания, включивший в себя три этапа: предварительная обработка исходных данных текущего или эталонного изображения детали и формирование таблицы признаков; нормализация и поиск наилучшего взаимного положения для совмещения текущей и эталонной таблицы признаков; совмещение изображений (таблиц признаков) текущей детали и эталона, проверка их идентичности.

Исходное изображение детали, поступающее с телевизионной камеры, образует массив (матрицу) данных от $128 \times 128 \times 6$ бит до $1024 \times 1024 \times 6$ бит (в зависимости от минимальных размеров дефекта и точности измерений, которые необходимо определить). Общий объем хранилища исходного изображения 1048576 элементов с 64-мя уровнями яркости очень большой и не отвечает техническим возможностям современных микро-ЭВМ, у которых 16-разрядный адресный регистр и, следовательно, максимально возможный объем памяти — 65000 байт.

Вторым важным требованием к системе распознавания дефектов деталей является требование быстродействия порядка 5—10 млн. опер./с. Оно вытекает из требований на экономические показатели системы (больше быстродействие — выше скорость конвейера — меньше срок окупаемости системы). Современные микро-ЭВМ имеют быстродействие порядка 250—500 тыс. опер./с, т. е. на порядок меньше требуемых.

Исследуя принципы распознавания в условиях дефицита времени, приходим к выводу о необходимости пристального изучения бионической и физиологической литературы, отвечающей на вопрос: «Как мы видим то, что видим?». Природные системы распознавания (физиологические механизмы зрения) формировались путем естественного отбора за миллиарды лет эволюции живых систем, поэтому их можно считать лучшими (эталонными) системами, знание о принципах переработки информации в которых можно использовать при моделировании технических систем. В коре головного мозга животных обнаружены простые, сложные и сверхсложные поля (поля — врожденные структуры) [1—3].

Простые рецептивные поля «настроены» на выделение прямых тонких линий. Имеются поля, ощущающие наклон линий примерно через каждые шесть градусов во всем диапазоне углов от нуля до ста восьмидесяти. Есть поля, которые видят только горизонтальную линию, движущуюся сверху вниз, а на вертикальную, гуляющую вправо-влево, внимания не обращают.

Из сказанного растет понимание того, как мозг начинает обрабатывать зрительную информацию на предварительном этапе.

Он «старается» максимально сократить поступающую информацию, но сжимает ее специфически. Одна и та же информация из входных полей сетчатки поступает по зрительному тракту в различные физиологические структуры [3]. Каждая такая структура обрабатывает информацию параллельно с другими структурами, но отвечает только за свой участок, например, только прямая, дуга или угол.

Фильтрация как средство подавления шума на входе системы распознавания является самостоятельной частью и выходит за рамки этой работы.

Предварительная обработка исходных данных текущего и эталонного изображения детали и формирование таблицы признаков. Одна из основных (кроме фильтрации) задач первого этапа работы системы — снижение исходного объема информации. Наиболее информативная часть в определении дефекта детали заключена в граничных линиях, представляющих контуры основных элементов изображения. Для выделения контурных линий можно воспользоваться следующими цифровыми дифференциальными операторами:

а) модуль «градиента» с окном размером 2×2

$$|\Delta H_{x,y}| = \sqrt{(H_{x+1,y+1} - H_{x,y})^2 + (H_{x,y+1} - H_{x+1,y})^2}, \quad (1)$$

или его более просто вычисляемый аналог

$$|\Delta H_{x,y}| = |H_{x+1,y+1} - H_{x,y}| + |H_{x,y+1} - H_{x+1,y}|; \quad (2)$$

б) модуль «градиента» с окном размером 3×3

$$|\Delta H_{x,y}| = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}, \quad (3)$$

где $S_x = [(H_{x+2,y} + 2H_{x+2,y+1} + H_{x+3,y+3}) - (H_{x,y} + 2H_{x,y+1} + H_{x,y+2})]$; $S_y = [(H_{x,y+2} + 2H_{x+1,y+2} + H_{x+3,y+3}) - (H_{x,y} + 2H_{x+1,y} + H_{x+2,y})]$, или его более простой вычисляемый аналог $|\Delta H_{x,y}| = |S_x| + |S_y|$ (4), который можно использовать более эффективно с точки зрения скорости вычислений.

Решение о наличии контура принимается в результате сравнения амплитуды $|H_{x,y}|$ с порогом T . Если $|H_{x,y}| > T$, то считается, что в данном месте присутствует точка контура, если же $|H_{x,y}| \leq T$, то контур отсутствует. Результат обнаружения контура представляется в виде двумерного массива $K_N(x,y)$, где x, y — координаты N -й контурной точки изображения.

Величина порога T влияет на чувствительность цифрового дифференциального оператора. При отсутствии шума порог

можно выбирать таким, что все перепады яркости с минимальным уровнем контрастности будут обнаружены и определены как контуры, во всех остальных точках изображения контуры будут отсутствовать. Из-за технических трудностей (статистической обработки большого количества изображений) эксперименты с подбором порога T проводить не обязательно. Согласно работе [4] его можно принять равным 1, что является средним его значением.

Анализ цифровых дифференциальных операторов показывает, что наиболее подходящими в данном случае будут операторы (2) и (4).

Они наиболее просто могут быть реализованы аппаратно на микросхемах большой и средней степени интеграции. В работе [5] предлагается устройство ввода контура в ЭВМ, которое может работать со скоростью луча развертки телекамеры. Такое устройство экономит машинное время и емкость рабочей памяти, используемой при вводе известными методами.

В результате работы оператора количество точек в изображении снижается с 65000 до менее чем 1000, что очень важно в случае использования микро-ЭВМ в управлении АСУ ТП.

Далее граничные точки прореживаются: удаляются точки, лежащие в малой окрестности по координатам и угловым параметрам. На этом этапе устраняются также все разветвления, т. е. остаются связи только с двумя соседними.

На рис. 1, а приведен пример изображения детали, полученного после применения к исходному изображению цифрового оператора выделения контура и прореживания.

Следующий этап снижения информационной емкости — поиск аппроксимирующей кривой, проходящей через оставшиеся граничные точки.

Аппроксимация контура с помощью прямых и дуг окружностей вполне приемлема для многих практических задач распознавания геометрических дефектов деталей.

С этой целью анализируется зависимость кривизны $\Delta\theta/\Delta l$ и угла наклона θ касательной к граничной линии от расстояния l вдоль кривой. По результатам анализа кривизны и угла наклона касательной точки на граничной линии объединяются в линейные и криволинейные группы, которым соответствуют горизонтальные и наклонные участки функции $\theta(l)$. Границы участков находятся в точках резкого изменения кривизны (рис. 1, б). В каждой линейной группе из n точек определяются параметры θ и C прямой $X \cos \theta + Y \sin \theta + C = 0$ (5).

Для этого минимизируется выражение

$$Q = \sum_{i=1}^n [X_i \cos \theta + Y_i \sin \theta + C]^2. \quad (6)$$

Параметры θ и C находятся следующим образом:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left[- \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{T \sum_{i=1}^n X_i + \sum_{i=1}^n X_i Y_i} \right], \quad (7)$$

$$C = T \sin \theta, \quad (8)$$

$$T = \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 \right)}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}.$$

где

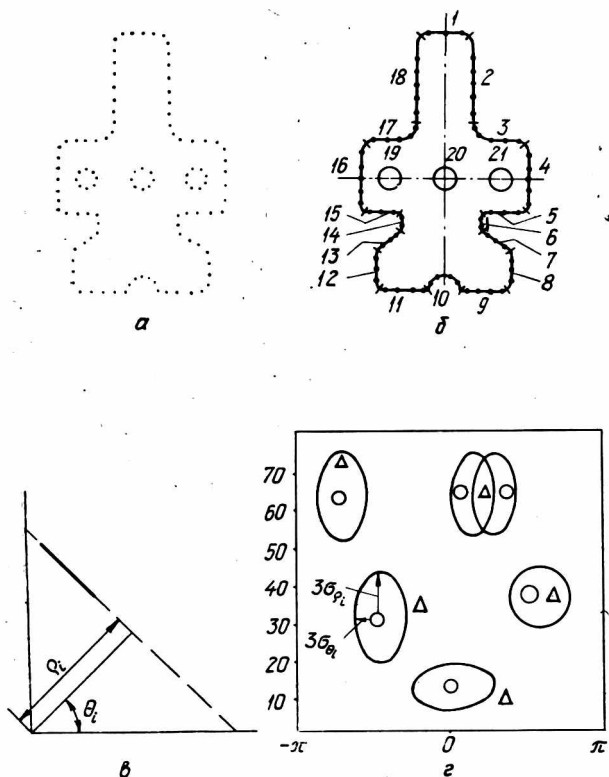


Рис. 1

Чтобы подобрать прямую линию в группе из n точек, можно также применить последовательную процедуру, основанную на методе наименьших квадратов. Задача заключается в определении наилучших коэффициентов A , B и C для уравнения прямой $AX_i + BY_i = C$ (9).

Данные поступают последовательно в виде координат точек (x, y) , и желательно при добавлении каждой новой точки делать как можно меньше пересчетов. Однако при каждом добавлении точки коэффициенты A, B, C и среднеквадратичная ошибка E должны корректироваться. Для этого достаточно сохранять в памяти пять чисел, представляющих накапливаемые суммы:

$$\sum_{i=1}^n X_i, \quad \sum_{i=1}^n Y_i, \quad \sum_{i=1}^n X_i Y_i, \quad \sum_{i=1}^n X_i^2, \quad \sum_{i=1}^n Y_i^2 \quad (10)$$

и число шагов n . Тогда после добавления каждой новой точки коэффициенты можно вычислить по формулам

$$A = \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n Y_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i; \quad (11a)$$

$$B = \sum_{i=1}^n Y_i \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i; \quad (11b)$$

$$C = \sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i Y_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i; \quad (11c)$$

$$E = C \left(nC - A \sum_{i=1}^n X_i - B \sum_{i=1}^n Y_i \right) / n(A^2 + B^2). \quad (11d)$$

Процедура подбора линии к последовательности связанных точек начинается с выбора массива точек линейной группы с наименьшим номером i . Номера групп назначаются по результатам анализа кривизны вдоль кривой. Подбор прямых линий выполняется в одном направлении, пока не будут исчерпаны номера всех линейных групп. Кроме координат конечных точек линий x_{i1}, y_{i1} и x_{i2}, y_{i2} , вычисляем интервалы ρ_i , а также ориентацию линий θ (рис. 1, в). Результаты подбора сведены в таблицу структурных признаков (рис. 2).

Для проведения дуги окружности радиуса R с центром (X_0, Y_0) через n точек криволинейной группы минимизируется выражение (12)

$$Q = \sum_{i=1}^n [(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 - R^2]^2, \quad (12)$$

получаем

$$R^2 = (1/n) \left[\sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_0)^2 \right]. \quad (13)$$

Если принять (x_1, y_1) — координаты первой точки стыковки, (x_2, y_2) — координаты второй точки стыковки, то координаты центра дуги (X_0, Y_0) и ее радиус R определим следующим образом:

$$X_0 = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{h(y_1 - y_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}; \quad (14)$$

$$Y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2} + \frac{h(x_1 - x_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}; \quad (15)$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{x_1 - x_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{y_1 - y_2}{2}\right)^2 + h^2}; \quad (16)$$

где h находим из условия $Q(h) = \text{мин}$ (17) методом последовательных приближений (18) или градиентного спуска:

$$h^{(k+1)} = h^{(k)} - LQ_h, \quad (18)$$

где k — шаг интеграции.

Значение L в начале процедуры принимаем равным 1,0 и уменьшаем в случае изменения знака производной, Q_h определяем на основании вида функции (12), (14) — (16).

Кроме координат центра и радиуса дуги вычисляем также длину дуги по соотношению

$$l_i = \frac{2\pi R_i \alpha_i}{360^\circ} = 0,0174 R_i \alpha_i, \quad (19)$$

где R_i — радиус i -й дуги; α_i — центральный угол, соответствующий дуге окружности.

Периметр P кривой, состоящей из прямых и дугообразных участков, находим, как сумму длин l_i :

$$P = \sum_{i=1}^N l_i, \quad (20)$$

$N=21$ в случае детали, показанной на рис. 1, б.

Результаты сведены в таблицу структурных признаков.

Номер линии i	Координаты конечных точек линии исходной детали и эталона						Ориентация и длина		Параметры ошибки	
	X_{i1}	Y_{i1}	X_{i2}	Y_{i2}	ρ_i	R_i	θ_i	l_i	σ_{θ_i}	σ_{ρ_i}
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

На рис. 1, б приведено изображение детали, аппроксимированное 21-й прямой и дугами окружностей, на рис. 1, г — эллипсы текущего и эталонного изображений в пространстве.

Достигнутое сокращение объема информации значительно облегчает дальнейшие операции с изображением.

При создании образа текущей детали или эталона вычисляются такие параметры, как координаты центра тяжести фигуры (21), площадь фигуры и отдельных ее фрагментов, другие параметры, необходимые для выявления геометрических дефектов:

$$X_{\text{цт}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}; \quad Y_{\text{цт}} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i},$$

где H_i — амплитуда функции яркости; X_i, Y_i — координаты i -й точки.

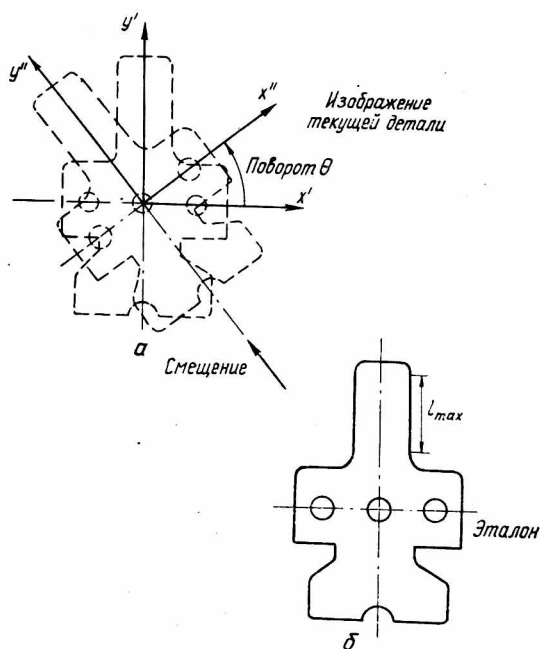


Рис. 2

В отличие от образа текущей детали, образ эталона (рис. 2) всегда находится в центре изображения, контурные точки его равномерно распределены вдоль граничной линии.

Нормализация и поиск наилучшего взаимного положения эталонного изображения детали. Детали, поступающие для контроля, имеют различную ориентацию на ленте конвейера. Их необходимо сравнить с эталонами, находящимися в центре изображения. Совмещение изображений эталона и текущей детали осуществляется путем нормализации (сдвига и вращения)

этало́на вокруг центра тяжести. Первоначально происходит совмещение координат центра тяжести этало́на с координатами центра тяжести текущей детали.

Согласно двумерному сдвигу в однородных координатах [6, 7], совмещение выполняем с помощью преобразования

$$[XY1] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ m & n & 1 \end{bmatrix} = [X + m \quad Y + n] = [X^*Y^*], \quad (22)$$

где m, n — параметры смещения; X, Y — координаты контурных точек; X^*, Y^* — координаты результата смещения контурных точек этало́на.

Совмещение осей симметрии выполняется путем вращения в однородных координатах вокруг центра тяжести с помощью преобразования

$$[XY1] \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -m(\cos \theta - 1) + n(\sin \theta) & -m(\sin \theta) - n(\cos \theta - 1) & 1 \end{bmatrix} = [X^*Z^*]. \quad (23)$$

В зависимости от геометрических свойств изображения этало́на, например, наличия оси симметрии или симметрических фрагментов, используем различные методы нахождения параметров и нормализации. Если этало́н, как на рис. 2, обладает осью симметрии, параллельной максимальному линейному участку в структурной таблице признаков, то нахождение угла поворота θ производим путем сравнения углов ориентации максимальных линейных участков текущего изображения детали и этало́на. Если фигура этало́на не обладает симметрией, то вычисляем взаимную корреляцию функций $\theta(S)$ граничных кривых этало́на и изображения текущей детали. По функции кросс-корреляции определяем координаты точки совмещения.

Совмещение изображений текущей детали и этало́на, проверка их идентичности. Совмещение изображений текущей детали и этало́на производится следующим образом. Вначале сравниваем обобщенные характеристики их образов, а именно: тип линии (прямая, дуга, окружность, смешанная); длина линии или радиус окружности; число отрезков прямых; число дуг; площадь, ограниченная внешним контуром; площадь внутренних отверстий; компактность фигуры (отношение площади к квадрату периметра); отношение моментов инерции (минимального к максимальному).

Схожесть изображений оцениваем по эмпирическим формулам. Например, коэффициент схожести по площади $K_{сх}$ (пл) вычисляем согласно преобразованию

$$K_{сх} (\text{пл}) = \frac{10(S_a - S_{\tau\text{д}})}{S_a}, \quad (24)$$

где $S_{э}$, $S_{тд}$ — площади эталона и текущей детали, ограниченные внешним контуром.

Общий коэффициент схожести получается суммированием составляющих его коэффициентов. Если он меньше допустимого порога, выносится решение о неуспехе сравнения и происходит переход к сравнению следующего эталона. Этот прием необходим для сокращения времени сравнения.

На последнем этапе сравнения, так называемом глобальном сравнении, изображение эталона (опорные точки) накладывается на изображение текущей детали. По доле опорных точек, совпадающих с граничными линиями текущей детали, выносится решение об успехе (или неуспехе) глобального сравнения. Совпадение опорной точки с граничной линией определяется в зависимости от попадания граничной линии в заданную площадь эллипса ошибки (рис. 1, 2). Попадание в площадь эллипса ошибки означает близость структурных признаков (координат и нормалей к граничной линии).

Комплекс программ, моделирующих структурные принципы распознавания, реализуется на ЭВМ ЕС 1050. Выборочное испытание частей системы программ показало достаточную работоспособность методики сокращения размерности изображения и формирования таблиц структурных признаков. Однако большое время (порядка 2÷3 мин), затрачиваемое ЭВМ на минимизацию расстояний в точках стыковки отрезков, вызывает необходимость в дальнейших исследованиях.

Предполагается в дальнейшем снизить затраты процессорного времени, в том числе за счет передачи аппаратуре функции выделения граничных линий, и реализовать систему программ на мини-ЭВМ СМ-4.

Информация, полученная в процессе моделирования, может быть использована при проектировании роботизированных участков народного хозяйства.

Список литературы: 1. Демидов В. Е. Как мы видим то, что мы видим. — М.: Знание, 1979. — 206 с. 2. Глезер В. Д. Механизмы опознавания зрительных образов. — М.: Наука, 1966. — 254 с. 3. Прибрам К. Языки мозга. — М.: Прогресс, 1975. — 463 с. 4. Абду И. Э., Прэтт У. К. Количественный расчет детекторов контуров, основанных на подчеркивании перепадов яркости с последующим пороговым ограничением. — Тр. ин-та инж. по радиоэлектронике, 1979, 5, с. 59—70. 5. Устройство ввода контура в ЭВМ. Заявка Японии № 56—19655. Оpubл. 08.05.81. 6. Нормализация вращения плоских изображений/Е. П. Путятин, О. М. Абрамов, В. П. Юрченко и др. — Пробл. бионики, 1972, вып. 9, с. 61—69. 7. Роджерс Д., Адамс Д. Математические основы машинной графики. — М.: Машиностроение, 1980. — 240 с.

Поступила в редколлегию 20.12.82.