Автоматическое детектирование общих признаков дактилоскопических изображений

В. Ю. Гудков

В статье в рамках концепции многослойной иерархической обработки дактилоскопических изображений описывается метод распознавания общих признаков узоров, таких как петли, дельты и завитки, которые служат основой для прогноза и подтверждения поля потоков в окрестности общих признаков узоров и расчета типа узоров.

1. Постановка задачи

Для дактилоскопического изображения (ДИ) известна пирамида в виде иерархических группировок слоев, содержащих ДИ и другие множества данных в виде матриц $\{\Delta_h^{(dk)}\}, \{\Lambda_h^{(dk)}\}, \{\Delta_h^{(k)}\}, \{\Lambda_h^{(k)}\}, \Delta_h^{(l)}, \Lambda_h^{(l)}, C_h^{(c)}$ [1, 2], где $k \in \{0, 1\}$ — канал «тени» и «света»; $d \in D = 0 \ldots 3$ — направления, по которым производились измерения потоков, отличающиеся на 45 градусов; $\{\Delta_h^{(dk)}\}$ — множества как матрицы потоков для направлений d в k каналах и соответствующие этим потокам матрицы достоверностей $\{\Lambda_h^{(dk)}\}$; $\{\Delta_h^{(k)}\}$ — два множества как матрицы потоков победителей в k каналах, собираемые из элементов $\{\Delta_h^{(dk)}\}$, и соответствующие этим потокам матрицы достоверностей $\{\Lambda_h^{(k)}\}$; $\Delta_h^{(l)}$ — множество как матрица локальных потоков, собираемая из элементов $\{\Delta_h^{(dk)}\}$ и $\{\Delta_h^{(k)}\}$, и соответствующая этим потокам матрица достоверностей $\Lambda_h^{(l)}$, $C_h^{(c)}$ — матрица как слой меток классификации локальных потоков $\Delta_h^{(l)}$, $h \in H = 0 \ldots n$ — номер иерархии в пирамиде; n — номер наивысшей иерархии. В одной иерархии представлено 23 матрицы.

Матрицы $\{\Delta_h^{(k)}\}$, $k \in \{0, 1\}$ фактически содержат потоки-победители в изолированных каналах «тени» и «света» без проведения какого-либо дополнительного совместного анализа матриц потоков. Матрица $\Delta_h^{(l)}$ более упорядочена по сравнению с матрицами $\{\Delta_h^{(k)}\}$, и именно с ней ассоциированы метки из матрицы $C_h^{(c)}$, устанавливающие доверие или недоверие к отдельным элементам из $\Delta_h^{(l)}$. Отмеченные элементы обычно однородны для областей с качественным изображением. Под однородностью понимается плавность изменения величин потоков $\delta_h^{(l)}(x,y) \in \Delta_h^{(l)}$ с достоверностью $\lambda_h^{(l)}(x,y) \in \Lambda_h^{(l)}$, соизмеримой в заданной окрестности для $(x,y) \in X_h \times Y_h$. Построить корректно все локальные потоки при анализе ДИ не удается, поскольку метод, используемый для построения меток классификации $c\,_h^{(c)}(x,y) \in C_h^{(c)}$, ориентирован на однородность потоков, а общие признаки (ОП) являются сингулярностями. Кроме того, области ДИ с локальными дефектами [2, 6, 7] также могут синтезировать ложные ОП. Ясно, что невозможно точно определить местоположение петель, дельт и завитков на основе только отмеченных локальных потоков.

Требуется на основе матриц $\{\Delta_h^{(dk)}\}, \{\Lambda_h^{(dk)}\}, \{\Delta_h^{(k)}\}, \{\Lambda_h^{(k)}\}, \Delta_h^{(l)}, \Lambda_h^{(l)}, C_h^{(c)}$ выделить области возможного местоположения ОП ДИ, уточнить

Рис. 1. Исходное изображение

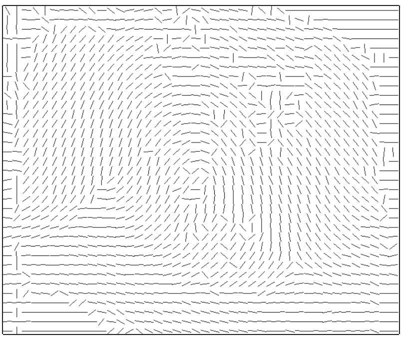

Рис. 2. Потоки-победители канала «тени»

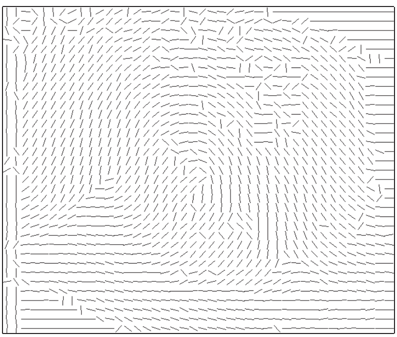

Рис. 3. Потоки-победители канала «света»

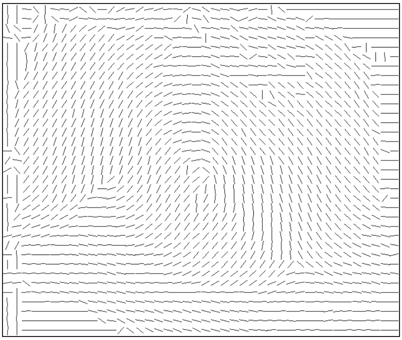

Рис. 4. Все локальные потоки

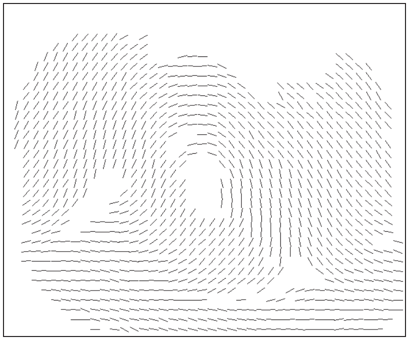

Рис. 5. Отмеченные локальные потоки

их местоположение в матрице достоверностей $\Lambda_h^{(f)} = \left[\lambda_h^{(f)}(x,y)\right]$ в соответствии с заданным критерием достоверности [3, 7], определить их ориентацию в матрице направлений $\Delta_h^{(f)} = \left[\delta_h^{(f)}(x,y)\right]$, распознать их тип (петля, дельта или завиток) в матрице $C_h^{(f)} = \left[c_h^{(f)}(x,y)\right]$. Постановка задачи демонстрируется на рис. 1–5: исходное ДИ, матрицы $\Delta_h^{(l)}, C_h^{(c)}, \{\Delta_h^{(k)}\}$, $k \in \{0,1\}$.

2. Определение местоположения общих признаков

Известно, что матрицы потоков $\{\Delta_h\}$ и достоверностей $\{\Lambda_h\}$ носят оценочный характер [1, 2]. Тем не менее, они служат основой для детектирования ОП, а получаемые решения достаточно оптимистичны. Рассмотрим метод детектирования ОП ДИ, рекурсивно реализующий для h-й иерархии отображение

$$\Gamma : \left\{\{\Delta_h^{(k)}\},\ \{\Lambda_h^{(k)}\}, \Delta_h^{(l)}, \Lambda_h^{(l)}, C_h^{(c)}\right\} \to$$
$$\to \left\{\{\Delta_h^{(k)}\},\ \{\Lambda_h^{(k)}\}, C_h^{(c)}, \Delta_h^{(c)}, \Lambda_h^{(c)}, \Delta_h^{(l)}, \Lambda_h^{(l)}, \Lambda_h^{(l+)}, \Delta_h^{(f)}, C_h^{(f)}\right\},$$

где $k \in \{0,1\}$, $\{\Delta_h^{(k)}\}$ и $\{\Lambda_h^{(k)}\}$ — семейства потоков и достоверностей в k каналах, полученные на этапе измерения поля потоков [1]; $C_h^{(c)} = \left[c_h^{(c)}(x,y)\right]$ — матрица как слой меток классификации потоков; $\Delta_h^{(c)} = \left[\delta_h^{(c)}(x,y)\right]$ и $\Lambda_h^{(c)} = \left[\lambda_h^{(c)}(x,y)\right]$ — матрица направлений кривизны локальных потоков и соответствующая ей матрица достоверностей; $\Lambda_h^{(l+)} = \left[\lambda_h^{(l+)}(x,y)\right]$ — матрица наилучшей достоверностей дуг; $\Delta_h^{(f)} = \left[\delta_h^{(f)}(x,y)\right]$ — матрица ориентации ОП; $C_h^{(f)} = \left[c_h^{(f)}(x,y)\right]$ — матрица типов ОП.

Расчет указанных матриц производится в несколько этапов, которые итерационно повторяются. Для каждой итерации задается размер $w = w_0(h)$ апертуры (в реализации $w_0(h) = \{1, 2, 4\}$ для иерархий $h \in 4 \ldots 2$ соответственно), зависящий от номера иерархии, который затем декрементируется, причем, большая апертура соответствует более дробной иерархии.

К этому моменту обработки ДИ метки классификации потоков $c_h^{(c)}(x, y)$, элементы локальных потоков $\delta_h^{(l)}(x, y)$ с их элементами достоверностей $\lambda_h^{(l)}(x, y)$ для $\forall\, (x, y) \in X_h \times Y_h$ уже предварительно установлены. Для начала положим $h = 4$.

Первый этап

Целью первого этапа является детектирование возможного местоположения ОП. Процедура сводится к последовательности вычислений в точках $\{(x, y) \in X_h \times Y_h\}$ для направлений $i \in I = 0 \ldots 7$ (I — множество, элементы которого используются как индексы, соответствующие направлениям с шагом 45 градусов) множеств $\{re_h^{i(l)}(x, y) \mid i \in I\}$ и $\{im_h^{i(l)}(x, y) \mid i \in I\}$ адаптивной апертуры по формулам

$$re_h^{i(l)}(x, y) =$$
$$= \sum_{(u,\, v,\, \beta) \in A_h(x,\, y,\, w)} \lambda_h^{(l)}(u, v) \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}\big(\beta - \delta_h^{(l)}(x, y) - 45i\big)\big) \cos\big(2\delta_h^{(l)}(u, v)\big),$$

$$im_h^{i(l)}(x, y) =$$
$$= \sum_{(u,\, v,\, \beta) \in A_h(x,\, y,\, w)} \lambda_h^{(l)}(u, v) \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}\big(\beta - \delta_h^{(l)}(x, y) - 45i\big)\big) \sin\big(2\delta_h^{(l)}(u, v)\big),$$

где i — порядковый номер сектора в апертуре размером w, ориентированной по потоку $\delta_h^{(l)}(x, y)$ в центре апертуры; $\lambda_h^{(l)}(u, v)$ и $\delta_h^{(l)}(u, v)$ — достоверность и поток в точке (u, v) апертуры $A_h(x, y, w)$; β — направление из центра апертуры в другую точку апертуры (u, v), l — символ локального потока. Функции $\mathrm{coq}(\alpha)$ и $\mathrm{pos}(\alpha)$ строятся по простым формулам:

$$\mathrm{coq}(\alpha) = \cos^5(\alpha), \tag{1}$$

$$\mathrm{pos}(a) = \begin{cases} a, & \text{если } a \geqslant 0, \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \tag{2}$$

соответственно апертура

$$A_h(x, y, w) =$$

$$= \bigcup_{\alpha=\overline{0,359}} \big\{(u,v,\beta) = (x + \mathrm{int}(t\cos(\alpha)),\ y + \mathrm{int}(t\sin(\alpha)), \beta) | t \in 1 \ldots w\big\}, \tag{3}$$

где функция int обозначает округление до ближайшего целого.

В указанные множества заносится разложение на действительную и мнимую части локальных потоков, рассматриваемых как вектора с модулем λ и аргументом δ, в точках апертуры, ориентированной по потоку в центре апертуры. Поскольку программная реализация процедуры обработки ДИ построена по объектно-ориентированной концепции, то некоторые функции, приводимые в работе, являются копией или незначительной модификацией функций из [1, 2].

В (2) вектором центра ориентируются сектора апертуры, которая в каждой точке (x, y) ориентируется по локальному потоку. Потоки, участвующие в формировании $\big\{re_h^{i(l)}(x,y)\big\}$ и $\big\{im_h^{i(l)}(x,y)\big\}$, ограничиваются областью апертуры и взвешиваются функцией $w(\alpha) = \mathrm{pos}(\mathrm{coq}(\alpha))$, где α — угол поворота вектора, соединяющего центр апертуры с точкой (u, v), до вектора, соединяющего центр апертуры с центром текущего сектора номер i (рис. 6). Взвешивающая функция $w(\alpha)$ (рис. 7) отсекает ориентированную полуплоскость. Для сектора номер 0 и номер 4 отсекаемая полуплоскость обозначена пунктиром (рис. 6).

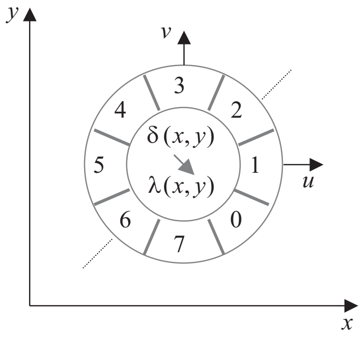

Рис. 6. Сектора ориентированной апертуры

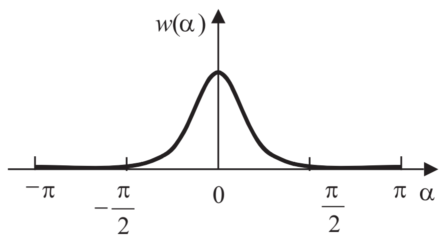

Рис. 7. Весовая функция сектора

Полученные множества $\big\{re_h^{i(l)}(x,y)\big\}$ и $\big\{im_h^{i(l)}(x,y)\big\}$ используются для расчета векторов по секторам апертуры $A_h(x,y,w)$: множества аргументов $\big\{a_h^{i(l)}(x,y)\big\}$ и множества модулей $\big\{m_h^{i(l)}(x,y)\big\}$ мощностью $|I|$ по формулам

$$\big\{a_h^{i(l)}(x,y)\big\} = \left\{\frac{\mathrm{int}\big(\mathrm{atan}\big(re_h^{i(l)}(x,y),\ im_h^{i(l)}(x,y)\big)\big)}{2}\right\},$$

$$\left\{m_h^{i(l)}(x,y)\right\} = \left\{\operatorname{int}\left(\operatorname{dist}\left(re_h^{i(l)}(x,y),\ im_h^{i(l)}(x,y)\right)\right)\right\},$$

которые определяют усредненные вектора потоков для каждого сектора апертуры. Функции atan, dist вычисляются по формулам:

$$\operatorname{atan}(x,y) = \frac{180}{\pi}\begin{cases} \arctan\dfrac{y}{x}, & \text{если } x \geqslant 0 \wedge y \geqslant 0,\\ \pi - \arctan\dfrac{y}{|x|}, & \text{если } x < 0 \wedge y \geqslant 0,\\ \pi + \arctan\dfrac{|y|}{|x|}, & \text{если } x < 0 \wedge y < 0,\\ 2\pi - \arctan\dfrac{|y|}{x}, & \text{если } x \geqslant 0 \wedge y < 0, \end{cases} \tag{4}$$

$$\operatorname{dist}(x,y) = \sqrt{x^2+y^2}. \tag{5}$$

Вид взвешивающей функции $w(\alpha)$ для повышения точности детектирования ОП подбирается экспериментально, при этом модифицируется только (1). На основе аргументов в секторах апертуры оценивается величина поворота потоков вокруг центра апертуры $(x,y) \in X_h \times Y_h$ по формуле

$$r(x,y) = \sum_{i=0}^{7} \operatorname{scis}\left(a_h^{i(l)}(x,y), a_h^{g(l)}(x,y)\right), \tag{6}$$

где $g = (i+1) \bmod 7$; функция scis как минимальный угол поворота со знаком одной прямой до другой, ориентированных по направлениям α и β, напоминает работу ножниц [5] и вычисляется по формуле

$$\operatorname{scis}(\alpha,\beta) = \begin{cases} \alpha-\beta, & \text{если} \quad 0 \leqslant |\alpha-\beta| < 90,\\ 180\operatorname{sign}(\beta-\alpha)+\alpha-\beta, & \text{если} \quad 90 \leqslant |\alpha-\beta| < 270,\\ 360\operatorname{sign}(\beta-\alpha)+\alpha-\beta, & \text{если} \quad 270 \leqslant |\alpha-\beta| < 360. \end{cases} \tag{7}$$

По величине поворота потоков вокруг центра апертуры определяется существование и тип ОП

$$c_h^{(f)}(x,y) = \begin{cases} W, & \text{если} \quad r(x,y) > +220,\\ L, & \text{если} \quad r(x,y) > +140,\\ D, & \text{если} \quad r(x,y) < -140,\\ N, \end{cases} \tag{8}$$

где W — завиток, L — петля, D — дельта, N — нет ОП; пороговые величины для W, L, D оптимизируются в процессе обучения. В целом (8) сильно влияет на качество распознавания ОП. Независимо от того, детектированы ОП или нет, для $\forall\,(x,y) \in X_h \times Y_h$ центра апертуры вычисляется направление кривизны $\delta_h^{(c)}(x,y) \in \Lambda_h^{(c)}$ и величина кривизны $\lambda_h^{(c)}(x,y) \in \Lambda_h^{(c)}$ по формулам:

$$\Delta_h^{(c)} = \left[\delta_h^{(c)}(x,y)\right] = \left[\left(\delta_h^{(l)}(x,y) + \underset{R}{\mathrm{sel}}(90, 270)\right) \bmod 360\right], \qquad (9)$$

$$\Lambda_h^{(c)} = \left[\lambda_h^{(c)}(x,y)\right] = \left[\left|\mathrm{scis}\left(a_h^{0(l)}(x,y),\, a_h^{4(l)}(x,y)\right)\right|\right], \qquad (10)$$

где селектор определяется в виде

$$\mathrm{sel}_R(a,b) = \begin{cases} a, & \text{если } R, \\ b, & \text{иначе,} \end{cases} \qquad (11)$$

а знак функции scis для нулевого и четвертого секторов апертуры детектирует условие выбора

$$R = \begin{cases} true, & \text{если} \quad \mathrm{scis}\left(a_h^{0(l)}(x,y),\, a_h^{4(l)}(x,y)\right) > 0, \\ false, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Таким образом, местоположение и тип ОП ДИ на этом этапе полностью определяется локальным потоком и не зависит от состояния матрицы $C_h^{(c)}$. Матрицы направления и величины кривизны (9, 10) используются далее.

Второй этап

На втором этапе определяется ориентация ОП. Процедура сводится к выбору угла $\delta_h^{(f)}(x,y)$, обеспечивающего наилучшее согласование модели ОП, зависящей от типа ОП, с множеством аргументов $\left\{a_h^{i(l)}(x,y)\right\}$ из апертуры (2) по формуле

$$\delta_h^{(f)}(x,y) = \underset{\psi\in 0\ldots 359}{\arg\min}\left(\sum_{i=0}^{7} e(x,y,\psi,i) \times e(x,y,\psi,i)\right), \qquad (12)$$

где ошибка с учетом (7) и (8) определяется

$$e(x,y,\psi,i) = \ \mathrm{scis}\ \left(a_h^{i(l)}(x,y), \psi + a^i(c_h^{(f)}x,y)\right),$$

причем множество элементов $\left\{a^i\left(c_h^{(f)}(x,y)\right) \mid i \in I\right\}$ есть потоки как углы в модели ОП, определяемой типом ОП (рис. 8).

Потоки как углы назначаются в градусах в виде множеств для моделей:

$$W \to \{a\} = \{90, 140, 0, 40, 90, 140, 0, 40\},$$

$$L \to \{a\} = \{0, 2, 3, 42, 90, 138, 177, 178\},$$

$$D \to \{a\} = \{0, 157, 135, 112, 90, 68, 45, 23\}.$$

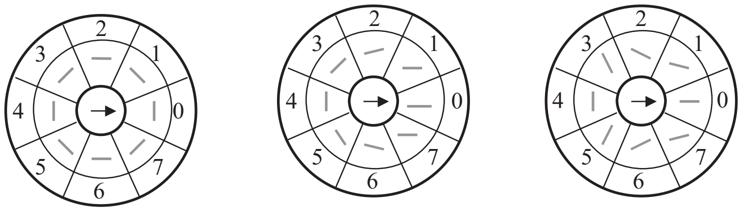

Рис. 8. Модели потоков для завитка, петли и дельты

Элементы этих множеств могут быть настроечными параметрами алгоритма обработки ДИ, например завиток может быть представлен более вытянутым овалом, что увеличивает точность определения ориентации завитка. На рис. 8 модели потоков ОП показаны в секторах горизонтально ориентированной (12) апертуры (2).

Таким образом, если в позиции $(x, y) \in X_h \times Y_h$ существует ОП, то определяется его ориентация $\delta_h^{(f)}(x, y) \in \Delta_h^{(f)}$. Как правило, ОП собираются в обширные связанные области с одинаковым типом, но типы могут и перемежаться. В любом случае необходимо уточнение местоположения петель, дельт и завитков.

Третий этап

Целью третьего этапа является слияние ОП к точке наиболее правдоподобного [5] местоположения ОП. Пусть в некоторой точке

$$p_h^0(x, y) \in F_h = \left\{ f_h(x, y) \mid (x, y) \in X_h \times Y_h \right\}$$

детектирован ОП типа $c_h^{(f)}(x, y) \in \{W, L, D\}$ с величиной кривизны поля потоков $\lambda_h^{(c)}(x, y)$ в этой точке. Зададим стек $ST = \{p_h^0\}$, целевое множество $V = \{p_h^0\}$, величину $v = 0$, и построим множество точек обхода P слоя F_h по методу бектрекинга

$$P = \left\{ p \mid p \in N_8(T) \ \& \ p \notin ST \& J(p) \rightarrow ST = ST \cup \{p\} \right\}, \qquad (13)$$

где множество $N_8(ST)$ является 8-смежной областью для стека ST, причем в случае выполнения критерия $J(p)$ в стек заносится точка p. Критерий $J(p)$ определяет направление развития процедуры поиска с возвратом по формуле

$$J(p) = \frac{\lambda_h^{(c)}(p) > \lambda_h^{(c)}(p^0)}{2} \ \& \ \left(c_h^{(f)}(p) \equiv c_h^{(f)}(p^0) \right),$$

где дробность $\lambda_h^{(c)}\left(p^0\right)$ задана для организации «бассейна» области поиска [6]. На каждом шаге поиска выполняется проверка на максимум

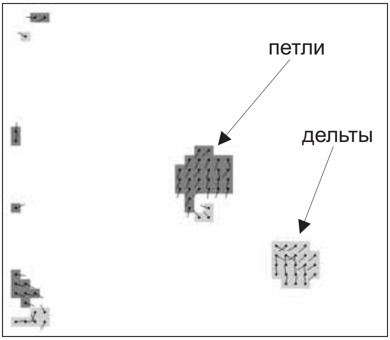

Рис. 9. Петли и дельты до слияния с указанием направления ориентации для иерархии 16×16 пикселей

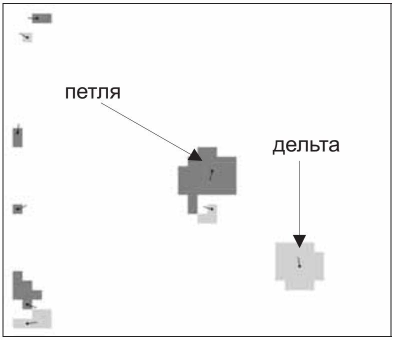

Рис. 10. Петли и дельты после слияния для иерархии 16×16 пикселей. Выбранные петли и дельты отмечены направлением

величины кривизны в области поиска и в случае успеха обновляется целевое множество по формуле

$$\lambda_h^{(c)}(p) > \nu \to \big(\nu = \lambda_h^{(c)}(p)\big) \ \& \ \big(V = \{p\}\big).$$

Если элемент $c_h^{(f)}(x, y)$ переместится в точку $p(u, v)$, $(u, v) \in X_h \times Y_h$, которой соответствует большая величина кривизны локального потока, то исходный элемент удаляется $c_h^{(f)}(x, y) = N$. Эта процедура выполняется для $\forall\, p_h(x, y) \in F_h$. Результаты слияния ОП по (13) для доминирующих связанных групп петель и дельт показаны на рис. 9 и рис. 10.

На рис. 10 видно, что связанные множества ложных и истинных петель и дельт сжимаются до одной точки в F_h, соответствующей наибольшей кривизне локального потока, причем ложные ОП на этом шаге не различаются. Следует отметить, что для анализа петель необходимо учитывать и направление ориентации петель. Здесь в силу ограниченности материала это не раскрывается. Ясно, что необходим дополнительный анализ ОП на основе модулирования поля локальных потоков в окрестности ОП.

Четвертый этап

Целью четвертого этапа является регуляризация поля локальных потоков в окрестности ОП на основе их моделей. Решение для позиции $(u, v) \in A_h(x, y, w)$ апертуры для ОП типа $c_h^{(f)}(x, y)$ сводится к выбору для матриц «тени» и «света» $\{\Delta_h^{(k)}\}, \{\Lambda_h^{(k)}\}$ потоков и достоверностей из матриц $\{\Delta_h^{(dk)}\}, \{\Lambda_h^{(dk)}\}$ иерархии $h \in H = 2 \dots n$ по формулам

$$\delta_h^{(k)}(u,v) = \delta_h^{(\vartheta k)}(u,v),$$
$$\lambda_h^{(k)}(u,v) = \lambda_h^{(\vartheta k)}(u,v),$$

где доминирующее направление

$$\vartheta = \arg\max_{d \in D} \lambda_h^{(dk)}(u,v) f\big(\delta_h^{(dk)}(u,v) - \theta\big)$$

выбирается как направление $d \in D = 0 \dots 3$, доставляющее максимум достоверности $\lambda_h^{(dk)}(x,y)$, масштабированной функцией f с аргументом разности величины потока $\delta_h^{(dk)}(x,y)$ и угла θ; угол θ — фактор регуляризации, $k \in \{0,1\}$. Функция f определяется как обратный функционал вида

$$f = J^{-1}(i),$$

где $i \in 0 \dots 6$ — номер функции, задаваемый в процессе настройки алгоритма, а функционал J используется как критерий качества регуляризации вида

$$J : \big\{\cos(\alpha)|\cos^i(\alpha)|\big\} \to \{i\}.$$

Регуляризация потока по углу θ подразумевает для каждого канала выполнение трех операций: определение доминирующего направления $\vartheta \in D$, где $D = 0 \dots 3$ — множество гипотез, для которых производились измерения потоков [1]; замещение потока-победителя $\delta_h^{(k)}(u,v)$ в канале; замещение соответствующей достоверности $\lambda_h^{(k)}(u,v)$ в канале.

Весь секрет простой операции заключается в способе вычисления фактора регуляризации — угла θ. В реализации угол

$$\theta = \frac{\mathrm{int}\big(\mathrm{atan}\big(re_h(u,v), im_h(u,v)\big)\big)}{2}$$

вычисляется разложением на мнимую и действительную части константной величины, например 1, по формуле

$$re_h(u,v) = \sum_{i=0}^{7} \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}(\beta - 45i)\big) \cos\Big(2\big(\delta_h^{(f)}(x,y) + a^i\big(c_h^{(f)}(x,y)\big)\big)\Big),$$

$$im_h(u,v) = \sum_{i=0}^{7} \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}(\beta - 45i)\big) \sin\Big(2\big(\delta_h^{(f)}(x,y) + a^i\big(c_h^{(f)}(x,y)\big)\big)\Big),$$

где $(u, v, \beta) \in A_h(x, y, w)$ — параметры апертуры из (2), $a^i\big(c_h^{(f)}(x, y)\big)$ есть потоки как углы в модели ОП, $\delta_h^{(f)}(x, y) \in \Delta_h^{(f)}$ — угол ориентации ОП (12). Фактически для точки $p(u, v)$ угол θ определяется по взвешенной интерполяционной формуле, аргументами которой являются величины потоков в модели ОП, скорректированные его ориентацией. Взвешивающая функция $w(\alpha) = \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}(\alpha)\big)$ подобна функции на рис. 7.

Пятый этап

Этот этап предназначен для восстановления поля локальных потоков. Основная идея изложена в [2] и, видимо, здесь достаточно ее краткого описания. Предварительно для точек $(u, v) \in A_h(x, y, w)$ метки классификации удаляются $c_h^{(c)}\big(u, v\big) = 0$, где (x, y) соответствует ОП типа $c_h^{(f)}(x, y) \in \{W, L, D\}$.

Для восстановления локальных потоков выполняется последовательность вычислений в точках $\big\{(x, y) \mid c_h^{(c)}(x, y) \in \{0\}\big\}$ для направлений $i \in I = 0 \ldots 7$ (с шагом 45 градусов) множеств $\big\{re_h^{i(k)}(x, y) \mid i \in I\big\}$ и $\big\{im_h^{i(k)}(x, y) \mid i \in I\big\}$ адаптивной апертуры (2) по формулам

$$\begin{aligned} re_h^{i(k)}(x, y) = & \sum_{(u, v, \beta) \in A_h(x, y, w)} \lambda_h^{(k \oplus 1)}(u, v) \times \\ & \times \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}\big(\beta - \delta_h^{(k)}(x, y) - 45i\big)\big) \cos\big(2\delta_h^{(k\oplus 1)}(u, v)\big), \\ im_h^{i(k)}(x, y) = & \sum_{(u, v, \beta) \in A_h(x, y, w)} \lambda_h^{(k \oplus 1)}(u, v) \times \\ & \times \mathrm{pos}\big(\mathrm{coq}\big(\beta - \delta_h^{(k)}(x, y) - 45i\big)\big) \sin\big(2\delta_h^{(k\oplus 1)}(u, v)\big), \end{aligned}$$

где i — номер сектора в апертуре размером w, ориентированной по потоку $\delta_h^{(k)}(x, y)$ в центре апертуры; $\lambda_h^{(k\oplus 1)}(u, v)$ и $\delta_h^{(k\oplus 1)}(u, v)$ — достоверность и поток в точке (u, v) апертуры $A_h(x, y, w)$; символ $\oplus$ — исключающее или; β — направление из центра апертуры в точку (u, v); $k \in \{0, 1\}$ — метка канала «тени» или «света»; функции $\mathrm{coq}(\alpha)$ и $\mathrm{pos}(\alpha)$ по (1) и (2).

В указанные множества заносится разложение на действительную и мнимую части потоков, рассматриваемых как вектора с модулем λ и аргументом δ, в точках апертуры, ориентированной по потоку в центре апертуры, причем каналы скрещиваются. График функции $w(\alpha) = \mathrm{pos}(\mathrm{coq}(\alpha))$ показан на рис. 7.

Полученные множества $\big\{re_h^{i(k)}(x, y)\big\}$ и $\big\{im_h^{i(k)}(x, y)\big\}$ используются для расчета векторов по секторам апертуры $A_h(x, y, w)$ и расчета для полученного множества векторов множеств аргументов $\big\{a_h^{i(k)}(x, y)\big\}$

и модулей $\left\{m_h^{i(k)}(x,y)\right\}$ по формулам

$$\left\{a_h^{i(k)}(x,y)\right\} = \left\{\frac{\mathrm{int}\big(\mathrm{atan}\big(re_h^{i(k)}(x,y),\ im_h^{i(k)}(x,y)\big)\big)}{2}\right\},$$

$$\left\{m_h^{i(k)}(x,y)\right\} = \left\{\mathrm{int}\big(\mathrm{dist}\big(re_h^{i(k)}(x,y),\ im_h^{i(k)}(x,y)\big)\big)\right\},$$

которые определяют усредненные вектора потоков для каждого сектора апертуры, а также отклонений $\left\{\gamma_h^{i(k)}(x,y)\right\}$ вектора центра от векторов для секторов апертуры по формуле

$$\left\{\gamma_h^{i(k)}(x,y)\right\} = \left\{\mathrm{scis}\big(a_h^{i(k)}(x,y), \delta_h^{(k)}(x,y)\big)\right\},$$

где $i \in I$ — номер сектора апертуры; $k \in \{0,1\}$ — метка канала; функции atan, dist и scis вычисляются по (4), (5), (7).

Множество $\left\{\gamma_h^{i(k)}(x,y)\right\}$ определяет степень «правильности» дуги, образованных потоками центра и периферией апертуры. Для оценки дуги в точке (x,y) используются методы нейроматематики [6, 7] с критерием качества

$$K_h^{(k)}(x,y) = \sum_{i\in I} k_i l_i^{(k)}(x,y) \tag{14}$$

на основе упорядоченного множества $L^{(k)}$ с отношением нестрого полного порядка

$$L^{(k)}(x,y) = \left\{l^{(k)}(x,y)\right\} \underset{\theta\in W}{\subset} \left\{l^{\theta(k)}(x,y)\right\},$$

с элементами

$$l^{\theta(k)}(x,y) = \left(k_p\left|\gamma_h^{a(k)}(x,y) + \gamma_h^{b(k)}(x,y)\right| + k_n\left|\gamma_h^{a(k)}(x,y) - \gamma_h^{b(k)}(x,y)\right|\right),$$

где I — множество индексов, причем для любого $i \in I$ элемент $l_i(x,y)$ известен; k_i — коэффициенты для взвешивания элементов множества $L^{(k)}$, причем худшим элементам соответствуют большие коэффициенты (4, 2 и 1 в реализации); $W = \left\{\theta = (a,b) \mid a,b \in I\right\}$ — множество упорядоченных пар индексов секторов, определяемое в виде $W = \left\{(1,3),(0,4),(7,5)\right\}$ для расчета $\gamma_h^{i(k)}(x,y)$; k_p и k_n — коэффициенты для оценки отдельной упорядоченной пары отклонений с индексами из W (3 и 9 в реализации); $k \in \{0,1\}$ — метка канала.

Чем меньше величина критерия качества $K_h^{(k)}(x,y)$, тем ровнее располагаются линии на ДИ. Поэтому оценки $K_h^{(k)}(x,y)$ по (14) служат основой для выбора из каналов «тени» и «света» матрицы локальных потоков $\Delta_h^{(l)}$ и связанной с ней матрицы достоверностей $\Lambda_h^{(l)}$, матрицы направлений кривизны $\Delta_h^{(c)}$ и соответствующей ей матрицы величины кривизны

$\Lambda_h^{(c)}$, матрицы наилучших $\Lambda_h^{(l+)}$ достоверностей дуг по формулам:

$$\begin{aligned}
\Delta_h^{(l)} &= \left[\delta_h^{(l)}(x,y)\right] = \left[\delta_h^{(\vartheta(x,y))}(x,y)\right],\\
\Lambda_h^{(l)} &= \left[\lambda_h^{(l)}(x,y)\right] = \left[\lambda_h^{(\vartheta(x,y))}(x,y)\right],\\
\Delta_h^{(c)} &= \left[\delta_h^{(c)}(x,y)\right] = \left[\left(\delta_h^{(l)}(x,y) + \operatorname*{sel}_R(90,270)\right) \bmod 360\right],\\
\Lambda_h^{(c)} &= \left[\lambda_h^{(c)}(x,y)\right] = \left[\left|\operatorname{scis}\left(a_h^{0(\vartheta(x,y))}(x,y), a_h^{4(\vartheta(x,y))}(x,y)\right)\right|\right],\\
\Lambda_h^{(l+)} &= \left[\lambda_h^{(l+)}(x,y)\right] = \left[\max_k q_h^{(k)}(x,y)\right],
\end{aligned}$$

где $\vartheta(x,y) \in \{0,1\}$ — метка канала-победителя в апертуре $A_h(x,y,w)$, доставляющая минимум критерию качества $\vartheta(x,y) = \arg\min\limits_k K_h^{(k)}(x,y)$; R — критерий выбора для угла направления кривизны, перпендикулярного потоку, определяемый как отношение порядка по формуле

$$R = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad \gamma_h^{0(\vartheta(x,y))}(x,y) + \gamma_h^{4(\vartheta(x,y))}(x,y) > 0,\\ 0, & \text{иначе}\end{cases}$$

и используемый для выбора по (11); $q_h^{(k)}(x,y)$ — достоверность дуги в апертуре $A_h(x,y,w)$, взвешиваемая функцией окна по формуле

$$q_h^{(k)}(x,y) = \sqrt{\cos(\varphi)}\min_{i\in I}\left\{m_h^{i(k)}(x,y)\right\}$$

с функциональным параметром φ как углом

$$\varphi = \begin{cases} \dfrac{90K_h^{(k)}}{k_m}, & \text{если} \quad K_h^{(k)} < k_m,\\ 90, & \text{иначе,}\end{cases}$$

для которого коэффициент k_m ограничивает допустимую наихудшую оценку дуги (2558 в реализации); индекс $i \in I = 0\ldots 7$; $k \in \{0,1\}$ — метка канала «тени» и «света».

Шестой этап

На шестом этапе матрицы

$$\left\{C_h^{(c)}, \Delta_h^{(c)}, \Lambda_h^{(c)}, \Delta_h^{(l)}, \Lambda_h^{(l)}, \Delta_h^{(f)}, C_h^{(f)}\right\}$$

проецируются с иерархии $h \in H$ на иерархию $h-1 \in H$ по формулам:

$$C_{h-1}^{(c)} = C_h^{(c)}, \quad \Delta_{h-1}^{(c)} = \Delta_h^{(c)}, \quad \Lambda_{h-1}^{(c)} = \Lambda_h^{(c)},$$
$$\Delta_{h-1}^{(l)} = \Delta_h^{(l)}, \quad \Lambda_{h-1}^{(l)} = \Lambda_h^{(l)}, \quad \Delta_{h-1}^{(f)} = \Delta_h^{(f)}, \quad C_{h-1}^{(f)} = C_h^{(f)}.$$

Для каждого ОП типа

$$c_{h-1}^{(f)}(x,y) \in \{W,L,D\}, \quad c_{h-1}^{(f)}(x,y) \in C_{h-1}^{(f)},$$

задается апертура $A_{h-1}(x,y,w_{pr}(h-1))$ по (2) размера $w_{pr}(h-1)$, в пределах которой искусственно расширяется область меток

$$c_{h-1}^{(f)}(u,v) \in A_{h-1}(x,y,w_{pr}(h-1)).$$

Это типичное расширение области поиска на иерархии $h-1$ необходимо для того, чтобы обеспечить возможность уточнения оценки местополо-

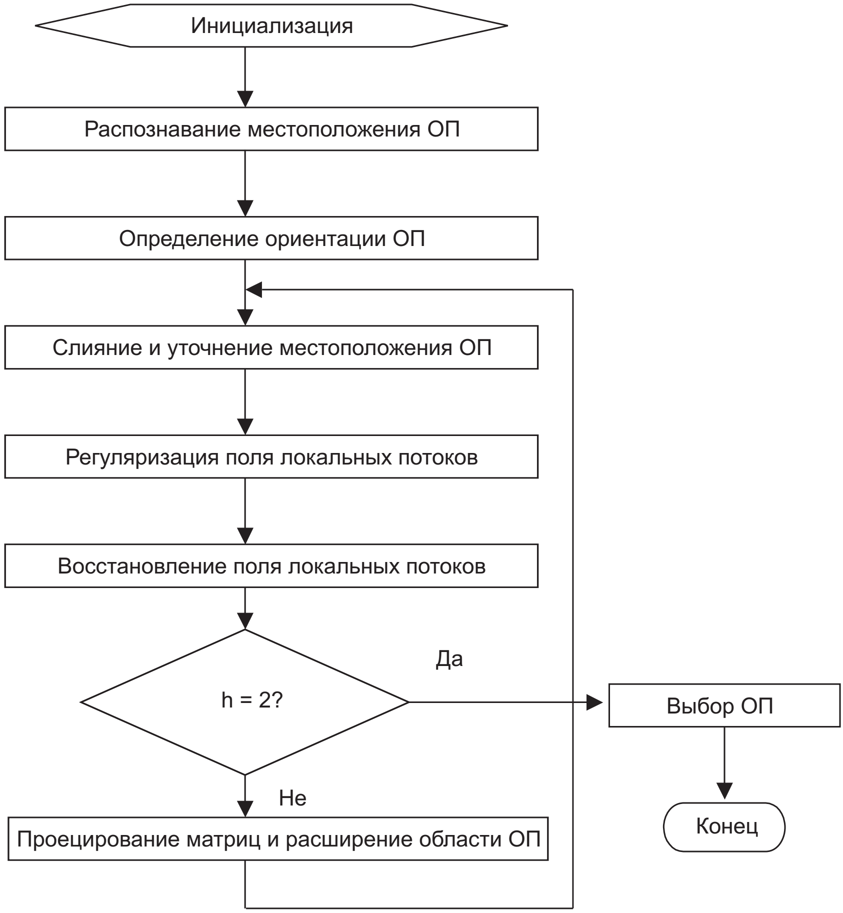

Рис. 11. Определение ОП по локальным потокам и каналам «тени» и «света»

жения ОП, если на иерархии h они определены грубо. Новое возможное местоположение ОП располагается в расширенной области.

Итерации по иерархиям

Описанные шесть этап обработки ДИ повторяются итерационно. На 4 иерархии (16×16) выполняются этапы 1–6, на 3 иерархии (8×8) выполняются этапы 3–6, поскольку ОП уже детектированы, на 2 иерархии (4×4) выполняются этапы 3–5, так как строить проекции более не требуется (рис. 11).

Дробная иерархия (4×4) оптимально уточняет местоположение ОП благодаря этапу 4 регуляризации поля потоков по модели ОП. Итерации на высоких иерархиях позволяют удалить часть ложных ОП. Так на рис. 9 рядом с массивом петель видно три ложные дельты. В результате же семикратного выполнения этапа 4 в разных иерархиях эти ложные петли исчезают. Такому эффекту способствует тот факт, что, несмотря на помехи, исходные потоки в каналах (не в одном, так в другом) преимущественно верно отражают направление папиллярных линий. Визуально это воспринимается так, что человек при разглядывании направлений $\Delta_h^{(l)}, \Delta_h^{(k)}$ (например на экране компьютера), правильно угадывает действительное местоположение завитков, петель и дельт.

Искусственное расширение области поиска, на первый взгляд, должно увеличить время выполнения процедуры. Однако за счет двукратного различия в мощности матриц соседних иерархий расширенная область интереса (только вокруг ОП) во много раз меньше мощности самой матрицы. Поэтому процедура быстро сходится и сходится тем быстрее, чем выше качество ДИ, так как при этом уменьшается количество ложных ОП. Среднее время расстановки ОП на отпечатках 500×500 обычно не превышает 1 секунды на машине 3 Ггц.

Седьмой этап

Целью заключительного этапа является набор множества ОП, детектированных на предшествующих этапах, и определение типа узора. Для этого измеряется вероятность ОП типа $c_h^{(f)}(x, y) \in \{W, L, D\}$ по формуле

$$P = \frac{N}{|A_h(x, y, w)|},$$

где $N = \left|\left\{ c_h^{(c)}(u, v) \mid (u, v) \in A_h(x, y, w) \,\&\, c_h^{(c)}(u, v) \neq \{\varnothing\} \right\}\right|$ — мощность множества отмеченных локальных потоков в апертуре; $|A_h(x, y, w)|$ — мощность апертуры; w — размер апертуры (4 в реализации); h — иерархия (16×16 в реализации). Оценка вероятности напоминает классический способ ее определения, но может быть уточнена замешиванием

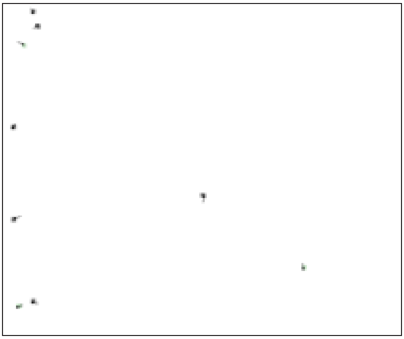

Рис. 12. Отмеченные петли и дельты после слияния с выделением общих признаков черточками, указывающих ориентацию, для иерархии 4×4

Рис. 13. Результаты распознавания пронумерованы. В перекрестии отмечена одна петля, другим цветом — одна дельта

в нее величин $\left\{\lambda_h^{(l)}(u,v) \mid (u,v) \in A_h(x,y,w)\right\}$ (аналог градиента [4, 5]). Все ОП сортируются по вероятности, набор ОП производится методом дендритов, причем ребрам графа дендритов присваиваются вероятности [8]. В результате выбираются наиболее правдоподобные ОП рис. 13.

На рис. 12 алгоритмом детектируется 9 возможных ОП иерархии 4×4. Однако из-за близкого расположения к краю ДИ многие из ОП маловероятны, и в результате выделяется одна петля и одна дельта (рис. 13). Финальное местоположения ОП огрубляется до центра соответствующего сегмента $c_2^{(c)}(x,y)$. Заметим, что несмотря на значительные дефекты изображения, петля и дельта расположены достаточно точно.

На основании выделенных ОП рассчитывается тип узора, который определяется грамматикой $G = (N, T, P, S)$ с конечным множеством продукций P вида

$$S \to A, \quad A \to a \mid dL, \quad L \to lT \mid LA \mid dW,$$
$$W \to wT \mid LL, \quad T \to + \mid - \mid \varnothing,$$

где четверка $N = \{A, L, W, T\}$ — множество нетерминальных символов; $T = \{a, l, w, +, -, \varnothing\}$ — множество терминальных символов; S — начальный символ грамматики. Прописные буквы соответствуют «расщепляющимся» ОП, а строчные — детектированным ОП. Здесь: $\{L, l\}$ — петля, $\{W, w\}$ — завиток, $\{A, a\}$ — дуга, $\{D, d\}$ — дельта, $\{+, -, \varnothing\}$ — признаки кручения по часовой стрелке, против часовой стрелки и без кручения. Кручение определяется взаимной ориентацией двух ближайших петель в сложнозавитковых узорах или петли и дельты в петлевых

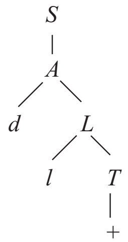

Рис. 14. Правая петля

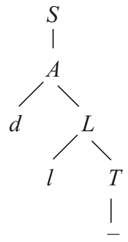

Рис. 15. Левая петля

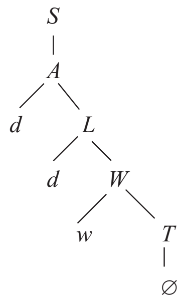

Рис. 16. Простой завиток

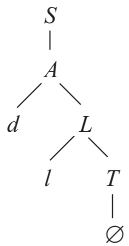

Рис. 17. Шатер

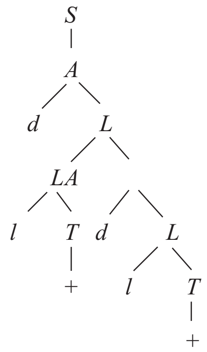

Рис. 18. Сложнозавитковый с кручением по часовой стрелке

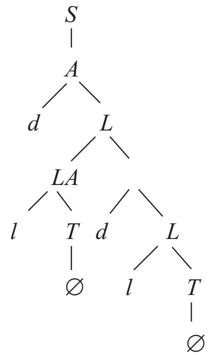

Рис. 19. Вытянутый овал

узорах. На рис. 14–19 представлены некоторые продукции грамматики, определяющие возможные типы узоров.

В простой грамматике $G = (N, T, P, S)$ предложение $ddw\varnothing$ определяет простой завитковый узор (рис. 16), а предложение $ddw\varnothing$ — вытянутый овал (рис. 19). Аналогично нетрудно получить узор $dddlw-$, состоящий из петли и завитка с кручением против часовой стрелки. Достоверность автоматического определения типа узора зависит от количества ОП, их типа, ориентации и минимальной вероятности ОП, вошедшего в предложение для типа узора.

3. Заключение

В статье предложен способ детектирования ОП, основанный на анализе адаптивных апертур для матриц потоков и соответствующих им достоверностей из двух независимых каналов. Способ включает распознавание ОП, определение их ориентации, слияние ОП и уточнение их местоположения, регуляризацию поля локальных потоков по модели потоков для ОП, восстановление поля локальных потоков, проецирование слоев данных на более дробные иерархии и повторение операций. Использование двух каналов позволяет повысить точность простановки ОП.

По набору ОП, получаемому методом дендритов, рассчитывается тип узора, который однозначно определяется набором ОП и описывается порождающей грамматикой. Классические типы узоров, такие как дуговой, шатровый, левая петля, правая петля, простой завитковый, сложнозавитковый, порождающая грамматика покрывает полностью. Она же позволяет описать и редкие узоры, такие как центральные пакеты или случайные типы узоров.

Литература

1. *Гудков В. Ю.* Двухканальный подход к определению поля потоков дактилоскопических изображений // Интеллектуальные информационные технологии. Концепции и инструментарий. Сборник статей ИСА РАН / Под. ред. член-корр. РАН, проф. В. Л. Арлазарова и д. т. н., проф. Н. Е. Емельянова. М.: УРСС, 2005.
2. *Гудков В. Ю.* Двухканальный подход к выделению опорного поля потоков дактилоскопических изображений // Системный подход к управлению информацией. Сборник статей ИСА РАН / Под. ред. член-корр. РАН, проф. В. Л. Арлазарова и д. т. н., проф. Н. Е. Емельянова. М.: УРСС, 2006.
3. *Кондратьев В. В.*, *Утробин В. А.* Основы теории активного восприятия изображений. Н. Новгород: НГТУ, 1997. 249 с.
4. *Марр Д.* Информационный подход к представлению и обработке зрительных образов у человека. М.: Радио и связь, 1987. 402 с.
5. *Прэтт У.* Цифровая обработка изображений: В 2 т. Т. 2. М.: Мир, 1982. 480 с.
6. *Р. Гонсалес*, *Р. Вудс.* Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. Под ред. П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2006. 1070 с.
7. *Davide Maltoni*, *Dario Maio*, *Anil K. Jain.* Handbook of Fingerprint Recognition. New York: Springer-Verlag, 2003. 348 p.
8. Статистика: Курс лекций / Харченко Л. П., Долженкова В. Г., Ионин В. Г. и др.; Под ред. к. э. н. В. Г. Ионина. Новосибирск: Изд-во НГАЭиУ; М.: ИНФРА-М, 1999. 310 с.