Оптимизация вычислительной сложности в двухкритериальном алгоритме распознавания с самообучением

Л.И. Лебедев[а], А.О. Шахлан[б], Ю.Г. Васин[а]

[а] ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603005, ул. Ульянова, 10, Нижний Новгород, Россия
[б] МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1, Москва, Россия

Аннотация

В работе предлагается модификация базового двухкритериального алгоритма распознавания с самообучением, направленная на увеличение быстродействия. Для этого в методе относительных смещений формирование циклических описаний перенесено на контур базового эталона и вынесено за рамки распознавания объекта. В исходном двухкритериальном алгоритме распознавание ведется с использованием всей совокупности полученных эталонов. Для увеличения быстродействия предлагается все эталоны поделить на две категории. Эталоны, полученные на основе базовой оценки сходства, предлагается выделить в отдельную базовую группу, образовав на их множестве соответствующие классы эквивалентности, заполнение которых осуществляется эталонами, отнесенными по дополнительной оценке близости. Теперь распознавание объекта будет вестись только по эталонам базовой группы и эталонам выбранного класса эквивалентности. Получены теоретические и практические оценки увеличения быстродействия модифицированного двухкритериального алгоритма распознавания.

Ключевые слова: алгоритм распознавания; интеллектуальный формат; эталон; графические изображение, критерии близости; расстояние Хаусдорфа; корреляционно-экстремальный контурный метод

1. Введение

Для более качественного распознавания и более точного описаний объектов графических изображений (ГИ) при формировании интеллектуального формата IFc используется двухкритериальный алгоритм распознавания с самообучением, который базируется на вычислении двух оценок близости контуров эталона $\mathbf{E}$ и объекта $\mathbf{O}$ [1]. Использование дополнительной оценки близости влечет увеличение, иногда очень значительное, количества эталонов и как следствие увеличение времени распознавания. Одним из вариантов уменьшения времени распознавания в режиме с самообучением заключается в автоматическом построении иерархического классификатора [2]. Однако этот вариант не является удачным решением при формировании формата IFc, так как в итоге ведет к увеличению числа эталонов относительно базового алгоритма и, как следствие, к уменьшению коэффициента сжатия ГИ. Практически не дает необходимой эффективности и распараллеливание базового алгоритма распознавания на компьютерах с числом ядер процессора меньше четырех. Поэтому, предлагаемые здесь способы увеличения быстродействия работы алгоритма распознавания базируются исключительно на конструктивном изменении схемы получения результирующей оценки близости объекта с эталонами.

2. Критерии оценок близости описаний контуров

Базовой оценкой близости контуров при распознавании с самообучением является среднеквадратическая ошибка $\varepsilon_m(\mathbf{E},\mathbf{O},Q^*)$, инвариантная относительно ортогональных преобразований и масштабирования (ОПМ) и вычисление которой осуществляется по формуле [3]:

$$\varepsilon_m(\mathbf{E},\mathbf{O},Q^*) = \mathbf{Dw^e} - \frac{\mathrm{R}^2}{\mathbf{Dw}}, \tag{1}$$

где $\mathbf{Dw^e} = \mathbf{Dx^e} + \mathbf{Dy^e} = \mathrm{cov}(\mathbf{x^e},\mathbf{x^e}) + \mathrm{cov}(\mathbf{y^e},\mathbf{y^e})$, $\mathbf{Dw} = \mathbf{Dx} + \mathbf{Dy} = \mathrm{cov}(\mathbf{x},\mathbf{x}) + \mathrm{cov}(\mathbf{y},\mathbf{y})$ – дисперсии эталона и объекта соответственно; $\mathrm{R}^2 = \mathrm{Sn}^2 + \mathrm{Cs}^2$, $\mathrm{Cs} = \mathrm{cov}(\mathbf{x^e},\mathbf{x}) + \mathrm{cov}(\mathbf{y^e},\mathbf{y})$, $\mathrm{Sn} = \mathrm{cov}(\mathbf{x^e},\mathbf{y}) - \mathrm{cov}(\mathbf{y^e},\mathbf{x})$. Величина оценки $\varepsilon_m(\mathbf{E},\mathbf{O},Q^*)$ находится при оптимальных значениях параметров ОПМ наложения контуров $\mathrm{tg}\alpha = \mathrm{Sn}/\mathrm{Cs}$, $k = \mathrm{R}/\mathbf{Dw}$, $\mathbf{\Delta w} = \overline{\mathbf{w}}^{\mathbf{e}} - k \cdot A \cdot \overline{\mathbf{w}}$, A - матрица вращения. Начальные моменты первого и второго порядка находятся по формулам:

$$\overline{\mathbf{w}}^{\mathbf{e}} = \mathbf{Mw}^{\mathbf{e}} = \frac{1}{2\cdot S^{\mathrm{e}}} \cdot \sum_{i=1}^{m-1} (\mathbf{w_i^e} + \mathbf{w_{i+1}^e}) \cdot S_i^{\mathrm{e}} \ , \quad \mathbf{My}^2 = \frac{1}{3\cdot S} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (y_i^2 + y_{i+1}^2 + y_i \cdot y_{i+1}) \cdot S_i \ , \tag{2}$$

где $\mathbf{w^e} = \{\mathbf{w_1^e}, \mathbf{w_2^e}, ..., \mathbf{w_m^e}\}$, $\mathbf{w} = \{\mathbf{w_1}, \mathbf{w_2}, ..., \mathbf{w_n}\}$, $\mathbf{w} = (x,y)^T$ исходные описания контуров эталона и объекта соответственно, а S_i^e, S_i длины ребер контуров. Вычисления смешанных моментов второго порядка осуществляются по вспомогательным описаниям $\widehat{\mathbf{w}}_{\mathbf{j}}^{\mathbf{e}} = (\widehat{x}_j^e, \widehat{y}_j^e)^T$ и $\widehat{\mathbf{w}}_{\mathbf{j}} = (\widehat{x}_j, \widehat{y}_j)^T$, $j = 1,2,...,l \le m+n-2$ эталона и объекта соответственно:

$$\mathbf{Mx^e y}=\frac{1}{6\cdot S^e}\cdot\sum_{i=1}^{l-1}(2\cdot\widehat{x}_i^e\cdot\widehat{y}_i+2\cdot\widehat{x}_{i+1}^e\cdot\widehat{y}_{i+1}+\widehat{x}_i^e\cdot\widehat{y}_{i+1}+\widehat{x}_{i+1}^e\cdot\widehat{y}_i)\cdot\widehat{S}_i^e \quad . \tag{3}$$

Для получения вспомогательного описания объекта на его контуре формируются дополнительные точки, отстоящие друг от друга по длине контура на расстоянии $\lambda\cdot S_i^e$, $i=1,2,...,m$, где $\lambda=S/S^e$ - отношение длин контуров объекта и эталона. Аналогично, на контуре эталона вставляются точки, отстоящие друг от друга на расстоянии $\lambda^{-1}\cdot S_i$, $i=1,2,...,n$. Оценка близости (1) вычисляется по согласованным описаниям эталона и объекта на основе решения оптимизационной задачи вида:

$$\varepsilon_{\min}(\mathbf{E},\mathbf{O})=\varepsilon_m(\mathbf{E},\mathbf{O},Q^*)=\min_{s\in[o,S]}\varepsilon_m(\mathbf{E},\mathbf{O},s) \tag{4}$$

Вторым критерием для оценки близости является расстояние Хаусдорфа d_H , которое находится по формуле (5) при оптимальном совмещении контуров эталона $C_{\mathbf{E}}$ и объекта $C_{\mathbf{O}}$:

$$d_H=\max\left\{\sup_{\mathbf{z}\in\mathbf{C_E}}\inf_{\mathbf{v}\in\mathbf{C_O}}\|\mathbf{z}-\mathbf{v}\|,\ \sup_{\mathbf{v}\in\mathbf{C_O}}\inf_{\mathbf{z}\in\mathbf{C_E}}\|\mathbf{z}-\mathbf{v}\|\right\} \tag{5}$$

Нахождение расстояния Хаусдорфа d_H при непосредственной реализации формулы (5) в вычислительном плане является трудоемкой задачей. Поэтому, в рассматриваемом двухкритериальном алгоритме распознавания вместо вычисления точного значения расстояния Хаусдорфа d_H используется его оценка δ_H . Более того, и сама оценка δ_H тоже находится только при выполнении определенных условий.

3. Двухкритериальный алгоритм распознавания с самообучением

Алгоритм распознавания на основе оценок близости (1),(5) реализует следующую последовательность операций. Для каждого эталона $\mathbf{E^j}$, $j=1,2,...,L$ вычисляется оценка $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^j},\mathbf{O})$, среди которых находится наименьшая $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})$. Если эта оценка больше заданного порога $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})>\gamma$, то на основе описания объекта $\mathbf{O}$ формируется новый эталон. При $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})<\gamma$ по вспомогательным согласованным описаниям эталона $\mathbf{E^{j^*}}$ и объекта $\mathbf{O}$ вычисляется оценка δ_H . Если $\delta_H>\sigma$, то аналогичным образом формируется новый эталон, иначе объект считается распознанным.

4. Оптимизация вычислений в двухкритериальном алгоритме распознавания с самообучением

Рассмотрим две возможности увеличения быстродействия рассматриваемого алгоритма распознавания. Решение задачи нахождения согласованных описаний методом относительных смещений предполагает формирование циклических описаний контура объекта $\mathbf{O}$ при различных положениях начальной точки (отстоящих от исходного положения на величину $s_i=i\cdot\Delta S$, $i=1,2,...,N$) и нахождением оценок $\varepsilon_m(\mathbf{B},\mathbf{O},s_i)$, где $\mathbf{B}$ базовый эталон. Необходимость формирования этих описаний можно исключить, если вместо циклических описаний объекта использовать циклические описания базового эталона, оставив неизменным описание объекта. Циклические описания базового эталона можно получить заранее, вне рамок распознавания объектов, и это позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма.

Следующая модификация рассматриваемого двухкритериального алгоритма распознавания с самообучением связана с изменением структуры самого алгоритма. В исходном алгоритме распознавания был единый список эталонов, который формировался на основе нераспознанных объектов, полученных как по базовой оценке близости $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})$, так и по дополнительной оценке δ_H . В модифицированном алгоритме распознавания формируются два списка эталонов. Список $\mathbf{V}$ эталонов $\mathbf{E^j}$, $j=1,2,...,M_\varepsilon$ формируется за счет объектов, для которых оценка близости $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})$ превышает заданный порог. Каждый эталон $\mathbf{E^{j^*}}$ порождает другой список эталонов, которые формируются на основе объектов, удовлетворяющих неравенству $\delta_H>\sigma$ с одной стороны и $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})<\gamma$ с другой стороны (оценка близости объекта с этим эталоном $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})$ является минимальной среди всех оценок из первого списка). Таким образом, каждый эталон $\mathbf{E^{j^*}}$ из списка $\mathbf{V}$ порождает класс эквивалентности $K(\mathbf{E^{j^*}})$, включающий множество эталонов, у которых оценки расстояний Хаусдорфа превышают заданный порог.

Таким образом, схема распознавания модифицированного алгоритма выглядит следующим образом.

1. Для $\forall\mathbf{E^j}\in\mathbf{V}$ вычисляются оценки близости $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^j},\mathbf{O})$, среди которых находится наименьшая $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})$.
2. Если $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{j^*}},\mathbf{O})>\gamma$, то объект $\mathbf{O}$ заносится в список эталонов $\mathbf{V}$. Переход к распознаванию нового объекта. Иначе среди $\mathbf{E^v}\in K(\mathbf{E^{j^*}})$ находится оценка близости наименьшим значением $\varepsilon_{\min}(\mathbf{E^{v^*}},\mathbf{O})$.
3. По описанию эталона $\mathbf{E^{v^*}}$ находится восстановленное описание объекта $\widetilde{\mathbf{O}}$. По описаниям $\mathbf{O}$ и $\widetilde{\mathbf{O}}$ находится оценка δ_H .
4. Если $\delta_H>\sigma$, то объект $\mathbf{O}$ заносится в список эталонов класс эквивалентности $K(\mathbf{E^{j^*}})$. Переход к распознаванию нового объекта.
   Иначе объект $\mathbf{O}$ считается распознанным с присвоением метки эталона $\mathbf{E^{v^*}}$.

Анализ модифицированного алгоритма позволяет оценить эффективность предложенной схемы вычислений. Как следует из анализа, число вычислений базовых оценок близости не превосходит суммарного количества эталонов в списке $\mathbf{V}$ и классе эквивалентности $K(\mathbf{E}^{\mathbf{j}^*})$ при распознавании каждого объекта. Это число значительно меньше общего количества полученных эталонов. Верхней границей увеличения быстродействия является число, равное отношению общего количества получаемых эталонов к их среднему количеству в классах эквивалентности.

5. Заключение

Проведенные эксперименты на различного рода графических документах подтвердили теоретические оценки ожидаемого увеличения быстродействия модифицированного двухкритериального алгоритма распознавания с самообучением. Если предположить, что набор эталонов, получаемых от применения дополнительного критерия на расстояние Хаусдорфа, распределяется равномерно по базовым эталонам, то увеличение быстродействия будет в среднем оцениваться величиной $k_s = n/(m + n/m - 1)$, где n - общее количество эталонов, а m - базовых. Так как увеличение быстродействия зависит от многих факторов, то его реальное значение может быть как меньше, так и больше величины k_s для каждого конкретного графического документа. В качестве примера приведем данные, полученные для изображения навигационной морской карта, фрагмент которой представлен на рис. 1. Векторное описание данного документа представлено 22472 контурами, из которых 18899 подаются на вход алгоритма распознавания. Для распознавания этих объектов базовым алгоритмом было сформировано 761 эталон (m), а при использовании двухкритериального алгоритма с самообучением при $\delta_H = 3$ было получено 2704 эталона (n). Для компьютера Intel core'2 времена работы алгоритмов составили 5 минут и 19 минут 43 секунды соответственно. Таким образом, ожидаемое увеличение быстродействия при применении модифицированного двухкритериального алгоритма оценивается величиной $k_s \approx 3.5$, что соответствовало бы времени работы в 5минут 38 секунд. В реалии время работы модифицированного двухкритериального алгоритма на данном документе составило 7 минут 18 секунд, что соответствует увеличению быстродействия в 2.7 раз. На быстродействие алгоритма здесь негативно повлияло неравномерное распределение по базовым эталонам дополнительно формируемых эталонов на основе использования второго критерии сходства. Здесь только для 205 из 761 базовых эталонов, представляющих цифры, соблюдаются указанные требования равномерного распределения. 317 базовых эталонов представляют эксклюзивные объекты и не образуют классы эквивалентности, то есть не порождают эталоны на базе второй оценки сходства. Остальная часть базовых эталонов также представляет малое количество объектов изображения, которые тоже не могут дать необходимого для обеспечения быстродействия числа дополнительных эталонов.

Другим существенным отличием модифицированного алгоритма является возможность получения за один проход сразу два набора эталонов, таких, которые соответствуют последовательному выполнению, как однокритериального алгоритма распознавания, так и исходного базового двухкритериального алгоритма. Последняя характеристика модифицированного алгоритма распознавания является особенно важной при реализации IA – технологии идентификации эталонов [4]. Применение его в этой технологии дает возможность осуществления интерактивной идентификации эталонов $\mathbf{E}^{\mathbf{j}^*}$ из множества $\mathbf{V}$ с одновременной автоматической кодировкой эталонов соответствующего класса эквивалентности $K(\mathbf{E}^{\mathbf{j}^*})$.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 16-11-00068.

Литература

[1] Лебедев, Л.И. Двухкритериальный алгоритм распознавания объектов графических изображений на базе КЭКМ / Л.И. Лебедев, Ю.Г. Васин // Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции ГРАФИКОН2015, Протвино, ИФТИ, 2015. С. 112-114.

[2] Рябушева, А.Д. Структурная оптимизация алгоритма распознавания на базе КЭКМ / А.Д. Рябушева, Л.И. Лебедев // Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции ГРАФИКОН2015, Протвино, ИФТИ, 2015. С. 150-153.

[3] Лебедев, Л.И. Корреляционно – экстремальные контурные методы распознавания. Теоретические основы: Учебное пособие./ Л.И. Лебедев. – Нижний Новгород, Изд-во Нижегородского государственного университета, 2013. – 113 с.

[4] Васин, Ю.Г. Оптимизация временных затрат в информационных технологиях создания цифровых большеформатных графических документов / Ю.Г. Васин, Л.И. Лебедев // Труды Международной конференции «Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности (SCVRT1516)», Пущино,ЦарьГрад, ИФТИ, 2016. С. 279-282.

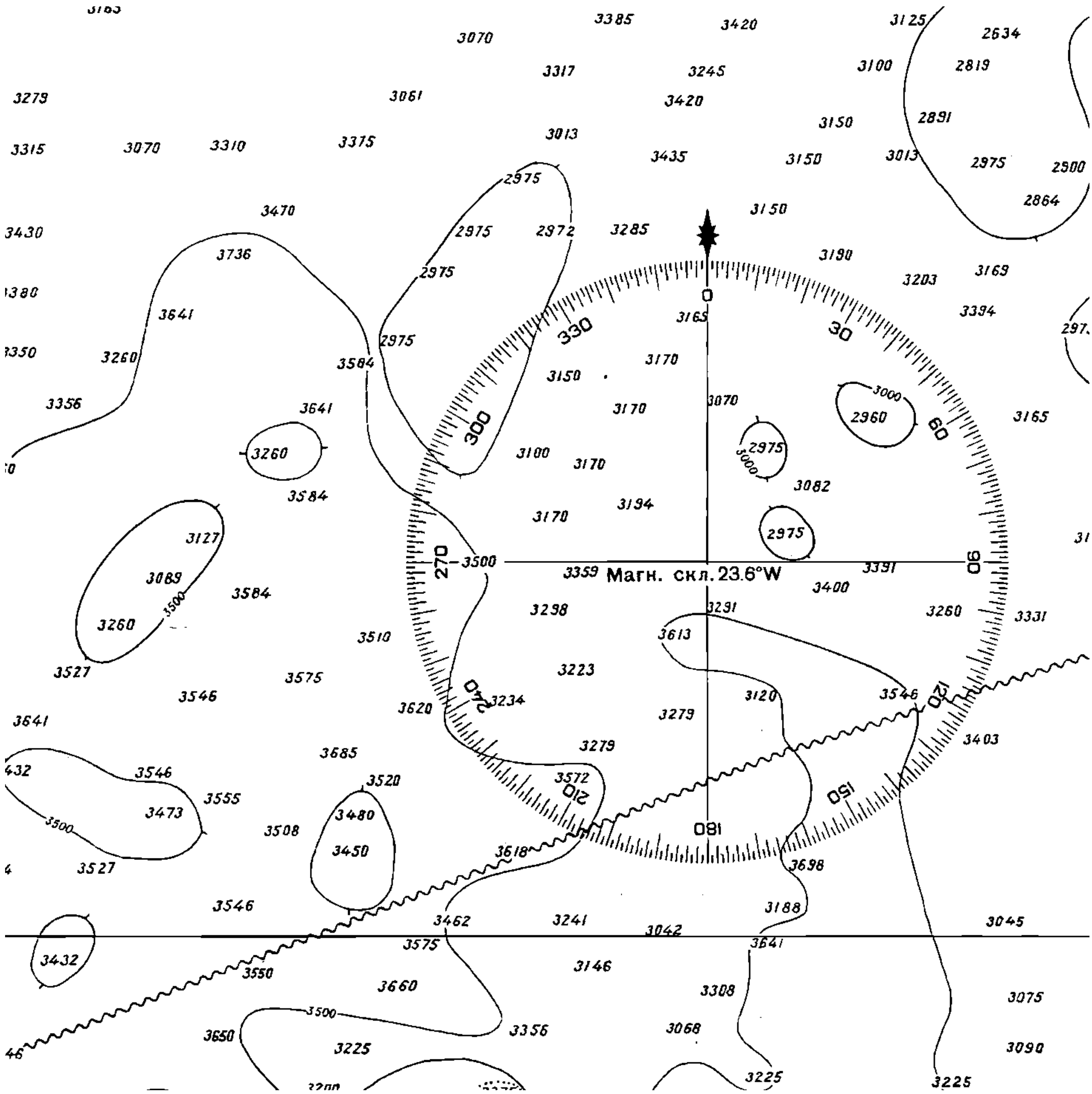

Рис. 1. Фрагмент навигационной морской карты.