

Ю.Н.Филиппович, И.А.Зеленцов

РАСПОЗНАВАНИЕ СКОРОПИСИ XVII в.

Введение

Скоропись — форма кириллического письма, возникшая во второй половине XIV в. Последующее ее развитие и, начиная с XVII в., активное использование в канцеляриях и школах привело в XIX в. к возникновению сегодняшнего рукописного шрифта. В центральных и некоторых областных архивах сохранилось немало произведений XVI-XVII вв., написанных скорописью. В основном это тексты делового характера [1]. Скорописные рукописи XVII в. являются важным источником научных исследований древнерусской языковой культуры.

Основными особенностями скорописи являются (рис.1): сокращение слов; вынос букв наверх строки; вариация форм букв, в зависимости от их соседства; соединение букв в слове; размашистые (декоративные) росчерки пера; отсутствие чётких промежутков между буквами и словами; случай-

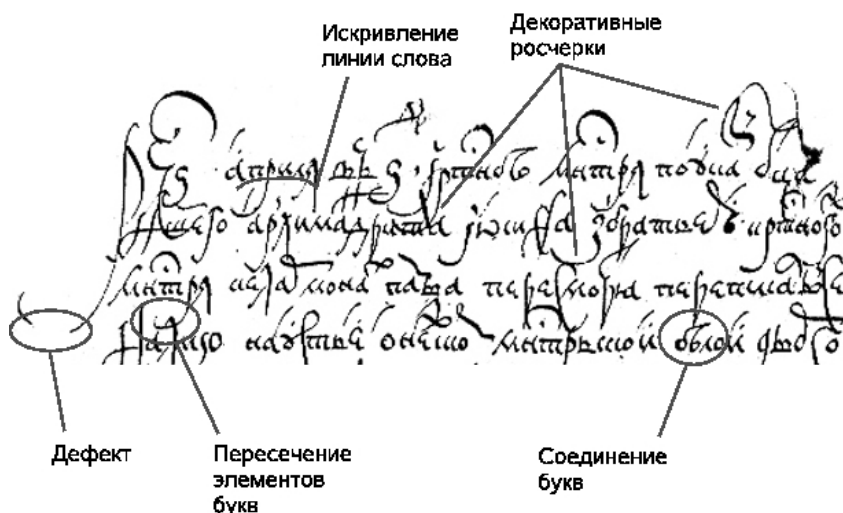


Рисунок 1: Фрагмент древнерусского скорописного текста XVII в.

ные пересечения штрихов букв; искривления линии написания слов и строк; дефекты начертаний.

В работах [5,8], посвящённых разработке технологии электронного издания некоторых скорописных документов XVII в., был предложен метод «пословного перевода» — автоматического выделения прямоугольных областей слов в изображениях скорописного текста и сопоставления их со словами текста, предварительно полученного путём набора современным алфавитом.

В современных условиях массового переноса исторических документов на электронные носители и формирования фондов их факсимильных образов возникает необходимость «классического» решения задачи распознавания скорописных текстов — «побуквенного перевода» их содержания, для последующего научного исследования.

В [2] предложена методика распознавания скорописных текстов на основе структурного подхода [6], позволяющая осуществить распознавания слов и букв текста, и система распознавания, основной составной частью которой является база знаний (БЗ) структурных описаний букв распознаваемого алфавита и слов, составляющих словник системы.

Принципы распознавания

Для распознавания буквы необходимо выделить и определить её составные части. Этой цели может служить механизм векторизации входного растрового изображения. Алгоритм векторизации (*трассировщик*) должен

произвести анализ изображения и представить совокупности точек, образующие различные штрихи-элементы букв, в виде геометрических объектов, имеющих известные свойства. В решении этой задачи может быть задействован механизм скелетизации изображения [3,9] или метод восстановления траектории движения пера [4]. Алгоритм распознавания (*распознаватель*), реализует структурный анализ, выполняет оценку состава и отношений полученных примитивов. Наличие образцов структур букв позволяет распознавателю прогнозировать поступление информации об изображении и управлять продвижением трассировщика. Таким образом, задача выделения отдельных букв становится частью процесса распознавания.

Процесс управления распознаванием основан на принятии гипотезы о наблюдаемом объекте и её целенаправленной проверке путём поиска предполагаемых элементов на изображении. Имея привязку к определённой точке изображения и предположения об окружающих её элементах, можно назначить последовательность проверок этих предположений, производя последовательный разбор изображения в соответствии с этим порядком. В случае не подтверждения гипотезы, информация, полученная к данному моменту, сохраняется и служит для выбора другой гипотезы.

Подход, основанный на подтверждении гипотез, позволяет решать проблемы непредсказуемых декоративных элементов букв и случайных пересечений линий. Проверка гипотезы подразумевает поиск только тех

элементов изображения, которые составляют образец предполагаемой буквы, и оставляет без внимания все лишние факты.

Структурное описание букв

Объектами распознавания модуля “распознаватель букв” (РБ) системы являются буквы скорописи. Формально база знаний фреймового описания структуры объекта распознавания представляется выражением:

$$B = (D, E, F) = (D, E, Q \cup R), \quad (1)$$

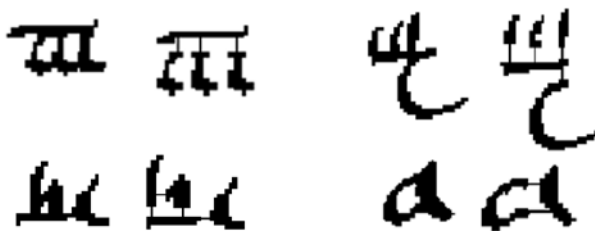
где $D = \{d \mid \text{ДетализируемыйУзел}(d)\}$ – множество детализируемых узлов;
 $E = \{e \mid \text{Элемент}(e)\}$ – множество элементов;
 $F = \{f \mid \text{ВхождениеСвойства}(q)\}$ – множество вхождений свойств;
 $Q = \{q \mid \text{ВхождениеЭлемента}(q)\} \subseteq F$ – множество вхождений элементов;
 $R = \{r \mid \text{ВхождениеОтношения}(r)\} \subseteq F$ – множество вхождений отношений.

Узлы, описывающие в базе знаний буквы скорописи, имеют тип *Буква*. Неотъемлемым атрибутом каждого из таких узлов является ее код. Для описания структур начертаний букв вводится тип узлов *НачертаниеБуквы*, как подтип *ДетализируемогоУзла*. Узлы-*Буквы* входят в структуры слов и являются *Элементами*.

$\text{Буква} \equiv \text{Элемент } \Pi (= \text{имеетКод.Число}) \Pi (\text{имеетНачертаниеБуквы} \subseteq \text{имеетОписание}) \Pi$
 $\Pi (\geq \text{имеетНачертаниеБуквы.НачертаниеБуквы});$
 $\text{НачертаниеБуквы} \equiv \text{ДетализируемыйУзел}.$

В [2] предполагается, что, поскольку процесс начертания символа состоит из нескольких непрерывных перемещений пишущего инструмента (пера) по бумаге (рис. 2), начертание символа может быть структурно представлено описанием траекторий каждого из перемещений (штрихов,

или линий), с указанием их взаимных положений и пересечений.



Линия во фреймовой сети представляется узлом типа *Линия*;

Рисунок 2: Декомпозиция букв скорописи на отдельные штрихи

он содержит слот *путь*, хранящий значение чёткого описания пути линии в виде строки, а также слот *форма*, указывающий значение угла диагонали описывающего прямоугольника линии.

Линия \equiv Элемент П (= 1*путь*.*Строка*) П (= 1*форма*.*Число*);
ВхождениеЛинии \equiv *ВхождениеЭлемента П* Эиндицирует.*Линия П*
 П \forall детализирует.*НачертаниеБуквы*

Для описания точек пересечений вводится тип узлов *Точка* как подтип *Элемента*. Точки имеют по два слота-значения, отражающих их позицию внутри области содержащих их линий:

Точка \equiv Элемент П (= 1*горПоз*.*Число*) П (= 1*вертПоз*.*Число*);
ВхождениеТочки \equiv *ВхождениеЭлемента П* Эиндицирует.*Точка П*
 П \forall детализирует.*НачертаниеБуквы*.

В каждой из пересекающихся *Линий* при помощи узла типа *ПринадлежностьТочки* должна быть указана *Точка*, в которой данную линию пересекает другая. Пары точек пересечения линий связываются узлом типа *СоответствиеТочек*. Иллюстрация описания пересечения двух линий приведена на рисунке 3.

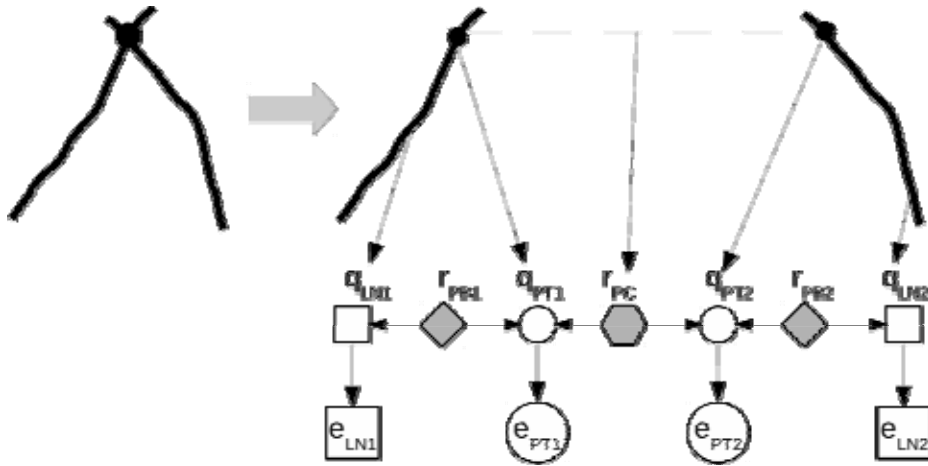


Рисунок 3: Описание пересечения двух линий

Принадлежность Точки \equiv *Вхождение Отношения* П

П (точка \subseteq включает Вхождение) П (принадлежит Линии \subseteq включает Вхождение) П

П (= 1 точка. Вхождение Точки) П (= 1 принадлежит Линии. Вхождение Линии) П

П \forall детализирует. Начертание Буквы;

Соответствие Точек \equiv *Вхождение Отношения* П

П (соответствующая Точка \subseteq включает Вхождение) П

П (= 2 соответствующая Точка. Вхождение Точки) П \forall детализирует. Начертание Буквы.

В структурных описаниях начертаний букв используются указания относительного расположения элементов на изображении при помощи узлов типа *Слева-Справа* и *Выше-Ниже*.

Пространственное Отношение \equiv *Вхождение Отношения* П (= 1 степень. Число);

Слева – Справа \equiv *Пространственное Отношение* П (слева \subseteq включает Вхождение) П

П (справа \subseteq включает Вхождение) П (= 1 слева) П (= 1 справа).

Состав БЗ, введённый в выражении (1), теперь можно раскрыть как:

$$D = D_L; E = E_L \cup E_{LN} \cup E_{PT}; Q = Q_{LN} \cup Q_{PT}; R = R_{проект} \cup R_{PB} \cup R_{PC}, \quad (2)$$

где: D_L — множество узлов-Начертаний Букв, E_L — множество узлов-Букв,

E_{LN} — множество узлов-Линий, E_{PT} — множество узлов-Точек, Q_{LN} —

множество узлов типа *Вхождение Линии*, Q_{PT} — множество

Вхождений Точек, R_{PB} — множество узлов типа *Принадлежность Точки*, а

R_{FC} — типа *СоответствиеТочек*, $R_{простр} = R_{LR} \cup R_{HL}$: R_{LR} — множество вхождений отношений типа *Слева-Справа*, R_{HL} — типа *Выше-Ниже*.

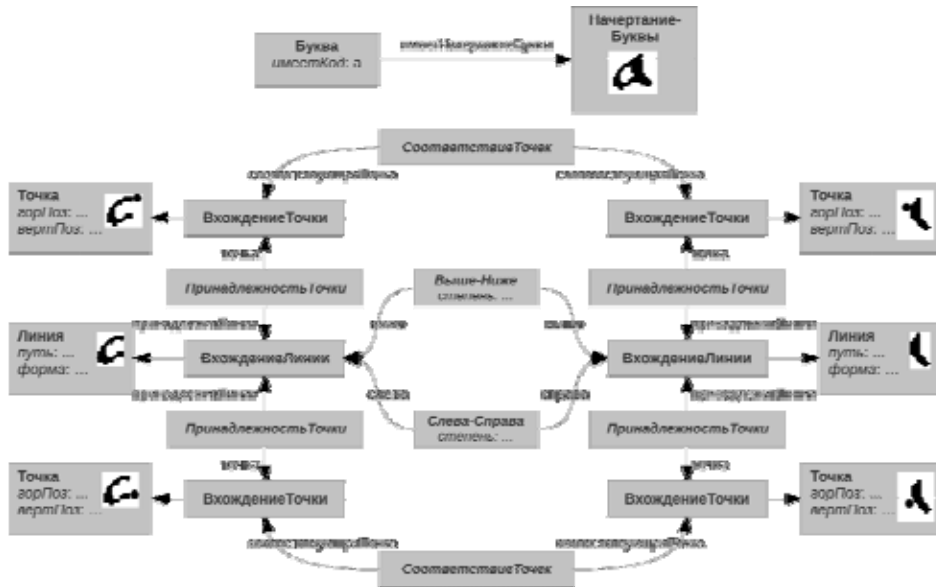


Рисунок 4: Пример фрейма начертания буквы 'а'

На рисунке 4 приведён пример фрейма, описывающего начертание буквы 'а'. Узлы с типом *ВхождениеСвойства* имеют не показанные на рисунке связи типа *детализирует* с узлом типа *НачертаниеБуквы*.

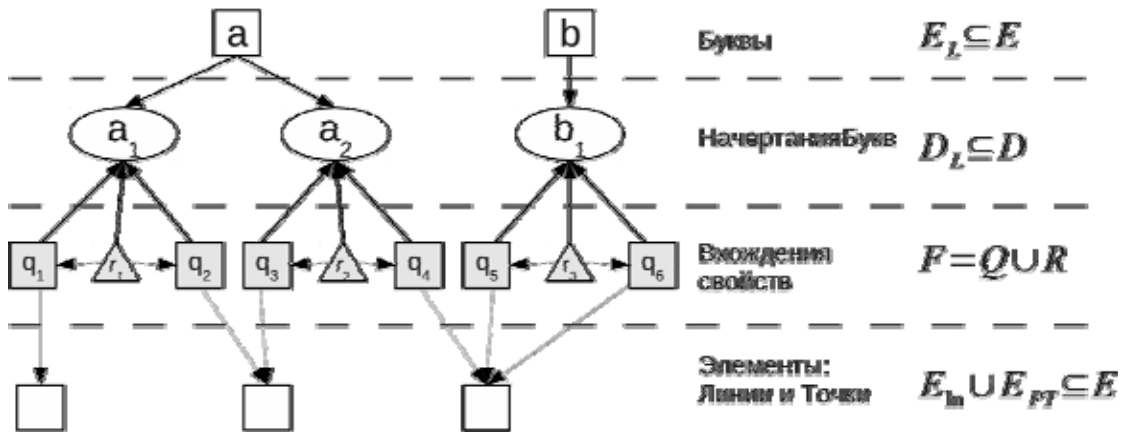


Рисунок 5: Структурные описания букв и их начертаний

На рисунке 5 проиллюстрирован общий принцип построения фреймовых описаний букв. Множество фреймов с корневыми узлами типа *На-*

*чертание*Буквы содержат собственные узлы типа *ВхождениеСвойства*, ссылающиеся на набор разделяемых всеми фреймами узлов типа *Элемент*, т.е. *Линии* и *Точки*.

В зависимости от фактического наполнения БЗ может характеризоваться следующими показателями фреймовых описаний начертаний букв:

Среднее число вхождений линий в начертании (фрейме):

$$\tilde{n}_{\text{БЛ}} = \left\lceil \frac{|Q_{LN}|}{|D_L|} \right\rceil;$$

Среднее число вхождений линий различных типов в начертании:

$$\tilde{n}_{\text{БР}} = \left\lceil \frac{\sum_{a \in D_L} |\{x \in E_{LN} \mid \exists q \in Q_{LN}(a) \text{ инцидирует}(q, x); \}|}{|D_L|} \right\rceil;$$

Среднее число вхождений линии данного типа в одно начертание буквы БЗ:

$$\tilde{n}_{\text{ЛЮ}} = \left\lceil \frac{\tilde{n}_{\text{БЛ}}}{\tilde{n}_{\text{БР}}} \right\rceil; \quad (3)$$

Среднее число вхождений линии данного типа во все начертания БЗ:

$$\tilde{n}_{\text{ЛБ}} = |D_L| \tilde{n}_{\text{ЛЮ}} = |D_L| \left\lceil \frac{\tilde{n}_{\text{БЛ}}}{\tilde{n}_{\text{БР}}} \right\rceil; \quad (4)$$

Среднее число пересечений линий в начертаниях:

$$\tilde{n}_{\text{пер}} = \left\lceil \frac{|R_{PC}|}{|D_L|} \right\rceil.$$

Оценим среднее число узлов-вхождений в описание одного начертания буквы:

$$\begin{aligned} \tilde{n}_{\text{Л}}(a) &= |Q(a)| + |R(a)| = |Q_{LN}(a)| + |R_{\text{просп}}(a)| + |Q_{PT}(a)| + |R_{PB}| + |R_{PC}| = \\ &= \tilde{n}_{\text{БЛ}} + 2C_{\tilde{n}_{\text{БЛ}}}^2 + 2\tilde{n}_{\text{пер}} + 2\tilde{n}_{\text{пер}} + \tilde{n}_{\text{пер}} = \tilde{n}_{\text{БЛ}} + 2C_{\tilde{n}_{\text{БЛ}}}^2 + 5\tilde{n}_{\text{пер}}. \end{aligned}$$

Правила согласования элементов букв

Информация о находимых трассировщиком структурных элементах букв заносится в динамическую память системы в виде Виртуального Фрейма (ВФ), который аналогичен фреймам букв и опирается на существующие узлы-*Элементы* в БЗ. Задача распознавания сводится к попытке установления соответствия между узлами ВФ и одного из фреймов в БЗ.

Вхождения Элементов могут быть согласованы, если они индицируют один и тот же *Элемент*, а *Вхождения Отношений* согласуются только тогда, когда все связываемые ими *Вхождения Элементов* соответственно согласованы. Совпадающие узлы точек пересечения согласуются только если линии, которым они принадлежат, согласованы между собой.

Алгоритм распознавания основан на выдвигении и проверке гипотез об анализируемом начертании буквы. *Гипотеза* представляется динамической фреймовой структурой, хранящей ссылку на предполагаемый гипотезой фрейм-Букву в БЗ, а также множество пар ссылок на узлы во фрейме БЗ и в ВФ, согласованные между собой в рамках данной гипотезы.

Весовые функции для фреймов букв

Учитывая, что $\forall a \in D_L \quad F(a) = Q(a) \cup R(a)$ и выражение (2), введём функцию веса $w_L : F(a) \rightarrow \mathbb{R}$ над наборами вхождений элементов начертаний букв $F(a)$ следующим образом:

$$w_L(F(a)) = |Q_{LN}(a)| * \alpha_{LN} + |Q_{PT}(a)| * \alpha_{PT} + |R_{\text{фростр}}(a)| * \alpha_{\text{фростр}} \quad (5)$$

где α_{LN} , α_{PT} , $\alpha_{простр} \in \mathbb{R} \geq 0$ — весовые коэффициенты вхождений линий, точек и пространственных отношений соответственно. Введём также функцию веса $w_L : h \rightarrow \mathbb{R}$ для гипотезы h относительно *НачертанияБуквы*:

$$w_L(h) = |S_{LN}(h)| * \alpha_{LN} + |S_{PT}(h)| * \alpha_{PT} + |S_{простр}(h)| * \alpha_{простр} \quad (6)$$

где $S_{LN}(h) = \{s \in S(h) \mid \text{узел}BЗ(s, f) \cup \text{узел}BФ(s, f) \Rightarrow \text{ВхождениеЛинии}(f)\}$, а остальные члены определяются по аналогии. Весовые коэффициенты вводятся для учёта различия значимости элементов структурных описаний для процесса согласования фреймов.

На основе введённых весовых функций вычисляются формальные характеристики гипотез, используемые при распознавании: степень согласованности гипотезы $N^{согл}$, условие полной пригодности гипотезы $U^{п.приг.}$ и условие подтверждённости гипотезы $U^{подтв.}$.

Весовая функция проверенности

$$w_{LN}(F(a)) = |Q_{LN}(a)| \quad (7)$$

используется для вычисления степени проверенности $N^{пров.}(h)$ гипотез. Её задачей является вычисление веса набора узлов с учётом только узлов типа *ВхождениеЛинии*, которые являются существенными для распознавания.

Алгоритм распознавания букв

В начале работы процедуры согласования, после нахождения первой произвольной линии, имеется набор гипотез, одна из которых

($h_{max} \in H$, $принадлежит(h, a \in D_L)$) назначена текущей, и во всех гипотезах фигурирует входение найденной линии. Отталкиваясь от текущей линии $q_{LN1}(a)$ (рис. 6), по описанию фрейма a в БЗ можно узнать, какие точки пересечения должна иметь эта линия в наблюдаемой букве. Для каждой точки $q_{PT1}(a)$ определяется вид ожидаемой пересекающей линии e_{LN2} , и эта информация передаётся трассировщику в виде гипотезы. В ВФ добавляется узел входения $q_{LN2}(b)$ найденной линии e_{LN2} , а также узел входения q_{PT2} найденной точки пересечения e_{PT2} с соответствующими узлами принадлежности и соответствия точек, если пересечение имеет место.

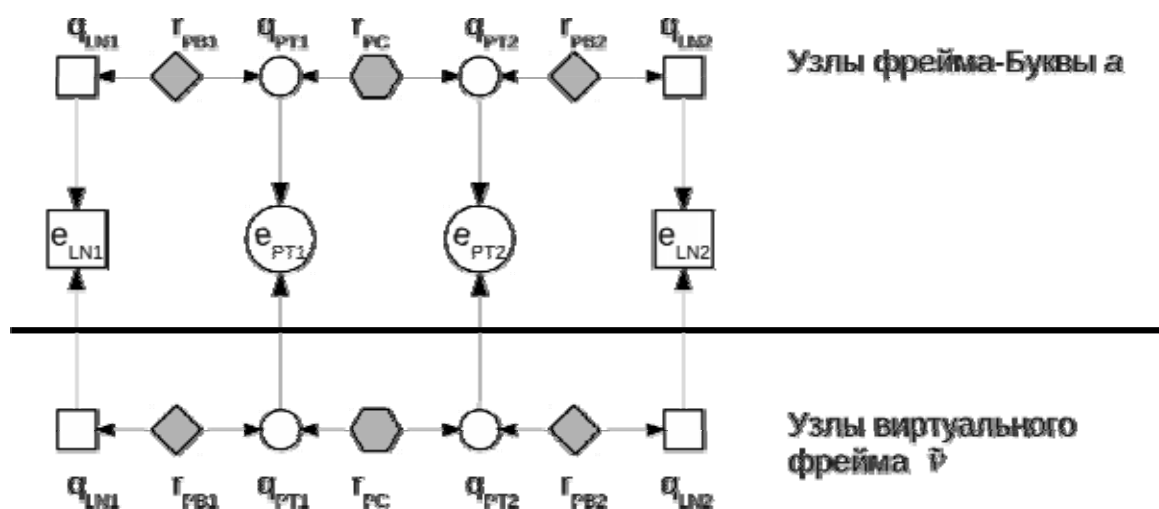


Рисунок 6: Согласование пересекающей линии.

Для всех указанных узлов строятся отношения *согласования* с соответствующими узлами входений в текущем фрейме БЗ.

Алгоритм 1. Распознавание букв.

Начало

1. Найти на изображении линию известного вида.
2. Выдвинуть первоначальный список гипотез.
3. **Цикл:**

4. Вычислить характеристики всех имеющихся гипотез.
 5. Удалить гипотезы, нарушившие полное условие пригодности $Y^{n.приг}$.
 6. **Если** не осталось гипотез:
 7. Вернуть ошибку.
 8. **Конец**
 9. **Если** есть подтверждённые по $Y^{подтв}$ гипотезы и выполняется $\neg \exists h \in H : Y^{n.приг}(h) \wedge (\neg Y^{подтв}(h))$
 10. Вернуть гипотезу с максимальной $N^{сог}$.
 11. **Конец**
 12. Выбрать рабочую гипотезу h .
 13. Выбрать в фрейме ВЗ $a \in D_L(\text{предполагает}(h, a))$ вхождение линии q_l из множества $Q_{LN}(a) \setminus Q_{LN}^{пров}(h)$.
 14. Выполнить $Q^{пров}(h) \leftarrow Q^{пров}(h) \cup q_l$.
 15. Вызвать модуль трассировки для поиска линии, описываемой q_l .
 16. **Если** линия найдена:
 17. Поместить фактическую информацию о найденной линии в ВФ.
 18. Согласовать новые узлы ВФ во всех гипотезах.
 19. При необходимости выдвинуть новые гипотезы.
- Конец**

В приведенном алгоритме операции проверки выполняются над наборами *Вхождений Линий* в структурах начертаний букв. При этом для вычисления характеристик гипотез используются функции (5), (6) и (7).

При добавлении в ВФ очередного узла в фрейме-*Начертании Буквы* может найтись более одного элемента, которые могут быть согласованы с новым узлом, что приводит к “расщеплению” соответствующей гипотезы. Общее число альтернативных гипотез, которые могут быть выдвинуты относительно данного начертания, т.е. общее число возможных согласований данного фрейма начертания с ВФ, равно

$$|\tilde{H}^1| = \tilde{n}! \tilde{m}^{\tilde{n}}. \quad (8)$$

Алгоритм завершается за конечное число шагов. Максимальное число узлов, которые необходимо проверить алгоритмом распознавания для одной гипотезы относительно начертания буквы, выражается как

$$\tilde{c}_{max} = |\tilde{H}_0| |\tilde{H}^1| \tilde{n}_{БЛ}. \quad (9)$$

Можно утверждать, что $|H_0| = |\{q \in Q : \text{индицирует}(q, x)\}| = \tilde{n}_{ЛБ}$.

Учитывая (8), (3) и (4), выражение (9) можно переписать в виде

$$\tilde{c}_{max} = \tilde{n}_{ЛБ} (\tilde{n}_{ЛО})! \tilde{n}_{БР} \tilde{n}_{БЛ} = \frac{|D_L| \tilde{n}_{БЛ}}{\tilde{n}_{БР}} \left[\frac{\tilde{n}_{БЛ}}{\tilde{n}_{БР}} \right]! \tilde{n}_{БР} \tilde{n}_{БЛ} = |D_L| \tilde{n}_{БЛ}^2 \left[\frac{\tilde{n}_{БЛ}}{\tilde{n}_{БР}} \right]! \quad (10)$$

Выражение (10) позволяет утверждать, что время выполнения алгоритма пропорционально количеству фреймов-начертаний $|D_L|$ в БЗ и сильно зависит от количества линий в начертаниях и наличия в них однотипных линий. Если Алгоритм 1 завершается успешно, то в качестве ответа возвращается гипотеза h начертания буквы, удовлетворившая необходимым условиям.

Аспекты практической реализации

В экспериментальной реализации описанной методики распознавания букв в качестве средства описания фреймовой сети БЗ использован язык вэб-онтологий OWL. Модуль обучения системы формирует структурные описания в БЗ на основе онлайн-распознавания изображений букв, вводимых пользователем с помощью мыши или графического планшета.

При помощи таблицы начертаний в [7] для некоторых букв скорописи были сформированы отдельные БЗ:

Среднее Число <i>Начертаний Букв</i> в БЗ	3,3
Среднее число <i>Вхождений Линий</i> в <i>Начертании</i> $\tilde{n}_{БЛ}$	2,2
Среднее число различных типов <i>Линий</i> в <i>Начертании</i>	2,8

С использованием полученных БЗ были проведены серии распознаваний выделенных изображений соответствующих букв (по 1 букве на изображении, по 100 различных изображений каждой буквы). Эксперимент выполнен на персональном компьютере на базе процессора Inter Core 2 Duo с тактовой частотой 2ГГц и объёмом ОЗУ 2Гб. Получен средний результат успешных распознаваний: 78,17%. На распознавание одной буквы в среднем было затрачено 328,67мс, что при средней оценке в 385 букв на скорописном листе позволяет ожидать время распознавания листа примерно равным 126 с.

Заключение

Рассмотренная методика распознавания древнерусской скорописи XVII в. призвана автоматизировать труд исследователей древних документов в решении задачи перевода их текстов в электронное представление. Применение структурного подхода к распознаванию в сочетании с методом выдвижения и проверки гипотез, а также наличие в системе знаний экспертов-палеографов, позволят, учитывая особенности скорописи, осуществлять её эффективное распознавание.

Литература

1. Астахина Л.Ю. Слово и его источники. Русская историческая лексикология: источниковедческий аспект. С послесловием Ю.Н.Филипповича. — М.: МГУП, 2006. — 368 с.
2. Зеленцов, И. А. Метод распознавания древнерусской скорописи / Научная школа для молодых учёных “Компьютерная графика и математическое моделирование (Visual Computing)”: тезисы и доклады. — М.: 2009. — С. 116–131.
3. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис ; пер. с англ. Н.В. Петрова ; под ред. М.С. Гуревича. — М.: Радио и связь, 1986. — 400 с.
4. Поцепаев Р.В. Восстановление траекторий написания символов по их изображениям // Электронный журнал "Исследовано в России", 6, 1437-1450, 2003. URL: <http://zhurnal.gpi.ru/articles/2003/120.pdf>
5. Филиппович Ю.Н. Информационная технология электронного издания рукописных и первопечатных памятников древнерусской письменности. / Издательское дело и редактирование: теория, методика, практика. Межведомственный сборник научных трудов. Вып.6.— М.: Изд-во МГУП, 2002.
6. Фу К. Структурные методы в распознавании образов / К. Фу; пер. с англ. Н.В. Завалишина; под ред. М.А. Айзермана. — М.: Мир, 1977. — 319 с.
7. Черепнин, Л.В. Русская палеография / Л.В. Черепнин. — М., 1956.

8. Чикунов, И. М. Электронное издание древних рукописей и первопечатных книг: Дис...канд. техн. наук: 05.13.06 / МГУП.— М., 2003. — 153 с.
9. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods - Prentice Hall, 2002. ISBN 0-201-18075-8.

Приложение

Название статьи

Распознавание скорописи XVII в.

Recognition of handwritten texts of the XVII century.

Аннотация: В статье рассматривается метод структурного распознавания древнерусской скорописи XVII в. Описываются особенности скорописи и предлагаемый подход к её распознаванию. Рассматривается метод представления знаний о структуре букв и алгоритм распознавания под управлением гипотез.

Summary: The article discusses a method of structural recognition of ancient cursive of the XVII century. The article describes the features of cursive writing and the proposed approach to its recognition. The method of letters structure knowledge representation and hypothesis-driven recognition algorithm are considered.

Ключевые слова: древнерусская скоропись, структурное распознавание, представление знаний, фреймовые сети, проверка гипотез.

Keywords: ancient Russian cursive, structural recognition, knowledge representation, frames, hypothesis testing.

Список литературы

1. Астахина Л.Ю. Слово и его источники. Русская историческая лексикология: источниковедческий аспект. С послесловием Ю.Н.Филипповича. — М.: МГУП, 2006. — 368 с.

2. Зеленцов, И. А. Метод распознавания древнерусской скорописи / Научная школа для молодых учёных “Компьютерная графика и математическое моделирование (Visual Computing)” : тезисы и доклады. — М.: 2009. — С. 116–131.
3. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Т. Павлидис ; пер. с англ. Н.В. Петрова ; под ред. М.С. Гуревича. — М.: Радио и связь, 1986. — 400 с.
4. Поцепаев Р.В. Восстановление траекторий написания символов по их изображениям // Электронный журнал "Исследовано в России", 6, 1437-1450, 2003. URL: <http://zhurnal.gpi.ru/articles/2003/120.pdf>
5. Филиппович Ю.Н. Информационная технология электронного издания рукописных и первопечатных памятников древнерусской письменности. / Издательское дело и редактирование: теория, методика, практика. Межведомственный сборник научных трудов. Вып.6.— М.: Изд-во МГУП, 2002.
6. Фу К. Структурные методы в распознавании образов / К. Фу; пер. с англ. Н.В. Завалишина; под ред. М.А. Айзермана. — М. : Мир, 1977. — 319 с.
7. Черепнин, Л.В. Русская палеография / Л.В. Черепнин. — М., 1956.

8. Чикунов, И. М. Электронное издание древних рукописей и первопечатных книг: Дис...канд. техн. наук: 05.13.06 / МГУП.— М., 2003. " — 153 с.
9. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods - Prentice Hall, 2002. ISBN 0-201-18075-8.