

СОПОСТАВЛЕНИЕ РУКОПИСНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ КРИВЫХ МЕТОДОМ ОЦЕНКИ СХОЖЕСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВБЛИЗИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТОЧЕК

Колядин Д. В., Петров И. Б.

(Россия, Москва)

Рассматривается проблема биометрической идентификации рукописной кривой применительно к построению системы контроля доступа. Описывается подход к сопоставлению кривых на основе выделения экстремальных точек. Для улучшения качества работы алгоритма поиска вводится оценка формы траектории с помощью кривой Безье.

Введение

Принято отсчитывать начало активных исследований в области верификации рукописной подписи с работы [1], в которой были сформулированные основные направления и подходы к решению проблемы. Хотя работы в области применения ЭВМ к криминалистической экспертизе почерков проводились и ранее [2], но с совершенствованием компьютерных технологий появилась возможность анализа динамики начертательных движений производимых при исполнении рукописной подписи. Специальные графические планшеты позволяют отслеживать траекторию движения пера, а также угол наклона ручки и оказываемое на перо давление. Именно возможность измерения динамики делает привлекательным применение рукописной подписи как биометрического параметра в широком спектре информационных систем.

Постановка задачи

Под динамической (или «on-line») кривой подразумевается параметрически заданная кривая $\Gamma: \{x(t), y(t), t \in [0, T]\}$. Данная

статья посвящена обсуждению способов описания динамической кривой применительно к задаче биометрической идентификации личности. В настоящее время общепринятой является схема построения систем доступа, основанных на биометрической аутентификации по подписи, когда пользователь указывает свой идентификатор, подтверждаемый затем рукописной подписью. Предлагаемый подход позволяет пользователю предоставлять системе только свою подпись, по которой программа находит эталон (проводит идентификацию), а затем проверяет подлинность предъявленной подписи (осуществляет верификацию) [3].

Поскольку в предлагаемом подходе на этапе идентификации (поиска эталона) нас интересует только форма кривой, то далее под термином динамической кривой договоримся понимать параметризованную по длине кривую $\Gamma: \{x(s), y(s), s \in [0, S_\Gamma]\}$, где параметр s находится из условия:

$$s(t) = \int_0^t \left\| \frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} \right\| d\tau.$$

Предлагаемый к рассмотрению подход относится к ряду функциональных и использует метод динамического программирования в качестве алгоритмической базы.

Нахождение экстремальных точек

В той или иной степени многие подходы к верификации рукописной подписи основываются на процедуре нахождения характерных или экстремальных точек. Одной из первых работ в области верификации статической рукописной подписи в Советском Союзе была проделана совместно сотрудниками Вычислительного центра Ленинградского университета и Литовского института судебных экспертиз [2]. В той работе точки выбирались вручную, после чего их координаты вводились в ЭВМ для обработки. Применение сенсорных панелей и графических планшетов позволяет автоматизировать данную процедуру. Но какие точки кривой являются наиболее информативными? Как правило, выбор падает на точки со значением кривизны больше некоторого порогового значения. В данной же работе в основе

анализа и сопоставления траекторий положены наборы вертикальных экстремальных точек.

Определение 1. Вертикальным экстремумом называется

точка $\{x(t^*), y(t^*)\}$, для которой $\left. \frac{\partial y(t)}{\partial t} \right|_{t=t^*} = 0$.

Определение 2. Горизонтальным экстремумом называется

точка $\{x(t^*), y(t^*)\}$, для которой $\left. \frac{\partial x(t)}{\partial t} \right|_{t=t^*} = 0$.

При этом каждый вертикальный экстремум определяет локальный максимум или минимум траектории. Под экстремальными точками по кривизне будем понимать точки, локальная кривизна траектории в которых больше порогового значения. Отметим, что прямое нахождение таких экстремальных точек путем вычисления значения кривизны траектории является неоптимальным, т.к. требует вычисления второй производной. Поэтому на практике кривизну определяют, например, по скорости пера (для этого требуется только первая производная) как коррелированной величины [4]. В данной работе было принято решение полностью отказаться от рассмотрения кривизны траектории. Вместо этого на первоначальном этапе находились наборы критических точек (т.е. предварительно найденных экстремальных точек) трех типов: вертикальных экстремумов, горизонтальных экстремумов и точек перегиба. Поскольку особое внимание уделялось скорости и эффективности алгоритма, точки перегиба находились путем анализа знака векторного произведения, которое в нашем случае можно заменить на упрощенную координатную запись для плоского случая:

$$\text{sign}((P_{i-2}^x - P_i^x)(P_{i+2}^y - P_i^y) - (P_{i-2}^y - P_i^y)(P_{i+2}^x - P_i^x)),$$

где P_{i-2} , P_i и P_{i+2} – точки, принадлежащие анализируемой кривой, при этом расстояние вдоль траектории между любыми двумя последовательными точками одинаковое.

Из-за дрожания пера, а также ошибок оцифровки траектории количество вертикальных и горизонтальных экстремальных точек является избыточным. Кроме того, сами по себе точки перегиба являются мало информативными, и служат только для локализации возможного экстремума по кривизне. Поэтому в ука-

занном способе нахождения экстремальных точек необходимым шагом является фильтрация лишних критических точек: в зависимости от параметров программы количество полученных точек в 2 - 2,5 раза превышает количество окончательно найденных экстремальных точек. Тем не менее, получаемый в конечном виде набор экстремальных точек дает лучшее описание траектории по сравнению с другими методами.



Рис. 1. Русские буквы «Я»

На рис. 1 приводится пример двух русских букв «Я» отличающихся формой траектории. Из-за пропуска точки, характеризующей выпуклость на ниспадающем участке, первая буква может быть ошибочно классифицирована как буква «е». На рис. 2 приведено «скелетное» представление тех же самых букв, полученное путем соединения экстремальных точек. Из этого рисунка видно, что вся необходимая информация о структуре букв была сохранена и передана гораздо меньшим количеством точек.



Рис. 2. Пример нахождения экстремальных точек

В качестве необходимых замечаний укажем на отдельные недостатки данного метода. Прежде всего, ориентация алгоритма распознавания только на вертикальные экстремумы не позволяет одинаково хорошо обрабатывать все рукописные подписи. На рис. 3 приводится пример подписи заимствованной из базы данных первого международного конкурса программ по

верификации рукописной подписи: SVC 2004: First International Signature Verification Competition.



Рис. 3. Подпись с горизонтально ориентированными штрихами [SVC 2004]

Другой более существенный недостаток заключается в том, что по логике работы программы часть информации, заключенной в горизонтальных штрихах может быть утрачена. На рис. 4 приведен пример подписи, для которой сформированное представление является не точным, т.к. граничные точки горизонтального Т-штриха не указывают на наличие вертикального экстремума или плато (хотя это и не является ошибкой работы программы). Произошло это вследствие дрожания пера при исполнении данного штриха, а также в силу указанного локального рассмотрения окрестностей критических точек. Поэтому для того чтобы избежать непредвиденных ошибок, последним этапом разметки подписи с помощью экстремальных точек является выделение горизонтальных участков. На этом же этапе помечаются и заключительные горизонтальные штрихи (росчерки), если таковые в подписи присутствуют.



Рис. 4. Пример подписи с горизонтальным штрихом

Вариативность почерка

Основной проблемой в распознавании рукописной подписи является учет вариативных изменений кривой. При этом возможны такие локальные трансформации траектории, при которых исчезают или появляются отдельные элементы подписи. Введем следующие определения:

Определение 3. *Вариативным изменением 1-го рода некоторой рукописной кривой будем называть такую вариацию траектории, при которой происходит локальное изменение ее формы.*

Определение 4. *Вариативным изменением 2-го рода некоторой рукописной кривой будем называть такую вариацию траектории, при которой происходит добавление и удаление ее элементов. ■*

Основу разработанного метода составляет принцип сопоставления двух кривых на основе нахождения пар вертикальных экстремумов, принадлежащих двум образам. При этом, естественно, имеет смысл искать соответствия только вида «минимум-минимум» и «максимум-максимум». При рассмотрении вариативных изменений ведем ограничение, что два соответствующих сегмента кривой могут отличаться не более чем на два вертикальных экстремума. На практике это ограничение выполняется практически всегда (разумеется, можно предложить «искусственный» пример, но на практике он «почти наверняка» не встретится в силу своей излишней сложности исполнения), кроме того, случай более сложных трансформаций может быть сведен к последовательному применению более простых вариаций. Проанализируем для начала вариативные изменения 1-го рода. Для этого рассмотрим случай четырех вертикальных экстремальных точек.

Лемма 1. *Для случая ломаной состоящей из четырех вертикальных экстремумов возможны только два структурно различных варианта ее поведения.*

Доказательство.

Поскольку ломаная линия, состоящая из четырех точек, может иметь не более одного самопересечения, то возможны два варианта: с самопересечением и без самопересечения не считая зеркальных отражений в горизонтальном направлении.

Замечание 1: На рис.5 представлены возможные трансформации ломанной, ведущие к исчезновению промежуточных вертикальных экстремумов. Условимся называть первый тип трансформации *бифуркационной вариацией*, а второй тип *непрерывной вариацией*.

Замечание 2: Безусловно, на практике подписи выполняются не отрезками ломаной линии, поэтому указанные два случая являются только модельными, но они позволяют сформулировать требования к свойствам алгоритма сопоставления, о чем пойдет речь в следующем разделе.

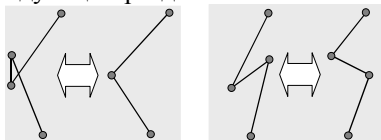


Рис. 5 Два принципиально разных случая трансформации ломаной состоящей из четырех точек

На рис.6 приведены примеры трансформаций 1-го рода, когда экстремальные точки или исчезают как в случае буквы «В» или в результате трансформации перестают быть вертикальными экстремумами. Вариативные изменения 2-го рода встречаются гораздо реже, что в прочем, вполне естественно. На рис.7 приводится пример, когда в верхней кривой присутствует «лишний» элемент. Заметим, что в случае вариативных изменений второго рода необходимо вводить в рассмотрение сопоставления вида один-к-двум, что видно из рис.7, в то время как известные в литературе методы эластичного сопоставления (dynamic time warping) позволяют находить только поточечные соответствия вида один-к-одному [5,6].



Рис. 6 Примеры вариативных трансформаций 1-го рода

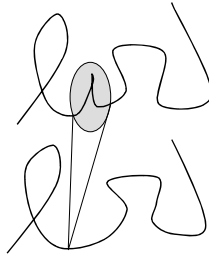


Рис. 7 Вариативное изменение 2-го рода

Сопоставление траекторий

В основе алгоритмов string matching, как правило, используется динамическое программирование, как наиболее простой и эффективный способ решения данной задачи. Этот метод позволяет не рассматривать рекурсивно всю подпись целиком, а искать глобально оптимальное решение путем рассмотрения локальных участков траекторий.

Определение 5. *Хордой кривой будем называть отрезок, соединяющий вертикальные экстремальные точки противоположного типа.*

Предлагаемый алгоритм сопоставления кривых является двухэтапным. Первоначально находились допустимые («min–min» или «max–max») наборы пар вертикальных точек, образующие хордовое представление кривой, и затем для найденных хорд вычислялись штрафы за несоответствие. При этом применялись две метрики: «манхэттенская» (в англоязычной литературе известная так же как city block) и «по Журавлеву». Первая метрика учитывала положение пары хорд относительно друг друга и относительно места в кривой (1),(2), а также относительные размеры хорд (3), (4):

$$d_x(i, j) = \left| \left(\frac{x_i^{start} + x_i^{end}}{2} \right) - \left(\frac{x_j^{start} + x_j^{end}}{2} \right) \right| \quad (1)$$

$$d_y(i, j) = \left| \left(\frac{y_i^{start} + y_i^{end}}{2} \right) - \left(\frac{y_j^{start} + y_j^{end}}{2} \right) \right| \quad (2)$$

$$d_{dx}(i, j) = \left\| x_i^{start} - x_i^{end} \right| - \left\| x_j^{start} - x_j^{end} \right\| \quad (3)$$

$$d_{dy}(i, j) = \left\| y_i^{start} - y_i^{end} \right| - \left\| y_j^{start} - y_j^{end} \right\| \quad (4)$$

Сопоставление по указанной мере производилось из соображений, чтобы различие по одной из координат не приводило к неверному решению, что, вообще говоря, не исключено при сравнении по евклидовой мере. Формулы (1)-(4) не учитывают поведение кривой на участке, заключенном между парой вертикальных экстремумов. Поэтому дополнительно к приведенным штрафам была предложена т.н. «структурная мера», которая принимает значение 1 или 0 для сравниваемых участков кривых.

Поскольку находить соответствие имеет смысл только между вертикальными экстремумами одинакового типа, то из ячейки (i, j) возможно продолжение в одну из трех ячеек: $(i+1, j+1)$, $(i+1, j+3)$, $(i+3, j+1)$. На рис.8 представлен оптимальный путь $(0,0) \rightarrow (1,3) \rightarrow (2,4) \rightarrow (4,5)$, реализующий пропуск экстремальной точки под номером 4 для первой кривой. При этом в каждой ячейке таблицы содержатся штрафы для трех вариантов сопоставления хорд с учетом возможной вариации 1-го рода.

Анализ формы траектории

В результате своей работы алгоритм сопоставления предлагает набор гипотез для отбора кандидата на роль эталонной подписи. В силу того, что мера, по которой находятся структурные несоответствия очень «мягкая» (исключающая лишь грубые несоответствия), то для более тщательного анализа необходимо рассматривать детальное поведение кривой.

При криминалистической экспертизе подписи [7], после того как были установлены общие признаки, эксперт проводит анализ частных признаков таких как:

- размеры углов (острые, тупые, прямые)
- степень кривизны дугообразных элементов (определяется измерением угла, образованного касательными от оснований дуги до их пересечения, а по углу определяется степень кривизны данной дуги)
- степень кривизны данной дуги)
- размещение росчерка и его элементов относительно подписи в целом (выше подписи, ниже, на уровне ее).

Раздел 7. Вычислительные методы и математическое моделирование
 Part 7. Calculation methods and mathematical modelling

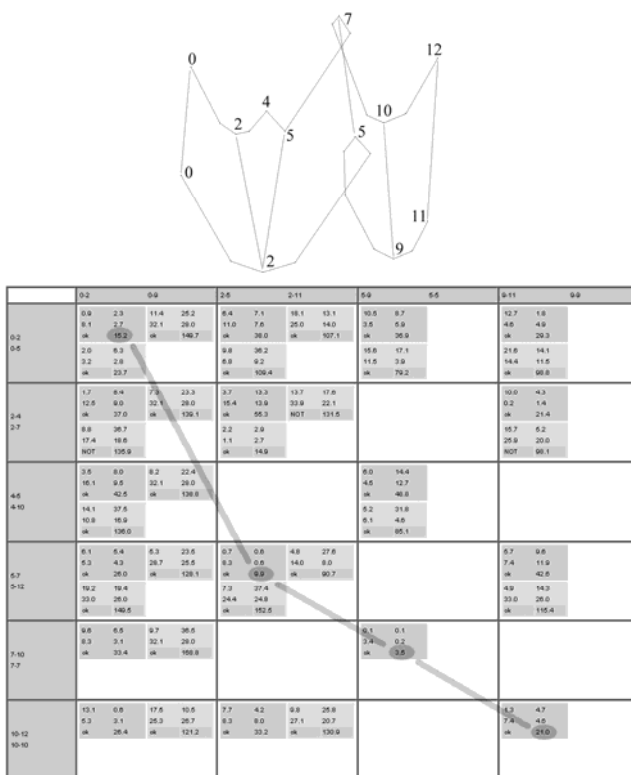


Рис. 8 Пример сопоставления двух траекторий

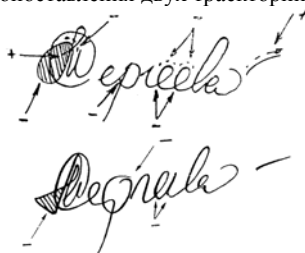


Рис. 9 Пример разборки подписи экспертом-криминалистом

На рис. 9 приводится образец разборки подписи экспертом-почерковедом. Из данного рисунка, а также из приведенной выше цитаты следует, что для оценки формы кривой необходимо уметь описывать ее локальные особенности. Одним из лучших вариантов здесь является использование кривой Безье, получившей широкое распространение в компьютерной графике. В настоящей работе используется итерационный метод нахождения кривой Безье для аппроксимации участка траектории. В ходе экспериментов было установлено, что хотя для многих случаев поведения траектории «полный» метод наименьших квадратов, основанный на нахождении обратной матрицы методом LUP-разложения, и «упрощенный» метод наименьших квадратов, использующий сведения о концах траектории, дают удовлетворительные результаты, они требуют уточнения. На рис. 10 представлен случай петлевого элемента, для которого оба этих метода не дают хорошего результата. Поэтому был реализован итерационный метод приближения траектории кривой Безье. Итерационный метод основывается на нахождении расстояния до кривой Безье, что требует решения алгебраического уравнения 5-го порядка, которое находилось методом секущих.



Рис. 10 Пример нахождения кривой Безье для петлевого элемента. Слева направо: «полный» метод наименьших квадратов, «упрощенный» метод наименьших квадратов, итерационный метод

Таким образом, в данной работе предлагается трехуровневая схема решения задачи идентификации (поиска эталона) по предъявленной рукописной подписи:

- 1 уровень: сопоставление кривых на основе хордового представления;

- 2 уровень: подтверждение структурной эквивалентности между найденными гипотезами и предъявленной кривой;

- 3 уровень: отбор гипотез, проверка на основе формы кривых.

В текущей версии программы оценка траекторий на 2-ом и 3-ем уровнях проводится вблизи экстремальных точек, найденных на 1-ом уровне сопоставления.

Окончательное решение о приеме или отклонении гипотезы производится путем сравнения вычисленного на последнем уровне штрафа с пороговым значением для данного эталона, определенным при регистрации подписи.

Заключение

С целью улучшения качества работы программы в настоящее время проводятся исследования по учету горизонтальных росчерков на этапе нахождения экстремальных точек.

Список литературы:

1. Plamondon R., Lorette G. Automatic signature verification and writer identification – the state of the art. // *Pattern Recognition*, 1989, vol. 22, no. 2, pp. 107-131
2. Ланцман Р. М. Кибернетика и криминалистическая экспертиза почерка. – М.: Наука, 1968, 94 с.
3. Колядин Д. В. Анализ динамических кривых применительно к задаче верификации рукописной подписи // *Математические методы распознавания образов (ММРО-11)*, 2003, с. 330-332
4. Hastie T., Kishon E. A Model for Signature Verification. // *IEEE International Conference on Decision Aiding for Complex Systems*, 1991, pp. 191-196
5. Jain A. K., Griess F. D., Connell S. D. On-line Signature Verification. // *Pattern Recognition*, 2002, vol. 35, no. 12, pp. 2963–2972
6. Hao F., Chan C. W.. Online Signature Verification Using a New Extreme Points Warping Technique // *Pattern Recognition Letters*, 2003, vol. 24, no. 16, pp. 2943-2951

7. Винберг А. А., Шванкова М. В. Почерковедческая экспертиза. Учебник для вузов МВД СССР. – Высшая следственная школа МВД СССР, Волгоград, 1977, 207 с.

**ON-LINE HANDWRITTEN CURVES MATCHING USING
SHAPE ESTIMATION NEAR EXTREME POINTS**

Kolyadin D. V., Petrov I. B.

(Russia, Moscow)

Handwritten curves can be utilized as biometric passwords in access restriction systems. This paper describes approach based on extreme points matching. Bezier curves were adopted for estimating a shape of a trajectory near extreme points for best recognition quality.