

Санкт-Петербургский государственный университет
Математико-механический факультет
Кафедра системного программирования

Михалев Андрей Дмитриевич

**Анализ алгоритмов локального сопоставления
отпечатков пальцев**

Курсовая работа

Заведующий кафедрой,
д. ф.-м. н., профессор Терехов А. Н.

Научный руководитель,
ст. преп. Сартасов С. Ю.

Санкт-Петербург
2016

Оглавление

Введение.....	2
Постановка задачи.....	3
Обзор литературы.....	4
Сопоставление отпечатков.....	5
Извлечение минуций.....	10
Minutia Cylinder-Code.....	12
Local Similarity Sort.....	13
Результаты и план действий.....	14
Список литературы.....	15

Введение

В современном мире информационные технологии являются неотъемлемой частью повседневной жизни. Во многих ее сферах требуется безопасный доступ к информационным системам и частной информации. Идентификация по отпечаткам пальцев является одним из самых распространенных биометрических способов аутентификации.

Существует достаточное количество биометрических параметров: физиологические — сетчатка глаза, отпечатки пальцев, или поведенческие характеристики - черты лица, голос. Все они позволяют проверить личность пользователя и ограничить доступ к данным для посторонних лиц.

Биометрические технологии имеют многочисленные и разнообразные сферы применения: доступ к рабочим местам и сетевым ресурсам, защита информации и безопасность банковских операций, инвестирования и других финансовых перемещений. Так, один из видов биометрического доступа — отпечатки пальцев — используются в криминалистике и в системах контроля доступа по всему миру, благодаря своей уникальности и неизменности.

Постановка задачи

Распознавание отпечатков пальцев является актуальной проблемой, которая изучается уже в течение более чем 40 лет. В настоящее время существуют эффективные решения, однако проблема распознавания отпечатков пальцев, не может считаться полностью решенной, поскольку разработка точных и вычислительно легких алгоритмов остается открытым вопросом [1].

Большинство алгоритмов сопоставления отпечатков пальцев основано на минуциях - уникальных для каждого отпечатка пальца точках, в которых изменяется структура папиллярных линий [2]. В течение долгого времени, сопоставление минуций интерпретировалось как проблема сопоставления двухмерного точечного шаблона, направленного на определение глобального выравнивания, которое приводит к оптимальному пространственному и направленному сопоставлению пар минуций.

К сожалению, большинство алгоритмов глобального сопоставления минуций являются вычислительно сложными и не достаточно устойчивыми по отношению к нелинейным искажениям отпечатков пальцев. В последнее десятилетие, эти недостатки были учтены — появились методы локального сопоставления минуций.

Локальные структуры минуций характеризуются атрибутами, которые инвариантны по отношению к глобальным трансформациям (например, перемещению, вращению и т. д.) и, следовательно, пригодны для сопоставления, без предварительного глобального выравнивания. Сопоставление отпечатков пальцев, основанное только на локальном сопоставлении минуций, смягчает глобальные пространственные отношения, которые являются очень характерными, и, следовательно, уменьшает объем информации, доступной для различения отпечатков пальцев.

Тем не менее, преимущества локального и глобально подхода можно объединить с помощью введения гибридных подходов к сопоставлению, которые выполняют сопоставление локальных структур и далее осуществляют стадию консолидации.

В данной работе ставится задача: провести анализ существующих гибридных подходов сопоставления отпечатков пальцев,

Обзор литературы

Гибридные подходы сопоставления отпечатков пальцев включают в себя два этапа:

1. Локальное сопоставление минуций
2. Консолидация данных из локальных структур в единый результат.

Сопоставление локальных структур минуций позволяют быстро и устойчиво определять пары минуций, которые соответствуют локально (т. е. их соседние особенности сопоставимы). Шаг консолидации не является обязательным, и оценка может быть напрямую получена из локального сопоставления структур. Локальное сопоставление также может привести к раннему отказу в случае очень разных отпечатков пальцев.

Алгоритмы локального сопоставления минуций развиваются на основе трех поколений методов [3]:

1. Ранние подходы, в которых локальные структуры, как правило, формируются следующим образом:
 1. Подсчитывается количество минуций, входящих в некоторые регионы.
 2. Глобальная консолидация не выполняется.
2. Подходы, в которых впервые эффективно используют отношения между минуцией и ее соседями. Такие отношения определяют инвариантные расстояния и углы и предполагают глобальную консолидацию.
3. Многочисленные варианты и разработки методов, которые, как правило, расширяют набор локальных характеристик, принимая во внимание: локальное поле направлений, локальную частоту, форму гребня и т. д.

Локальные структуры минуций можно разделить на два типа:

1. Основанные на ближайших соседях (*nearest neighbor-based*).
2. Основанные на фиксированном радиусе (*fixed radius-based*).

В первом типе, представленном алгоритмом Jiang и Yaus's [4], соседи центральной минуции определяются как K пространственно ближайших минуций. Это приводит к дескрипторам фиксированной длины, что в обычных случаях может быть очень эффективным.

Во втором типе, представленном алгоритмом Ratha [5], соседи определяются как все минуции, которые располагаются ближе к центральной минуции, чем некоторый заданный радиус R . Длина дескриптора меняется и зависит от локальной плотности минуций. Это может привести к более сложным локальным структурам, которые будут толерантны к отсутствующим или ложным минуциям.

Сопоставление отпечатков

Отпечаток пальца – это копия поверхности эпидермиса кончика пальца. Самой явной характеристикой отпечатка пальца является шаблон чередующихся *гребней (ridges)* и *впадин (valleys)*. На изображениях отпечатков пальцев темные линии определяют гребни, светлые – впадины (рис. 1).

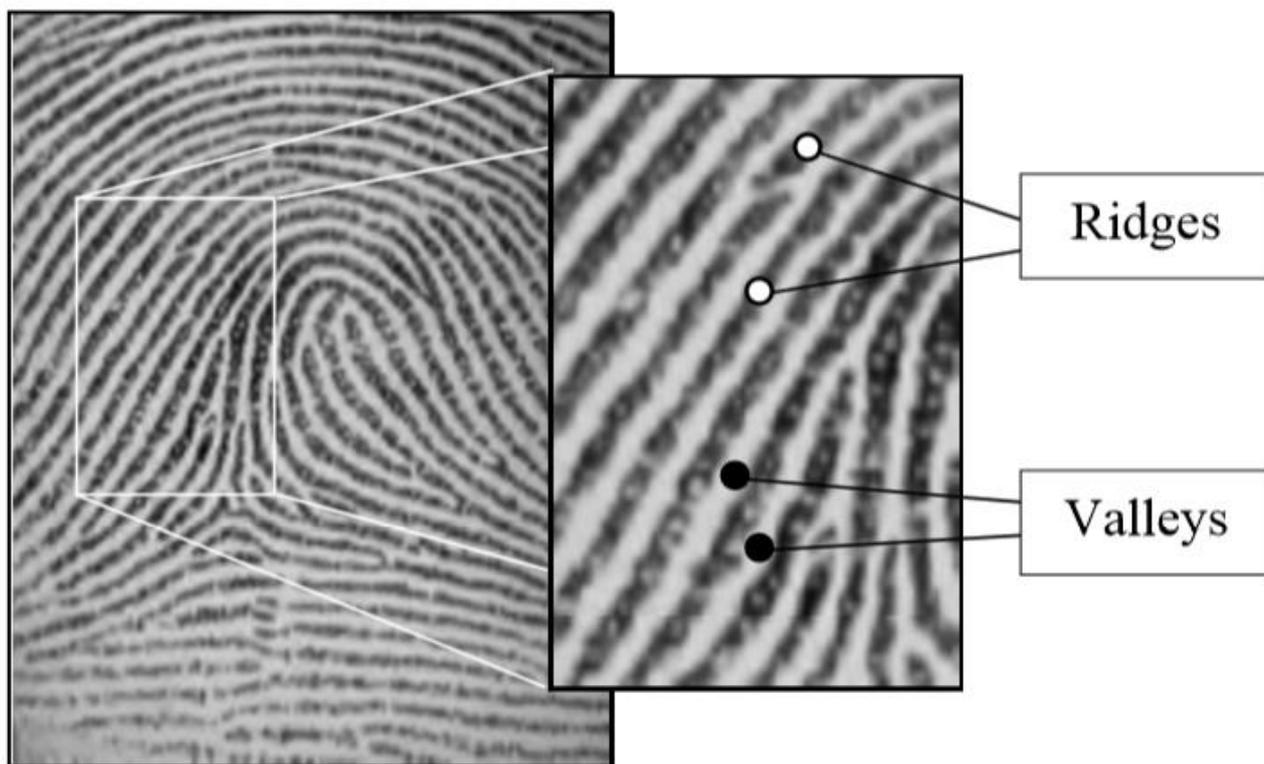


Рис. 1. Отпечаток пальца.

Сопоставление отпечатков заключается в сопоставлении особенностей гребней на соответствующих шаблонах. Особенности гребней могут быть разделены на три уровня [1]:

1. Уровень (глобальный), характеризующийся общим направлением гребней на шаблоне.
2. Уровень (локальный), характеризующийся мелкими особенностями гребней, называемыми минуциями.
3. Уровень (самый локальный), характеризующийся, например, порами и т.д.

На глобальном уровне (уровень 1) гребни часто располагаются почти параллельно, но иногда они формируют один или несколько регионов, которые можно рассматривать как уникальные фигуры, характеризующиеся высокой криволинейностью, частыми прерываниями гребней и т.д. Эти регионы, называемые *особенностями* или *особыми регионами*, могут быть явно классифицированы на три топологии (рис. 2): *петля (loop)*, *дельта (delta)* и *завиток (whorl)*.

Алгоритмы сопоставления отпечатков пальцев могут заранее выравнивать изображения отпечатков пальцев согласно ориентиру или центральной точке, называемой *ядром (core)* [1]. Точка, соответствующая ядру, определяется как самая северная, внутренняя точка, находящаяся в окружении наибольшего количества гребней. На практике, ядро соответствует центру самого северного особого региона, который имеет форму петли. Для отпечатков, которые не имеют особых регионов в форме петель или завитков, трудно определить центральную точку. В таких случаях ядро обычно ассоциируется с точкой, в которой достигается максимальная кривизна гребней. К сожалению, из-за высокого разнообразия шаблонов отпечатков, трудно достоверно определить центральную точку на всех изображениях.

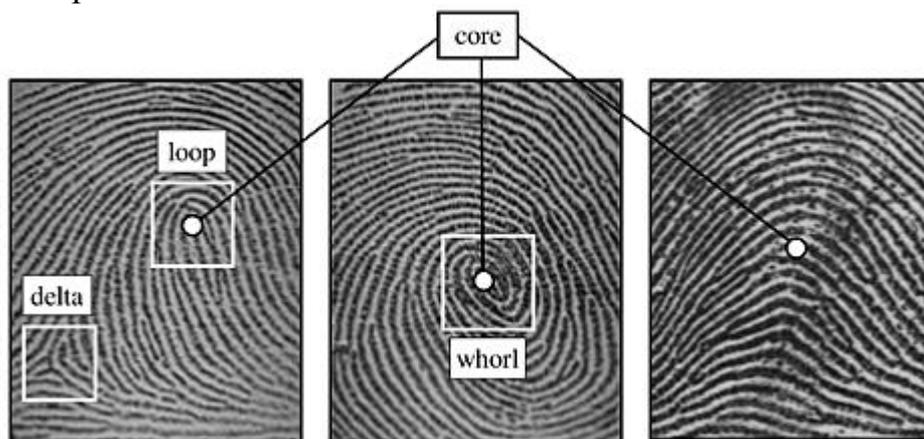


Рис. 2. Особые регионы (белые квадраты) и центральные точки (белые круги).

Особые регионы широко используются для классификации отпечатков (рис 3.), которая связывает отпечаток с одним из множества уникальных классов с целью упрощения поиска и извлечения.

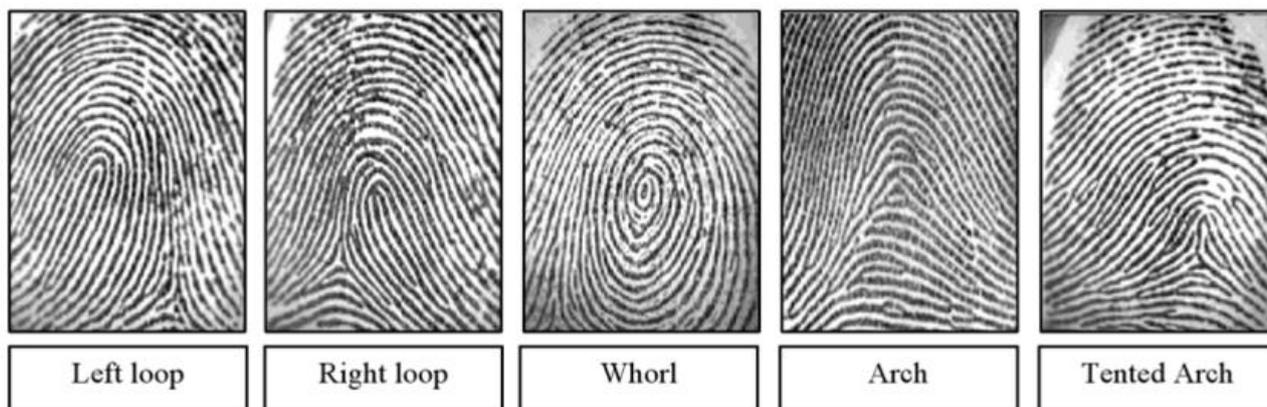


Рис. 3. Пять основных классов отпечатков пальцев.

На локальном уровне (уровень 1) другие важные характеристики, называемые минуциями, могут быть найдены на изображениях отпечатков. Минуции представляют собой маленькие детали, которые соответствуют разнообразным способам прерывания гребней (рис. 4):

1. *Ridge ending* – гребень прервался.

2. *Bifurcation* – один гребень разделился на два.
3. *Lake* – гребень, который раздваивается и вскоре соединяется воедино.
4. *Independent ridge* – гребень небольшой длины.
5. *Island* – гребень маленькой длины, не связанный с другими гребнями.
6. *Spur* – один гребень разделяется на короткий и более длинный.
7. *Crossover* – пересечение двух гребней.

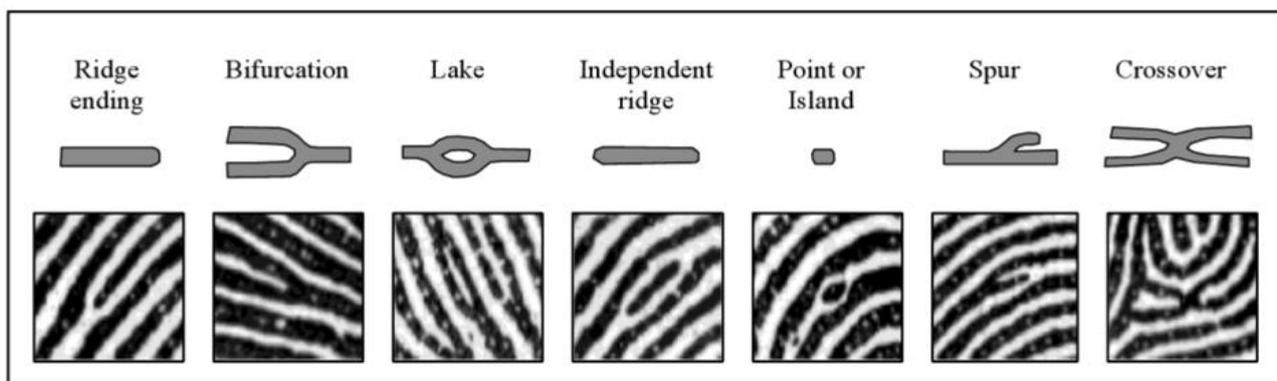


Рис. 4. Семь наиболее распространённых типов минуций.

Большинство автоматических систем для сопоставления отпечатков основаны на сопоставлении минуций. И хотя самыми распространёнными типами являются семь вышеперечисленных, обычно используется только грубая классификация минуций, которая позволяет справиться с трудностями на практике при автоматическом распознавании разных типов с высокой точностью.

Американский национальный институт стандартов [6] предлагает таксономию, основанную на четырех классах [7]: *ridge ending*, *bifurcation*, *compound (trifurcation or crossovers)*, *type undetermined*. Федеральное бюро расследований (FBI) рассматривает всего два класса [8]: *ridge ending* и *bifurcation*.

Согласно стандарту [7] каждая минуция определяется её классом, x - и y -координатами и углом между касательной, проведенной к гребню в точке расположения минуции, и горизонтальной осью (рис. 5).

С целью улучшения совместимости среди алгоритмов определения минуций были приняты еще несколько соглашений по расположению минуций и углам в стандартах [7], [9] и CDEFFS (2008).

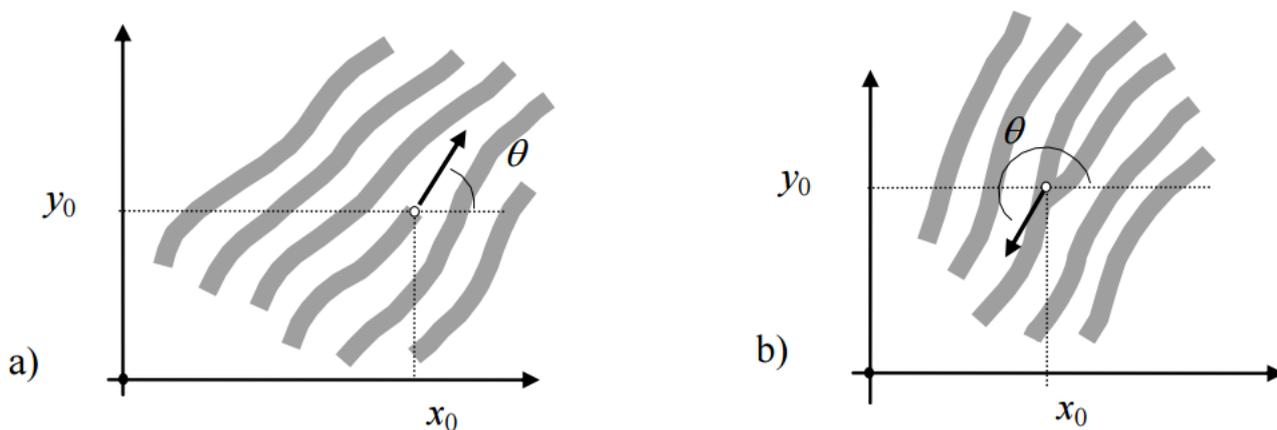


Рис. 5. а) Минуция, имеющая тип *ridge ending*; $[x_0, y_0]$ – координаты минуции; θ – угол, который касательная к минуции образует с горизонтальной осью.
 б) Минуция, имеющая тип *bifurcation*; θ – угол определяемый с помощью *ridge ending* минуции, которая соответствует оригинальной *bifurcation* минуции, которая располагается на соответствующем негативном изображении.

На рис. 6а показана часть изображения отпечатка пальца, где гребни показаны темными линиями на светлом фоне. Хорошо видны две *ridge ending* минуции (1, 2) и одна *bifurcation* минуция (3). Заметим, что на негативном изображении рис. 6б соответствующие минуции находятся на в тех же местах, но их тип изменился: *ridge ending* минуции изменили тип на *bifurcation* и наоборот (это свойство известно, как *ridge-ending/bifurcation* двойственность)

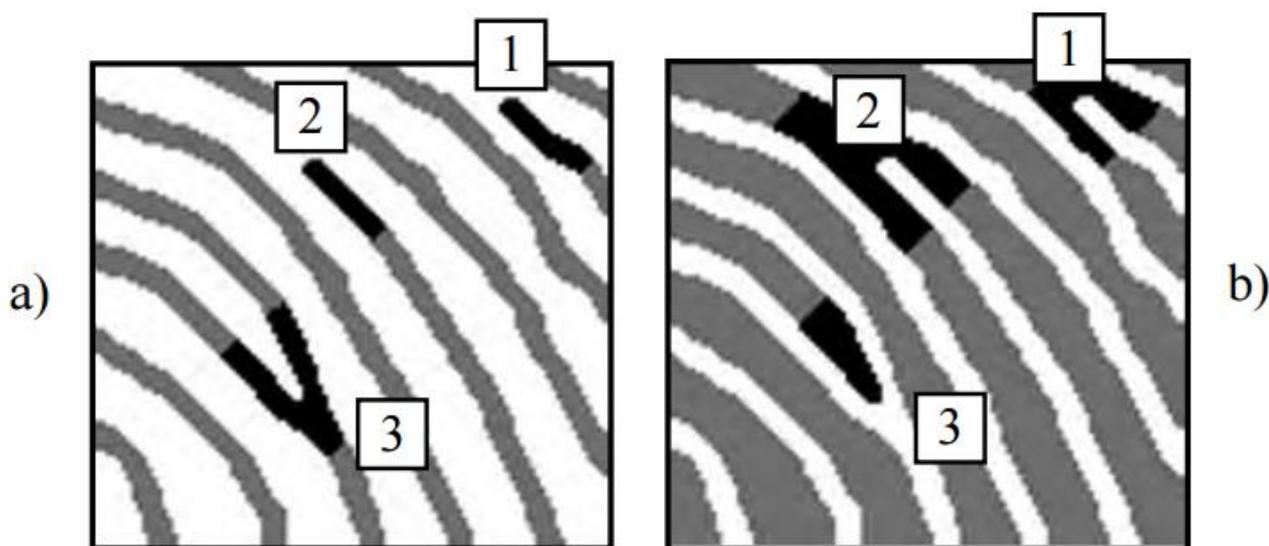


Рис. 6. *Ridge-ending/bifurcation* двойственность на а) бинарном изображении и б) его негативе (черные и белые пиксели поменяны местами).

На самом локальном уровне (уровне 3) из шаблона отпечатка пальца можно получить следующие отличительные особенности (пространственные характеристики гребней):

1. Ширина гребня
2. Форма гребня
3. Контур краев гребня

4. Поры
5. Разрывы
6. Складки
7. Шрамы

Хотя особенности третьего уровня весьма уникальны и особенно важны при латентных сравнениях отпечатков, в настоящий момент очень немногие методы автоматического сопоставления используют их, поскольку их достоверное определение требует сканеров отпечатков пальцев высокого разрешения (до 1000 dpi) и изображений отпечатков высокого качества. Стандарт CDEFFS (2008) – это первая попытка стандартизации кодирования особенностей третьего уровня.

Извлечение минуций

Многие автоматизированные системы для сопоставления отпечатков пальцев используют методы, основанные на сравнении минуций. Следовательно, достоверное определение минуций становится чрезвычайно важной задачей. Большинство предложенных ранее методов требуют того, чтобы черно-белое изображение отпечатка было сконвертировано в бинарное. Бинарное изображение обычно подвергается некоторым морфологическим операциям, которые позволяют сделать гребни на изображении толщиной в 1 пиксель. Дальнейшее сканирование изображения позволяет определить пиксели, которые соответствуют минуциям.

Однако, при процесс бинаризации и выполнение морфологических операций имеют следующие минусы [1]:

- В ходе бинаризации теряется значительная часть информации на изображении.
- Бинаризация и морфологические операции требуют дополнительного времени.
- В ходе морфологических операций могут появиться ложные минуции.
- Без проведения операций улучшения изображения бинаризация не дает удовлетворительных результатов при применении к изображениям отпечатков низкого качества.

Чтобы избежать недостатков, свойственных бинаризации и морфологическим операциям, была написана программа [10], позволяющая отмечать минуции и касательные к ним сразу на изображении отпечатка (рис. 7).



Рис. 7. Синими точками отмечены минуции на изображении отпечатка пальца.

После разметки отпечатка размеченное изображение может быть сохранено. Так же для каждой отмеченной минуции можно сохранить в файл тройку чисел: x - и y - координаты и угол между касательной, проведенной к гребню в точке расположения минуции, и горизонтальной осью. Имея два размеченных отпечатка и соответствующие им файлы с тройками чисел, можно провести сопоставление отпечатков с помощью различных алгоритмов. Кроме того, программа имеет возможность масштабирования изображения и загрузки данных из файла, которые автоматически размечаются на изображении.

Программа написана на языке C++ с использованием open-source библиотеки OpenCV v.2.4.11.

Minutia Cylinder-Code

Minutia Cylinder-Code (MCC) – алгоритм локального сопоставления минуций с последующей фазой консолидации [3]. Он имеет ряд преимуществ над остальными алгоритмами сопоставления минуций согласно результатам в [3]:

- MCC – *fixed-radius* метод, соответственно он более толерантен к отсутствующим или ложным минуциям, чем *nearest neighbor-based* методы.
- В отличие от традиционных *fixed-radius* методов, MCC полагается на инвариантное кодирование фиксированной длины для каждой минуции, что делает вычисление схожести локальных структур очень простым.
- Проблемы с границей изящно решаются без особых проблем на этапах кодирования и сопоставления.
- Локальная дисторсия и небольшие ошибки извлечения особенностей допускаются благодаря тому, что внутри алгоритма используются сглаживающие функции (толерантные к ошибкам) на этапе консолидации.
- MCC эффективно работает с зашумленными областями отпечатков, где алгоритмы извлечения минуций, как правило, получают большое количество ложных минуций. Это улучшение стало возможно благодаря эффекту насыщения, который обеспечивается функцией ограничения.

Алгоритм MCC связывает локальную структуру с каждой минуцией. Эта структура кодирует пространственные и «направленные» отношения между минуциями и её *fixed-based* соседями. Она представляется в виде цилиндра, основание и высота которого определяют пространственную и «направленную» информацию соответственно.

Получившийся цилиндр обладает следующими свойствами:

1. Он инвариантен к преобразованиям переноса и поворота, поскольку:
 - 1) Он кодирует только расстояния и разницу в направлении между минуциями.
 - 2) Его основание повернуто в соответствующем минуции направлении.
2. Он устойчив к дисторсии кожи и к ошибкам при извлечении маленьких особенностей благодаря сглаживающей функции, определяющей вклад каждой минуции, и ограничивающей функции.
3. Он имеет фиксированную длину, которая определяется количеством ячеек, на которые он успешно разбивается.

Далее, каждый цилиндр линеаризуется в одномерный вектор и цилиндры сопоставляются путем нахождения корреляции между каждой парой векторов. Значения корреляции заносятся в результирующую матрицу $\Gamma \in [0,1]$.

Local Similarity Sort

Общая оценка схожести двух шаблонов минутий получается из локальных сопоставлений. Она формируется на этапе консолидации. Алгоритм, реализующий этот этап, называется *Local Similarity Sort (LSS)* [3].

Метод LSS сортирует все оценки локальных сопоставлений и выбирает n_p лучших. Общая оценка схожести двух шаблонов может быть получена из следующей формулы:

$$S(A, B) = \frac{\sum_{(r,c)} \Gamma[r, c]}{n_p}$$

Результаты и план действий

В ходе работы было сделано следующее:

- Написана программа для извлечения минуций.
- Написан алгоритм MCC.
- Написан алгоритм LSS.
- Изучена дополнительная литература.

Возникшие проблемы:

- Получение направления минуций.
- Небольшое количество альтернатив для MCC за последние 6 лет.

План действий:

- Получить верные направления минуций.
- Протестировать работоспособность MCC и LSS.
- Реализовать алгоритм сопоставления отпечатков MTM (Minutia Tensor Matrix).
- Применить LSS к MTM и сравнить результаты с MCC.

Список литературы

- [1] D. Maltoni, D. Maio, A. Jain, S. Prabhakar. Handbook of Fingerprint Recognition. Springer-Verlag London, 2009, P. 494.
- [2] D. Maio, D. Maltoni. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Jan 1997, Vol. 19, Issue 1, P. 27 – 40.
- [3] R. Cappelli, M. Ferrara, D. Maltoni. Minutia Cylinder-Code: A New Representation and Matching Technique for Fingerprint Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, March 2010, Vol. 32, Issue 12, P. 2128 — 2141.
- [4] X. Jiang, W.Y. Yau. Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures. // Pattern Recognition, September 2000, Vol. 2, P. 1038 – 1041.
- [5] N.K. Ratha, V.D. Pandit, R.M. Bolle, V. Vaish. Robust Fingerprint Authentication Using Local Structural Similarity. // IEEE Workshop Applications of Computer Vision, 2000, P. 29 – 34.
- [6] American National Standard for Information Systems. <https://www.ansi.org/>
- [7] Data Format for the Interchange of Fingerprint, Facial & Other Biometric Information. // NIST Special Publication, ANSI/NIST-ITL 1-2011 Update: 2013, P. 623.
- [8] Fingerprint Recognition. // https://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints_biometrics/biometric-center-of-excellence/files/fingerprint-recognition.pdf
- [9] ISO/IEC 19794-2. // http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=50864, December 2011, P. 93.
- [10] Minutia detection C++. <https://github.com/Montura/LSS/tree/master/Minutia%20detection%20C%2B%2B>.