

**Управление образования г. Пензы
МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы**

**РАСПОЗНАВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ
ДИСКА НЕМЕЦКОГО ПОЛИФОНА XIX ВЕКА
«SYMPHONION MODEL №30»**

Выполнили:

Журавлёв Алексей Владимирович,
Миронов Владислав Максимович,

обучающиеся МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы

Руководитель:

Адамский Сергей Сергеевич,

*учитель информатики
МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы*

Пенза, 2025

Содержание

Введение	3
1. Общие сведения	4
1.1 Историческая справка	4
1.2 Устройство полифона и его сменного носителя.....	6
2. Практическая часть	9
2.1 Выбор подхода распознавания нотных дисков.....	9
2.2 Устройство сканера для дисков полифона	10
2.3 Распознавание нотных позиций.....	11
2.4 Попытка воспроизведения мелодии	13
Заключение.....	14

Введение

Распознавание и анализ исторических артефактов играют важную роль в сохранении культурного наследия и понимании прошлого. Одним из таких артефактов является диск полифона из XIX века, который имеется в распоряжении лицейского технического музея МБОУ ЛСТУ № 2 г. Пензы. Полифоны, механические музыкальные устройства, были популярны на рубеже XIX и XX веков и представляли собой важный этап в развитии музыкальной технологии. Эти устройства использовали перфорированные металлические диски для воспроизведения музыки, что делало их уникальными и инновационными для своего времени. К сожалению, полифоны не долговечны, так как подвержены большому механическому износу и найти рабочие экземпляры для эстетического погружения в ушедшую эпоху с каждым годом становится всё труднее. Их стоимость варьируется от 50000 рублей до 500000 и выше (в зависимости от исполнения и состояния).

Цель данной проектной работы — разработка метода распознавания дисков полифона Symphonion model №30 с использованием современных технологий. В частности, будет рассмотрены метод компьютерного зрения для автоматического распознавания и интерпретации перфорированных дисков. Это позволит не только сохранить и восстановить музыкальные произведения, записанные на этих дисках, но и предоставить новые возможности для изучения и популяризации исторических музыкальных инструментов.

В рамках проекта будут решаться следующие задачи:

- исследование исторического контекста и технических характеристик полифонов XIX века;
- сбор и подготовка данных, включая изображения и аудиозаписи дисков полифона;
- разработка алгоритмов компьютерного зрения для распознавания перфораций на дисках;

- оценка точности и эффективности разработанных методов.

В современном контексте распознавание и анализ дисков полифона XIX века имеет важное культурное и историческое значение. Восстановление музыкальных произведений (их аранжировок), записанных на этих дисках, позволяет сохранить культурное наследие и сделать его доступным для будущих поколений. Кроме того, разработка методов распознавания дисков может способствовать развитию новых технологий и подходов в области анализа исторических артефактов.

1. Общие сведения

1.1 Историческая справка

Полифоны представляют собой важную часть музыкальной истории конца XIX и начала XX века. Эти механические устройства были разработаны для воспроизведения музыки без необходимости в живых музыкантах, что делало их революционными для своего времени. Полифоны использовали перфорированные заменяемые металлические диски, которые вращались на специальном механизме, считывая перфорации и воспроизводя музыкальные произведения.



Рис. 1, Symphonion model №30 и его носитель – перфорированный диск.

История полифонов берет свое начало в середине XIX века, когда механические музыкальные устройства начали набирать популярность. Одним из первых известных изобретателей в этой области был швейцарец Антуан Фавр-Саломон, который в 1796 году создал одну из первых музыкальных шкатулок [5]. Однако наибольшую популярность полифоны получили в конце XIX века, когда технологии их производства значительно усовершенствовались, например, была запатентована концепция сменных дисковых носителей в полифонах [4].

СИМФОНІОНЪ:
МУЗЫКАЛЬНЫЯ ШКАТУЛКИ СЪ ПЕРЕМѢННЫМИ ПЬЕСАМИ:

МУЗЫКАЛЬНЫЯ ШКАТУЛКИ СЪ ПЕРЕМѢННЫМИ ПЬЕСАМИ:

№ 3310. РУЧНОЙ, 40 тонный безъ нотъ	5 р. —	№ 3338. ЗАВОДНОЙ, 84 тонный безъ нотъ	43 р. —
Ноты къ нему за каждую по	25 к.	Ноты къ нему за каждую по	60 к.
№ 3318. ЗАВОДНОЙ, 40 тонный безъ нотъ	10 р. —	№ 3350. ЗАВОДНОЙ, 84 тонный, <i>Sublime Harmonie</i> , безъ нотъ	70 р. —
Ноты къ нему за каждую по	25 к.	Ноты къ нему за каждую по	80 к.
№ 3325. ЗАВОДНОЙ, 60 тонный безъ нотъ	28 р. —	№ 3358. ЗАВОДНОЙ, 100 тонный, <i>Sublime Harmonie Piccolo</i> , безъ нотъ	100 р. —
Ноты къ нему за каждую по	50 к.	Ноты къ нему за каждую по	1 р. —

Каталоги всѣхъ выслаются бесплатно. По полученіи заказка, приблизительно 1/3 стоимости заказа, требуется высылается съ положеннымъ платежемъ на остальную сумму.

ЮЛІЙ ГЕНРИХЪ ЦИММЕРМАНЪ
ГЛАВНОЕ ДЕПО МУЗЫКАЛЬНЫХЪ ИНСТРУМЕНТОВЪ И НОТЪ.
С.-ПЕТЕРБУРГЪ, Большая Морская, № 34 и 40. | МОСКВА, Кузнецкій мостъ, д. Захарыина.

Рис. 2, дореволюционная рекламная вырезка.

Полифоны стали популярными не только в Европе, но и в других частях мира. Они использовались как в домашних условиях для развлечения, так и в общественных местах, таких как кафе и рестораны (использовались полифоны с монетоприемниками). Их популярность была обусловлена простотой использования и возможностью воспроизведения разнообразных музыкальных произведений, от классической музыки до популярных мелодий того времени. В Российской империи Symphonion (родом из Германской империи) были одними из популярных моделей полифонов.

С развитием технологий и появлением граммофонов и других аудиоустройств в начале XX века, популярность полифонов начала снижаться.

Сначала появлялись переходные варианты устройств, такие как «полиграммы» и подобные им – объединение полфюна и граммофона в одном корпусе, а затем полифоны и вовсе исчезли из продажи. Несмотря на их короткую волну популярности в истории они смогли оставить значительный след в истории музыкальных технологий и до сих пор представляют интерес для историков, музыковедов и коллекционеров.

1.2 Устройство полифона и его сменного носителя

На диске-носителе концентрически расположены 100 нотных (тоновых) дорожек, состоящих из сдвоенных отверстий, а также две технические дорожки, идущие подряд посередине. Отверстия были получены механическим выдавливанием от краёв к их центру. Центр двойных отверстий представляет собой своеобразный крючок. Процесс изготовления крючков на диске, описан в патенте США №500,373 от 27 июня 1893 года [2].



Рис. 3, диск полифона крупным планом.

Диски полифона могли иметь различные размеры и конфигурации перфораций. Некоторые диски были предназначены для воспроизведения коротких мелодий, в то время как другие могли воспроизводить более длинные и сложные музыкальные произведения. На рисунке 3 представлен диск 34,5 см диаметра с одной сотней перфорированных дорожек. За инициацию извлечения звукового тона на гребёнке отвечают крючки с обратной стороны диска.

Интересно, но у разных производителей были свои «фирменные» способы формирования крючков (рисунок 4).

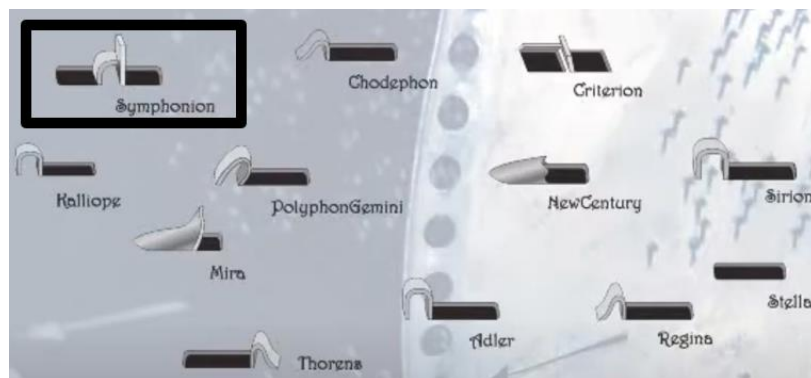


Рис. 4, виды крючков на нотном диске.

Диск вращается по часовой стрелке, каждый из крючков в зоне считывания задевает звёздочки с молоточками, а они уже ударяют по язычкам гребёнки (рисунок 5).

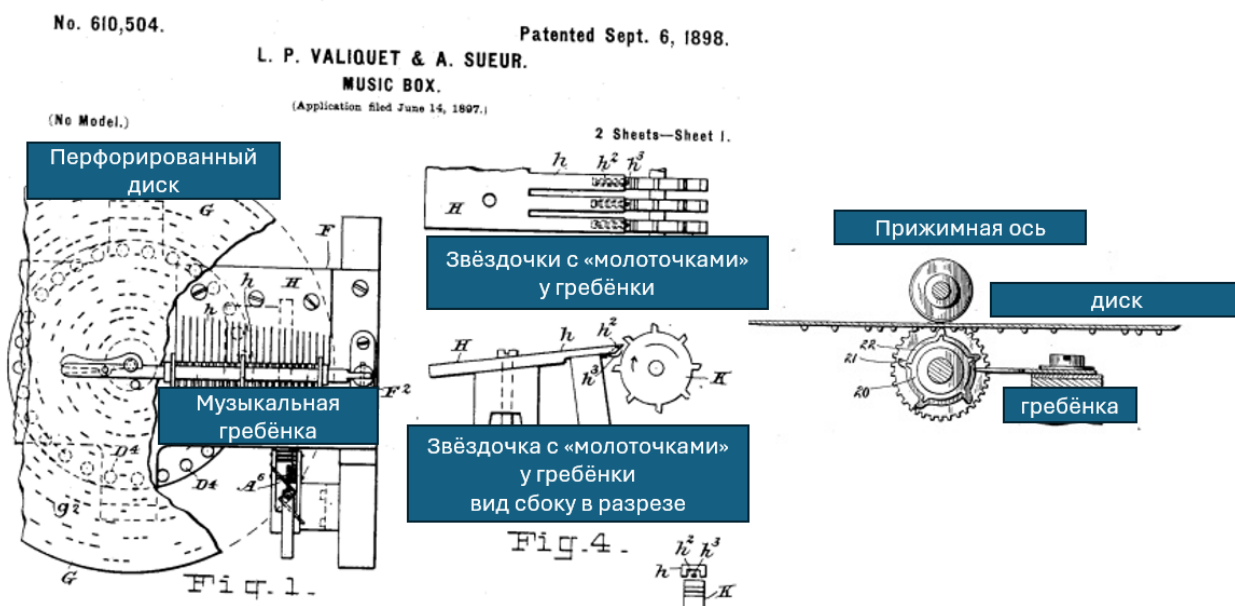


Рис. 5, иллюстрации из патентов Louis P. Valiquet, Alfred Sueur[3] и J. E. Sanders.



Рис. 6, гребёнки полифона *Symphonion model №30*

У подходящей модели полифона всего 100 тонов на две пары гребней (Рисунок 6). Каждая пара расположена диаметрально противоположно и состоит из основной гребёнки и короткой (это Piccolo гребёнка с повышенными тонами). 102 дорожки на пластине получаются из-за того, что технологически необходимо постоянно прижимать выгибающуюся пластину снизу к двум жёстким дисковым валикам (по одному на пару гребней в позиции №25 от центра), расположенным в зоне «считывателя мелодии». Так как пластина вращается, прижимные валы следуют по окружностям и не могут соприкоснуться с крючками диска, иначе они просто сомнут всё по пути.

На основной гребёнке 34 тона, на Piccolo — 16 тонов, по 50 звуков на сторону. Чтобы получилось 100 тонов, левая (или правая) пара гребней смещена на одну ширину дорожки так, чтобы каждая из сторон отвечала только за чётные или нечётные дорожки на нотной пластине. Можно сделать вывод о том, что мелодия на чётных дорожках смещена на половину оборота диска и обе половины воспроизводятся одновременно. Для данного полифона возможен «дуплекс»: усиление звучания ноты, проиграв её на двух гребёнках одновременно. Гребёночный дуплекс в музыкальных шкатулках запатентовал Alfred Junod, патент США №356,251 «Duplex Music Box» 1887 года [6].

2. Практическая часть

2.1 Выбор подхода распознавания нотных дисков

Использование сканера МФУ для того, чтобы получить точное расположение перфораций на диске полифона потенциально перспективно, но невозможно ввиду того, что диск сделан из тонкой стали и постоянно изгибается. Прижать диск к стеклу сканера невозможно из-за хрупких крючков. Диск 34.5 см в диаметре, что больше сканирующей площади МФУ формата А3.

Фотографирование дисковой пластины осуществимо, однако постоянные искажения линзы, перспективы и самого диска не дают должной точности и требует дополнительной обработки всех факторов. При помощи оргстекла и тонких колец из фанеры удалось максимально распрямить нотный диск, однако дорожки на нём всё равно визуально искажены.



Рис. 7, диск для полифона, сфотографированный «на просвет».

Для того, чтобы уменьшить возможные искажения было решено собрать «сканирующее устройство» для диска полифона. Оно будет способно вращать пластину и прижимать её в месте считывания информации (как и делает это настоящий полифон). Для работы с изображением будут использованы библиотека OpenCV (для python) и веб-камера Logitech C920, приобретённая на вторичном рынке.

2.2 Устройство сканера для дисков полифона

Была разработана концепция устройства (см. рисунок 8).



Рис. 8, концепция устройства сканера диска.

Двигатель с редуктором был взят из робототехнического набора, сверху установлен один яркий светодиод. Фиксатор для пластины изготовлен при помощи 3D печати, колёсики поддержки для лучшего вращения диска изготовлены при помощи 3D печати, резинок и подшипника. Корпус был вырезан на станке лазерной резки из фанеры, толщиной 4 мм (рисунок 9). Чтобы избежать прямого попадания источника света в объектив камеры, была наклеена полупрозрачная полоска из бумаги, которая прекрасно передаёт проекции от отверстий. Один яркий источник света сверху добавлен специально, потому что источники света с потолка помещения давали множество проекций отверстий под разными углами.



Рис. 9, реализованное устройство сканера.

Полученное изображение из камеры чётким, контрастным и пригодным для дальнейшего использования (рисунок 10).

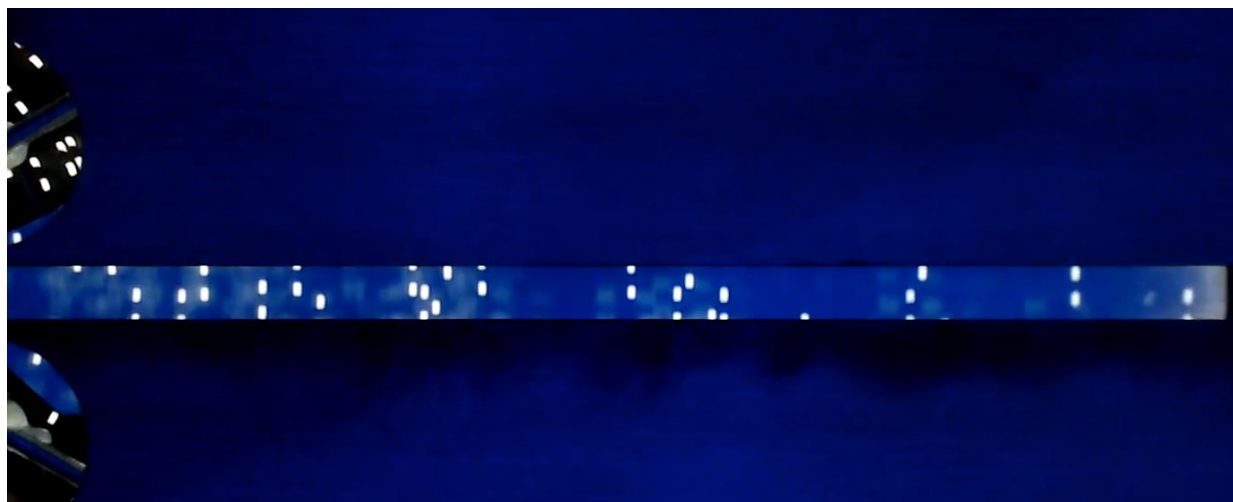


Рис. 10, вид из камеры внутри корпуса.

2.3 Распознавание нотных позиций

В данной работе выполняется распознавание нотного диска с **ГИМНОМ Российской Империи**. Для того, чтобы распознать позиции нот необходимо выполнить подготовку исходных данных: записать видео (30 кадров в секунду)

вращения одного оборота диска (примерно 1 минута). Доступ к видео можно получить по ссылке в приложении к работе.

Чтобы использовать компьютерное зрение было решено выбрать библиотеку OpenCV для Python из-за большого количества понятных примеров и материалов в сети Интернет. Будет распознан каждый кадр на видео как состояние нотного диска в конкретный момент времени (1/30 доля секунды). Если два отверстия на дорожке диска видны камере через щель, то такое состояние будет детектироваться единожды как наличие ноты (тона) до тех пор, пока 2 отверстия не сместятся из кадра. Такой принцип будет применён для всех 100 дорожек. Состояние считывателя каждый кадр будет записываться в виде массива нулей и единиц в файл CSV, где одна строка будет являться одним распознанным кадром.

В кадре обозначена область интереса, разделённая на столбцы-детекторы (рисунок 11). Ширину каждой дорожки необходимо откалибровать один раз под особенности искажений и конструкции диска одной модели полифона (№30), для удобства столбцы (дорожки) в кадре пронумерованы, для дополнительной информации добавлен счётчик срабатываний у каждого детектора, чтобы убедиться в наличии технических 49 и 50 дорожек с 0 распознаваний.

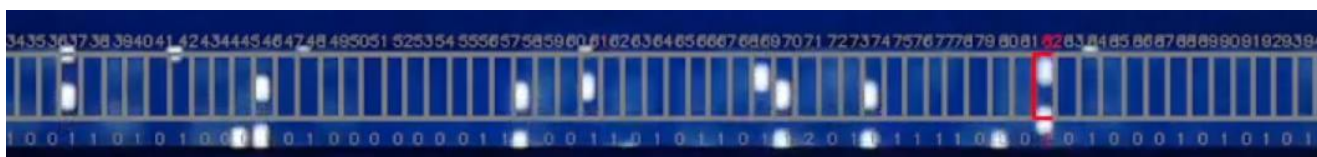


Рис. 11, обрезанный фрагмент демонстрации распознавания

После работы скрипта был получен файл CSV с данными о дорожках.

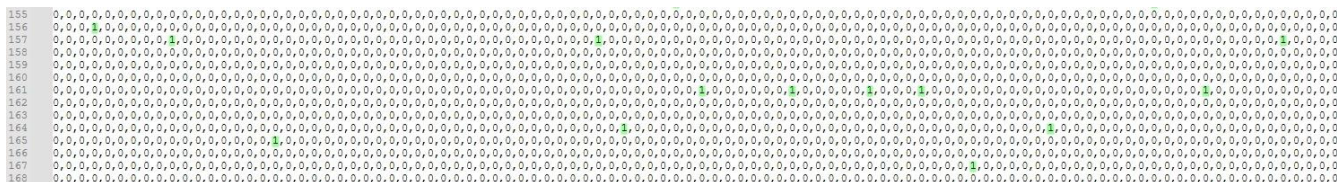


Рис. 12, обрезанный фрагмент файла CSV

В пункте 1.2 данной работы было сделано заключение о смещении чётных дорожек на половину оборота диска. Для того чтобы выполнить смещение чётных дорожек, необходимо найти повтор мелодии, то есть вычислить один полный оборот. Это можно сделать вручную: просто выделить 4 строки в любом месте в начале файла и найти их же в конце — лишнее удалить (в рассматриваемом случае нашлось ровно одна копия строк, что было ожидаемо). Итоговый файл содержит 1888 строк, что является записью одного оборота на самодельном сканере (контрольное измерения продолжительности: 1888 строк разделить на 30 кадров в секунду - совпало с реальным временем совершения одного оборота, почти 63 секунды).

Каждый второй столбец в файле CSV должен быть смещён на половину «высоты» (по индексам строк), либо можно поменять местами две половины между собой в рамках одной распознанной дорожки.

Множество повторяющихся нулевых строк – это начало композиции, так как между концом и началом не воспроизводится ни одна из нот. Для удобства и логичности нужно сместить «по высоте» строки целиком так, чтобы файл начинался с нулевых строк.

Распознанный файл CSV можно получить по ссылке из приложения к работе.

2.4 Попытка воспроизведения мелодии

Для воспроизведения мелодии необходимо понимать, какая тональность у гребёнки (где и какая нота). Сложность воспроизведения мелодии заключается не только в том, что тональность гребёнок неизвестна, но и в том, что полифон рассматриваемой модели имеет 4 гребёнки, две из которых визуально кажутся одинаковыми, а две крайние (короткие) различны между собой (и они не продолжают смещение тонов основных гребёнок по язычкам). Без доступа к реальному инструменту точное попадание ноты попросту невозможно. К тому же, в конце XIX века оркестровые музыкальные инструменты были настроены

на ноту «Ля» частотой 451 герц [1], что отличается от тональностей в современных музыкальных стандартах. Несмотря на это мы выдвигаем гипотезу, что первый язычок основной гребёнки – это нота «До» второй октавы.

Так как гребёнки полифона предположительно находятся в «дуплексе» на каждые подряд идущие 2 дорожки мы назначим 1 ноту. В программном синтезаторе MIDI «До» второй октавы находится под индексом 36. Инструмент, похожий на музыкальную шкатулку, находится под индексом 10.

При помощи библиотеки `mido` для `python` составим файл MIDI, воспроизводя ноты в одной строке файла CSV одновременно с заданной задержкой между строками. Результат «компиляции» звукового файла в текстовой работе представить невозможно, однако этот файл можно получить по ссылке в приложении к работе.

В результате нескольких попыток подобрать смещение нот для гребёнок средствами MIDI была получена отдалённо похожая мелодия на гимн Российской империи. Гребёнкам `Piccolo` и вовсе подобрать звучание не удалось, поэтому самая удачная итерация подбора переменных не содержит звуков высоких тонов.

Ссылка файлы прокомментированных скриптов `python` представлена в приложении.

Заключение

Распознавание диска немецкого полифона XIX века с использованием современных технологий компьютерного зрения представляет собой важный шаг в попытке сохранения и восстановления культурного наследия.

Цель данной работы достигнута – был разработан метод оцифровки дисков для полифонов. Стоит отметить, что в перспективе предстоит большая работа по исследованию тональностей гребёнок для более точного и реалистичного звучания мелодии. Сделать следующий шаг крайне затруднительно из-за того, что необходимые полифоны находятся в основном в зарубежных частных

коллекциях и музеях, а продавцы полифонов не заинтересованы в исследовательской помощи и отказываются от содействия.

Для того, чтобы привлечь энтузиастов к решению выявленной нами технологической проблеме была опубликована научно-популярная статья на ресурсе «Хабр» <https://habr.com/ru/articles/872176/>, в результате которой мы получили большой объём обратной связи, гипотез и идей, которые будут рассмотрены в дальнейшей работе над проектом.

В ходе работы над проектом были достигнуты следующие результаты:

- проведен анализ исторического контекста и технических характеристик полифонов XIX века, что позволило лучше понять их устройство и принцип работы;
- собраны и подготовлены данные, включая изображения и аудиозаписи дисков полифона, что позволило создать базу для дальнейшего анализа;
- разработано устройство для сканирования дисков полифона, которое обеспечило распознавание перфораций на нотных дисках;
- разработаны алгоритмы компьютерного зрения для автоматического распознавания и интерпретации перфораций на дисках;
- предпринята попытка воспроизведения мелодии на основе распознанных данных. Несмотря на трудности, связанные с неизвестной тональностью гребёнок, удалось получить отдалённо похожую мелодию на гимн Российской империи.

Проект по распознаванию диска немецкого полифона XIX века Symphonion model №30 с использованием современных технологий компьютерного зрения показал свою перспективность. Результаты работы могут быть полезны не только для историков и музыковедов, но и для широкой аудитории, интересующейся культурным наследием и технологиями прошлого. Код проекта будет выложен в открытый доступ после доработок.

Список использованных источников

1. Частота и высота. — Текст : электронный // Chromatone.center : [сайт]. — URL: <https://chromatone.center/theory/sound/pitch/> (дата обращения: 03.01.2025).
2. Машина для изготовления нотных пластин для музыкальных шкатулок: пат. 500,373 США. № 459,599 / Бракхаузен Г.А., Риснер П. ; заявл. 24.01.1893 ; опубл. 27.06.1893. 6 с.
3. Музыкальная шкатулка: пат. 610,504 США. № 640,656 / Валикет Л.П., Сюэр А. ; заявл. 14.06.1897 ; опубл. 06.09.1898. 2 с.
4. Музыкальная шкатулка: пат. 359,278 США. № 293,316 / Парр Э. ; заявл. 25.05.1885 ; опубл. 15.03.1887. 6 с.
5. Antoine Favre-Salomon. — Текст : электронный // Википедия : [сайт]. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Antoine_Favre-Salomon (дата обращения: 03.01.2025).
6. Дуплексная музыкальная шкатулка: пат. 356,251 США. № 187,938/ Жюно А. ; заявл. 08.01.1898 ; опубл. 18.01.1898. 3 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Проектные файлы

Для доступа к медиафайлам перейдите по ссылке:

https://drive.google.com/drive/folders/1Lgh37v3t1MLDFdoBBgQX7CPYVERHzjuj?usp=drive_link

Для удобства воспроизведения на современных устройствах создан файл `duplex without piccolo.flac` – это тот музыкальный файл, который был получен в пункте 2.4 работы, однако в папке представлены и иные итерации создания музыкальных файлов.

Для доступа к исходным кодам на языке Python с подробными комментариями перейдите по ссылке:

https://drive.google.com/drive/folders/1m0fDk6gYPZQt9rUQMTkQzoT0kNz6DWNm?usp=drive_link

`recognizer.py` – скрипт распознавателя, требует видеофайл для работы.

1. Впишите корректное имя файла в коде.
2. Расположите файл `column_calibration.json` в рабочей папке (файл содержит информацию о ширине каждого столбца-детектора).
3. Запустите скрипт, при появлении визуализации нажмите на пробел однократно для запуска автоматического покадрового распознавания. Дождитесь последнего кадра и завершите работу скрипта.
4. Определите в текстовом редакторе границы одного оборота по инструкции в тексте работы, сохраните изменения.

`Processingoffile.py` – скрипт преобразования чётных столбцов файла CSV на половину оборота диска. Итог работы скрипта – новый файл `fixed.csv`.

`playthisfile.py` – скрипт конвертации CSV файла в файл MIDI (требуется доработка кода и точная настройка тональности звучания, данный скрипт не является целью представленной работы, лишь перспективная наработка для следующего шага и проверки гипотез)

Хранитель музейных предметов ГБУК
«Пензенский государственный краеведческий музей»

Королев Александр Петрович

РЕЦЕНЗИЯ

На работу «Распознавание при помощи компьютерного зрения диска немецкого полифона XIX века «Symphonionmodel №30» представляет собой весомый вклад в сохранение и популяризацию культурного наследия, связанного с механическими музыкальными инструментами. Авторы проекта, Журавлёв Алексей Владимирович и Мионов Владислав Максимович продемонстрировали не только высокий уровень технического мастерства, но и глубокое понимание исторического и культурного контекста полифонов. Эти механические устройства, популярные на рубеже XIX и XX веков, играли важную роль в музыкальной культуре того времени, предоставляя возможность воспроизведения музыки без участия живых музыкантов.

Одной из ключевых задач проекта было исследование исторического контекста и технических характеристик полифонов. Авторы тщательно изучили историю развития этих устройств, начиная с первых музыкальных шкатулок и заканчивая более совершенными моделями конца XIX века.

Практическая часть проекта включала разработку устройства для сканирования дисков полифона и алгоритмов компьютерного зрения для автоматического распознавания и интерпретации перфораций на нотных дисках. Использование современных технологий, таких как 3D-печать, лазерная резка и программное обеспечение для обработки изображений, позволило авторам создать решение для распознавания нотных позиций. Это, в свою очередь, открывает новые возможности для восстановления и воспроизведения исторических музыкальных произведений, записанных на этих дисках.

Важным аспектом проекта является его культурная и историческая значимость. Проект также способствует популяризации культурного наследия, делая исторические музыкальные произведения (их аранжировки) доступными для широкой аудитории.

Проделанная авторами работа представляет собой выдающийся пример сочетания технического мастерства и культурологического подхода. Авторы продемонстрировали высокий уровень профессионализма и инновационного мышления, что делает их работу заслуживающей высокой оценки и признания. Проект не только сохраняет и восстанавливает культурное наследие, но и вдохновляет на дальнейшие исследования в области истории музыкальных технологий и культурологии.



/Королев А.П./