

# Использование методов алгоритмической математики, прикладной информатики и электроники при проектировании сверхскоростного робота-художника

М. А. Семенченко

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

i.am.mikhail.semenchenko@gmail.com

**Аннотация.** В докладе представлен опыт разработки сверхскоростного робота-художника, реализованной с использованием методов алгоритмической математики, прикладной информатики и электроники. Рассмотрены конструктивные решения, позволяющие повысить производительность устройства в 60 раз по сравнению с существующими аналогами, а также алгоритмические методы оптимизации обработки изображений и формирования траекторий движения. Особое внимание было уделено пересмотру конструкции кинематической системы, улучшению алгоритмов обработки изображений и внедрению современных технологий для решения новых инженерных задач, возникших в условиях работы узлов робота на высоких скоростях.

**Ключевые слова:** робот-художник; алгоритмическая математика, кинематика, электроника, обработка изображений, робототехника, алгоритмы поиска оптимального пути, генеративно-соревновательные нейросети

## I. ВВЕДЕНИЕ

На момент начала работы над этой машиной в инженерной среде отсутствовал спрос на ускорение работы подобных устройств, поскольку они применялись либо для обработки деталей на станках с числовым программным управлением, где непредсказуемо быстрые движения массивных элементов конструкции могут привести к человеческим жертвам и повреждению оборудования из-за перегрузок, либо для отрисовки портретов немногими любителями, готовых подождать результата несколько часов. Меня заинтересовала возможность применения данной технологии в развлекательной индустрии, где обработка большого потока людей потребовала бы сокращения времени отрисовки портрета до 3–6 минут, а также эстетический аспект угольных портретов и желание исследовать возможность их отрисовки посредством робота.

Именно поэтому я критически подошёл ко всем аспектам существующего оборудования. Первая проблема заключалась в хрупкости механизмов: они подвержены вибрациям, колебаниям и резонансам, а значительное ускорение работы могло бы не только ухудшить качество портретов, но и привести к разрушению механических узлов из-за перегрузок. Вторая проблема – неэффективность математических алгоритмов для обработки изображений. Если при длительном процессе рисования лишние движения не столь критичны, то для поставленной задачи поиск

оптимальной траектории становится насущной проблемой, решение которой потребовало детального изучения алгоритмов и нейросетей.

## II. КОНСТРУКТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

### A. Кинематическая система

Начнём с конструктивных изменений. В первую очередь, я обратил внимание на переработку кинематической системы. Изучая опыт сообщества 3D-принтеров, где проводилось соревнование по скоростной печати маленьких лодок (поначалу как шутка, а со временем – настоящая инженерная задача), разработчики добились значительных улучшений производительности печати пластиком. Такие сообщества инженеров как «Voron (Ворон)», «Annex Engineering (Аннекс Инжиниринг)» и «CroXY (Крокси / КроЭксВай)» предложили различные решения.

В частности, группа «Аннекс Инжиниринг» применила крестообразную систему кинематики, а «Ворон» – H-образную систему. В последней ремень от шагового двигателя передавался к актуатору, затем возвращался обратно к оси, и шёл прямо к месту крепления, образуя прямую с перпендикулярным отступом. Для второго двигателя выполнялась такая же схема крепления ремня, симметрично относительно актуатора. Для перемещения актуатора по координатам рабочей поверхности задаётся разное направление движения двух шаговых двигателей. Недостатком этой конструкции является значительная длина ремня, что приводит к его заметному расширению при высоких ускорениях (например, даже 0,1% расширения при длине ремня в метр даст смещение на актуаторе в 1 миллиметр), что негативно сказывается на качестве печати и, в рамках нашей задачи, рисунка. Можно было бы использовать более толстый и широкий ремень, но такое решение привело бы к необходимости увеличивать диаметр шестерни на роторе – иначе, согласно исследованиям Американского общества инженеров, произойдёт соскальзывание ремня с шестерни, разрыв ремня или слом оси шагового двигателя из-за неравномерной нагрузки, что приводило бы к увеличению минимального шага двигателя, что снижало бы детализацию изображения, и как следствие, сделало бы невозможным рисовать мелкие детали на портретах.

По вышеперечисленным причинам я решил применить другую кинематическую систему, в которой длина ремня существенно сокращена (рис. 1). В

англоязычной литературе она называется cross-gantry system (система с перекрёстными балками). В ней вместо двух двигателей используются четыре, что позволяет равномерно распределить нагрузку и добиться большей мощности всей системы, а длина ремня уменьшается примерно в два раза. Дополнительным преимуществом такой системы является отказоустойчивость: при выходе из строя даже двух двигателей (при условии, что они отвечали за движение актуатора по разным осям), робот может продолжать работу. Помимо этого, актуатор прочно закреплён в перекрестье двух балок и меньше подвержен незапланированным колебаниям и вибрациям.

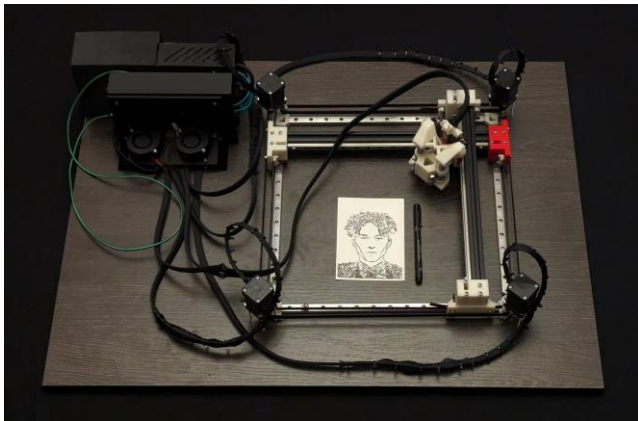


Рис. 1. Изображение конструкции робота-художника

### *В. Использование рельс и двигателей*

Особое внимание я уделил использованию рельс. При сборке робота применялись рельсы, разработанные для медицинского оборудования (например, аппаратов УЗИ), обладающие минимальным люфтом, высокой устойчивостью к износу и способностью выдерживать длительные скоростные нагрузки. При этом важно учитывать гальваническую коррозию: рельсы из углеродистого металла необходимо крепить к балкам с соответствующим составом, чтобы избежать быстрого разрушения металлов в местах их соприкосновения.

Шаговые двигатели я выбрал в классе 24 вольт. Хотя теоретически возможно использование 48 вольт для повышения показателей, это было бы сопряжено с рисками для жизни людей, использующих робота, и сложностями в управлении, так как драйверы для 48-вольтовых систем уже относятся к промышленному оборудованию, они не такие компактные и, как правило, не обладают необходимым для поставленной задачи объёмом библиотеки драйверов. Поэтому оптимальным решением стал вариант на 24-вольта. Для управления двигателями использовалась материнская плата от компании BigTreeTech под названием «Octopus (Осьминог)», позволяющая одновременно контролировать до восьми шаговых двигателей. Сервоприводы подключены к программируемым контактам датчиков, а запитываются от реле питания кулеров охлаждения.

### *С. Управление движением и охлаждение*

Чтобы робот мог быстро менять направление движения актуатора, нужно учитывать, что при изменении направления движения на катушке возникает магнитная индукция, которая препятствует смене направления ротации. Для компенсации этого эффекта напряжение на двигатели было увеличено, а сила тока

снижена до оптимальных значений, что позволяло избежать перегрева драйверов и пропуска шагов. Оптимальные параметры были определены экспериментально с помощью тестовых отрисовок линий, когда шаговый двигатель возвращался в исходное положение, а результаты дополнительно проверялись программным обеспечением для подтверждения корректности команд.

Также необходимо предусмотреть возможность сбоя – робот может столкнуться с препятствием или сбиться с системы координат по ходу работы. Для этого применяется процедура возврата в домашнюю позицию. Традиционно используются датчики, фиксирующие контакт вагонетки с концом рельсы, посредством прерывания подачи тока на шаговый двигатель из-за нажатия вагонеткой на контакт, что позволяет затем программно обнулить координаты позиции актуатора. Однако такая система имеет свои недостатки: возможное отталкивание актуатора, занимаемое датчиками в ущерб рабочей поверхности пространство и неточности при калибровке. Поэтому я применил метод регистрации изменения поведения электрического тока на драйверах: при достижении конца рельсы вагонетка сталкивается с упором, и двигатель начинает пропускать шаги – из-за сниженной программно силы тока, ему не наносится вреда – затем этот факт программно фиксируется как достижение домашней позиции, и координаты обнуляются. Такое решение позволило упростить конструкцию, а также освободить рабочую поверхность и места для подключения датчиков на материнской плате, поскольку они больше не требуются.

### *Д. 3D-печать и компактность конструкции*

Все элементы, отвечающие за точное расположение актуатора и рельс, были изготовлены с помощью 3D-печати, что позволило добиться высокой прочности компонентов и увеличить рабочую поверхность при компактности конструкции. Использовался ABS-пластик с заполнением 100 %, а печать производилась на 3D-принтере в локальной библиотеке. Модели на печать – результат командной работы меня и моего лучшего друга, которого я упомяну в разделе VI. Этот этап занял 3 недели круглосуточной работы в программах Blender и SketchUp.

### *Е. Задача отрисовки угольным карандашом*

Смена пишущего инструмента создала необходимость разработки принципиально новой конструкции актуатора. Я хотел использовать угольный карандаш или кистевую ручку, а не линер, являвшийся конвенциональным решением. На этапе проектирования было замечено, что, в теории, поскольку в процессе рисования уголь изнашивается, угольный карандаш быстро потеряет контакт с бумагой, поэтому стало важно придумать технологию, компенсирующую этот недостаток.

Решение, основанное на использовании дополнительного шагового двигателя для постепенного опускания карандаша вниз с целью компенсировать стачивание, оказалось нежелательным из-за необходимости сохранить лёгкость актуатора для обеспечения высокой скорости и низкой инертности конструкции. В итоге было выбрано решение с сервоприводами с фиксированным шагом, активируемых по команде с реле датчиков, в сочетании с системой пружин, которые бы амортизировали надавливание карандаша на рабочую поверхность. Сервопривод

опускал актуатор, а пружины компенсировали давление, обеспечивая стабильное удержание карандаша на поверхности бумаги. После завершения нажатия сервопривод поднимал актуатор, а пружины возвращались в исходное состояние под действием накопленной потенциальной энергии. Сам актуатор закреплён на уменьшенной версии всё тех же медицинских рельс для аппаратов МРТ, а превращение вращательного движения в поступательное происходит посредством касаний параболической лапки сервопривода полукруглой поверхности верхней и нижней стенки отверстия в плечах их контакта с актуатором (рис. 2).

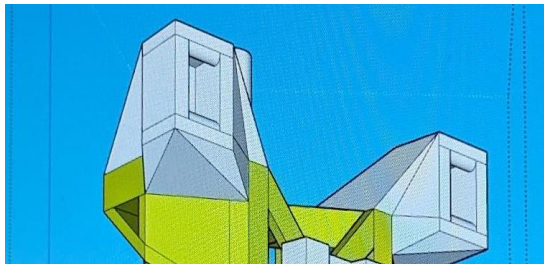


Рис. 2. Плечи актуатора робота-художника

## II. АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### A. Перегрев и резонанс

Была замечена проблема перегрева драйверов шаговых двигателей и возникновения резонанса робота с самим собой при работе. Если первую проблему удалось решить, снизив силу тока на драйверах шаговых двигателей, то вторая требовала алгоритмический подход.

Был применён алгоритм компенсации резонанса, который в сообществе инженеров 3D-принтеров зовётся *input shaping*. Этот метод заключается в регистрации частот колебаний актуатора, при которых возникает резонанс с собственной частотой робота, и исключении таких движений при выполнении перемещения по заданным координатам, а также добавление в поведение актуатора таких движений, что будут гасить вибрации машины (рис. 3).



Рис. 3. Процесс замера собственной частоты колебаний робота

Таким образом, удалось устранить и колебания, и необходимость в размещении акселерометра на самом актуаторе, что позволило снизить его вес, что в свою очередь крайне важно для высокоскоростной работы. После исключения нежелательных частот из инструкций движения, была получена возможность ещё больше программно увеличить угловую скорость движения актуатора – или отрисовывать портреты по алгоритмам, связанных с высоким числом колебаний (рис. 4).

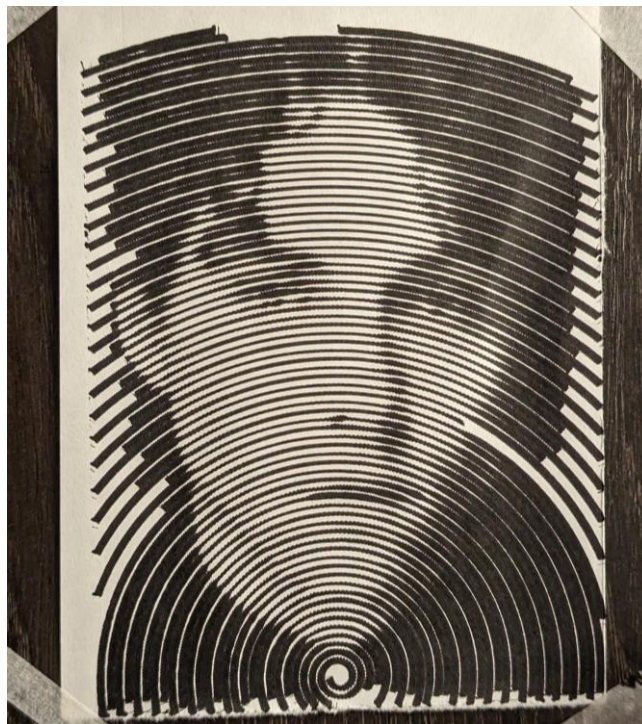


Рис. 4. Пример алгоритма

### B. Обработка изображений

В ходе тестирований и изучения существовавших библиотек, обнаруженные алгоритмы перевода фотографий в векторное изображение оказались недостаточно эффективными. Обычно процесс сводился к преобразованию растрового изображения в векторное, после чего создавался G-код – список координат, по которым должен двигаться актуатор с учётом диаметра его рабочей головки. При гравировке или 3D-печати используется послойное заполнение, но в нашем случае необходимо учитывать сложные зоны (например, ресницы), где требуется отрыв актуатора от поверхности и последующий оптимальный путь, повторяющий естественные движения руки при прорисовывании мелких деталей. Это значительно усложнило задачу поиска оптимального маршрута.

Классические проприетарные библиотеки (например, *DrawingBot-v3*), преобразующие фотографии в траектории для актуатора, генерировали пути длиной 90–100 тысяч миллиметров (около сотни метров) (рис. 5).





Рис. 5. Пример неэффективности алгоритма из одной из проприетарных библиотек на момент проектирования робота

Мне удалось сократить эту длину до 3–7 тысяч миллиметров – один только этот шаг позволил сократить время отрисовки каждого рисунка в 14 раз с 3 часов до 15 минут. Однако с увеличением скорости дальнейшее улучшение становится всё сложнее: зависимость сложности модернизации и улучшения обладала логарифмическим характером. Иначе говоря, дальнейшее сокращение времени отрисовки потребовало значительных усилий и дальнейших модернизаций.

### С. Анализ изображений и выбор аттракторов

Чтобы придумать как уменьшить путь, который проходит актуатор при работе, я изучил несколько книг по художественному рисованию портретов, уделив особое внимание главам, посвящённым работе с углём, чтобы лучше понять, как художникам удаётся создавать образ, не вызывающий при восприятии чувства неестественности. К сожалению, на момент создания робота, мне не хватило знаний для обучения нейросети или группы агентов, способных оптимально разбивать изображение на участки, как это делает художник, например, при отрисовке волос и глаз. Художник не соединяет тысячи точек, а вводит руку свободно, создавая при этом эффект потока для волос или, к примеру, слёз и капель дождя, смазывающих косметику. Попытки использовать нейросетевые библиотеки (генеративно-состязательные, диффузионные модели) оказались слишком вычислительно затратными для задачи быстрого рисования и не принесли удовлетворительного результата.

В результате я провёл собственное исследование, изучив сотни портретов с каналов на видеохостинге YouTube, посвящённых рисованию угольных портретов, и собрал выборку тестовых фотографий людей с различным типажом внешности – от людей с гладко выбритыми головами и обладателями бород, или тех, у кого брови такие светлые, что сливаются с тоном кожи,

до тех, кто держит в кадре своего домашнего питомца. Это позволило оценить поведение алгоритма в нестандартных ситуациях, с которыми может столкнуться пользователь робота в условиях мероприятия.

Автор статьи организовывал работу фотозоны для более чем 200 мероприятий – в основном свадеб – этот опыт позволил ему добиться постоянства в свойствах освещения и типовых позах при фотографировании, что упростило задачу написания алгоритма. Для освещения применялась комбинация видеосвета и белого зонта для рассеивания теней, а при фотографировании использовалась камера смартфона Google Pixel 7 Pro, чей телеобъектив по своим характеристикам искажения пропорций фотографируемого объекта является эквивалентом линзы с фокусным расстоянием 135–150 мм, примерно совпадающей с глубиной черепа человека, из-за чего пропорции лица на снимке становятся ближе к естественному восприятию невооружённым глазом, из-за чего портретное фото выглядит лучше. Чтобы устранить необходимость детекции и удаления фоновых шумов за человеком, был использован переносной белый фотофон.

В рамках моего исследования закономерностей распределения оттенков серого в угольных портретах, я написал Python-код, который переводил готовые портреты с видеохостинга YouTube в чёрно-белый формат – для устранения возможных различий, вызванных кодированием и сжатием видеопотока – и провёл статистический анализ распределения оттенков серого на них. На основе анализа были выбраны ключевые значения (аттракторы) для упрощения градиентов изображения. Например, при делении градиента от 0 до 255 можно было установить аттрактор на уровне 20 с шагом 12,5, чтобы все оттенки от 0 до 12,4 сводились к нулю, а оттенки от 12,5 до 35,5 сдвигались к 20 (рис. 6).

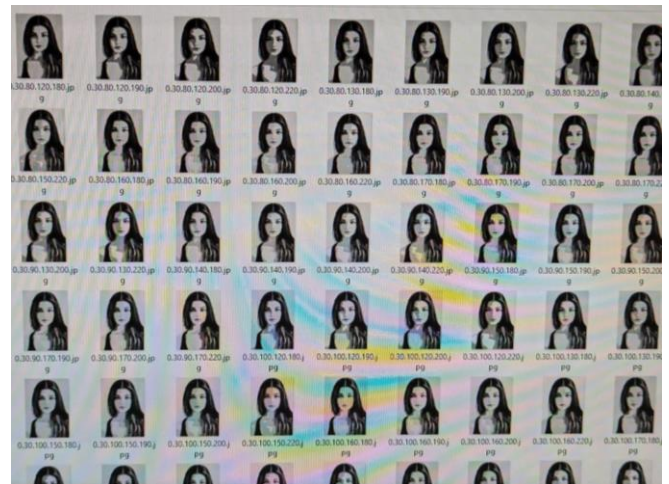


Рис. 6. Выявление статистически оптимальных оттенков серого

Итерации проводились для 10 слоёв, что позволяло выявлять закономерности в восприятии изображения. Были определены следующие позиции аттракторов: 0, 20, 50, 80, 120, 180, 198, 200, 215 и 220. Как известно, чем мягче карандаш, тем больше материала с него стачивается за единицу времени в процессе рисования, и тем темнее получается итоговая линия. Соответственно, я увидел возможность имитировать разные степени

нажатия на карандаш, посредством разбиения монохромного изображения на слои, и их последующую отрисовку углём разной плотности. Оттенки по позициям 20 и 50 использовались для имитации мягкого карандаша, 80 и 120 – среднего, а 180 и 198 – твёрдого карандаша. Эмпирическим путём было получено понимание, что остальные оттенки можно исключить с пользой для конечного результата, так как это позволило убрать лишние шумы, тени, морщины и отблески, не относящиеся к сути изображения. Итоговое изображение состояло из трёх слоёв, которые, хотя и были существенно проще исходного, передавали красоту и изящность, необходимые для хорошего угольного портрета.

#### D. Генерация G-кода

После этого возникла задача перевода полученного изображения в G-код. Я пробовал написать собственный алгоритм, итерируясь по пикселям с учётом их принадлежности к группе карандашей, но результат не удовлетворял требованиям, особенно при отрисовке волос, которые должны выглядеть естественно (рис. 7).

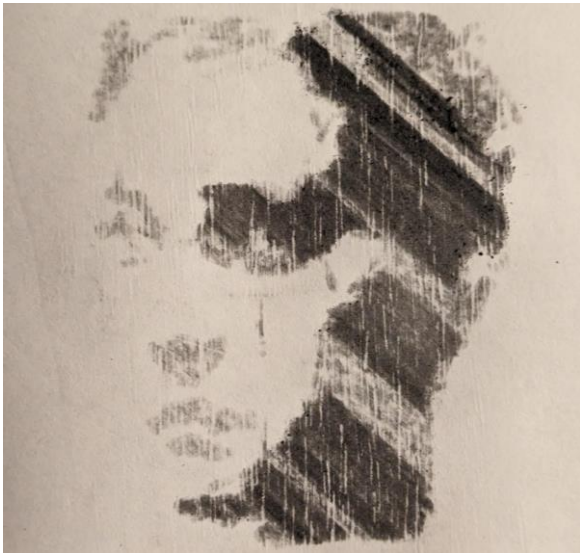


Рис. 7. Пример одной из версий собственного алгоритма отрисовки

Поэтому была поставлена задача отрисовки кривых, соответствующих направлению роста волос. Изучив существующие решения (алгоритмы построения кривых Безье и диаграммы Вороного), я решил использовать готовые библиотеки для перевода итогового векторного изображения в G-код, а предобработку изображения осуществлять самостоятельно с применением собственных алгоритмов. Преимущество моего подхода заключалось в низкой вычислительной сложности и скорости обработки.

#### E. Выявление контуров на фотографии

Вопрос выделения контуров на изображениях также требовал решения. Существовавшие методы не отвечали требованиям поставленной задачи (рис. 8).



Рис. 8. Сравнение разработанного в рамках проекта алгоритма (слева) и популярного на тот момент в сообществе любителей плоттеров (справа)

В ходе размышлений, я обнаружил такой способ решить задачу: объединить три слоя, полученные в результате обработки оттенков серого с аттракторами, дополнительно свести их к двум аттракторам, скопировать и инвертировать изображение, применить гауссовское смещение, перемножить матрично, а затем инвертировать полученное изображение обратно – в зонах постоянства оттенка, одинаковые цвета при перемножении на их инвертированную версию, вернут 0, то есть белый цвет, а там, где была граница резкого перехода, гауссовское размытие заставит перемножиться два, теперь уже одинаковых, цвета, что вернёт нам 1, то есть искомый контур (рис. 9).

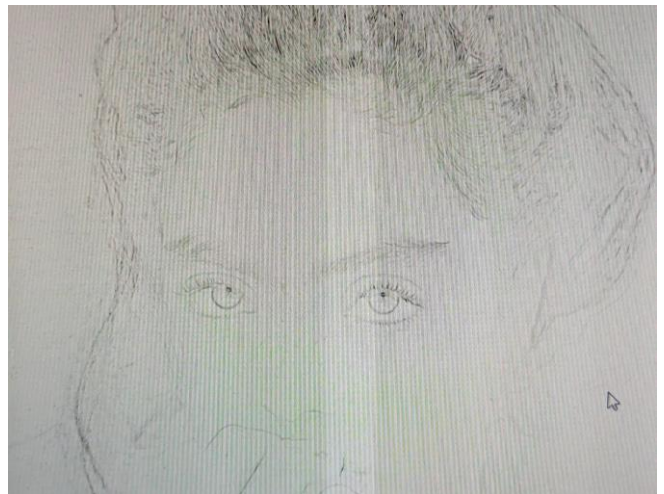


Рис. 9. Пример использования алгоритма поиска контуров

При этом, если отрисовка выполняется несколькими инструментами, контур можно отправить на слой с самым тёмным из них, для создания драматических переходов (рис. 10 и 11).



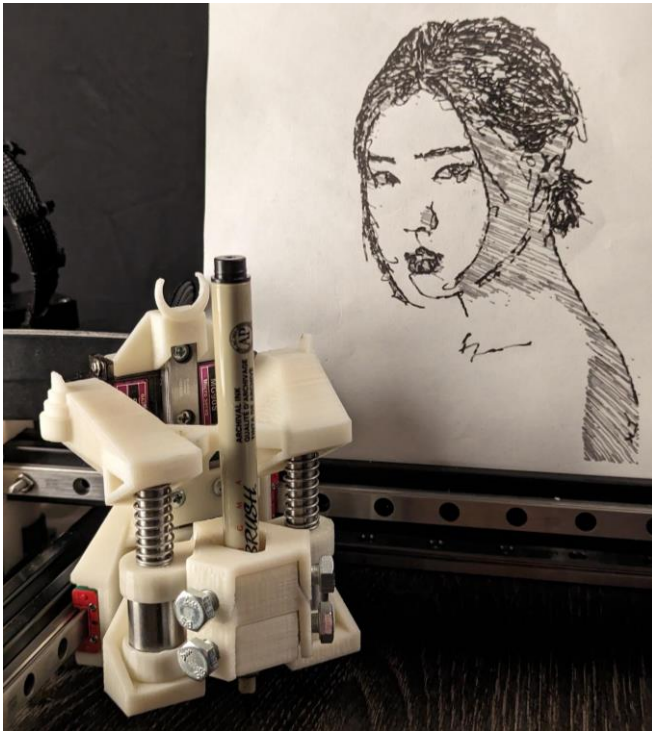


Рис. 10. Пример рисования в несколько слоёв

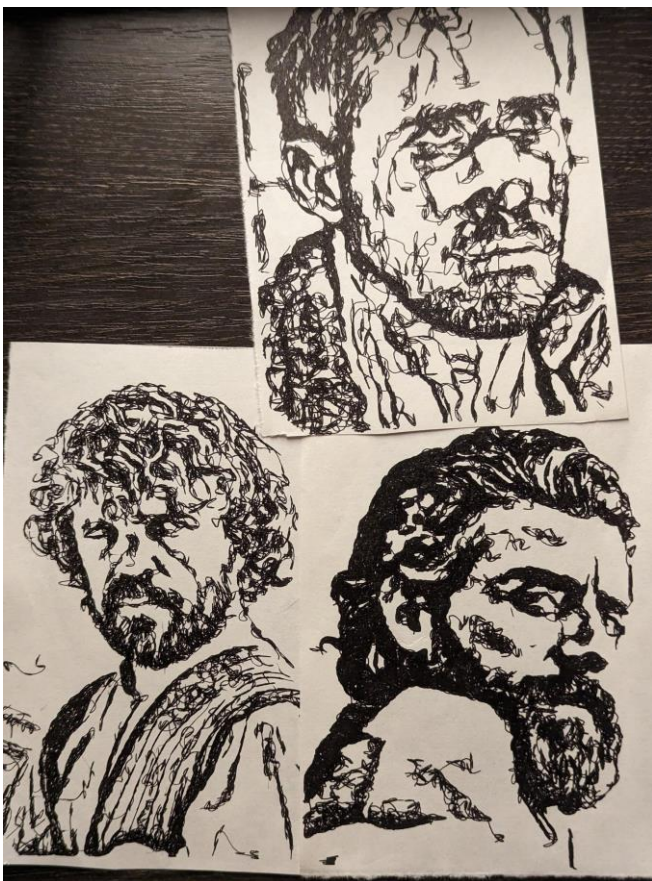


Рис. 11. Пример рисования в один слой кистевой ручкой

### III. БУДУЩИЕ УЛУЧШЕНИЯ

#### A. Алгоритмы обработки изображения

Дальнейшее улучшение показателей этой машины потребует знаний в области машинного обучения, алгоритмов Монте-Карло и решений задачи

коммивояжёра. В перспективе планируется разработка программного обеспечения, которое будет преобразовывать части портрета в векторные кривые, а также распределять задачи между несколькими агентами, специализирующимися на различных моторных движениях. Так, один агент смог бы отвечать за отрисовку глаз (используя круговые движения), другой – за прорисовывание линии волос по основному вектору их роста. Некоторые агенты будут определять области, требующие такого особого внимания, а другие оценивать общее качество получившегося изображения. Возможно, этот подход позволит добиться улучшения результатов, или даже превзойти человеческие возможности в области рисования угольных портретов.

#### B. Конструктивные улучшения

Планируется также внести несколько модификаций в кинематическую часть, когда будет разработано улучшенное программное обеспечение. Использование ABS-пластика со стопроцентным заполнением обеспечило прочность конструкции; рельсы крепились с помощью крестообразных балок, что снизило массу подвижных узлов. Запчасти также были гальванически покрыты алюминием, окрашенным в черный цвет, что позволяло им работать в контакте с другими металлами без риска гальванической коррозии. Ремни были высококачественными и кожаными, а их геометрия (толщина, ширина и шаг между звеньями) рассчитывалась в соответствии с рекомендациями Американской ассоциации инженеров для обеспечения надёжного крепления шестерни на роторе и равномерного натяжения.

Тем не менее, существуют наработки в области кинематики с использованием нитей вместо рельс – в следующей версии робота-художника я бы хотел применить именно её.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая работа демонстрирует, что комплексный подход к проблеме, включающий пересмотр конструктивных элементов и алгоритмическую оптимизацию, позволяет существенно повысить скорость и качество работы станков ЧПУ, в том числе и для отрисовки портретов. Надеюсь, что такие вызовы как, например, задача сократить время работы устройства в 60 раз по сравнению с традиционными методами, и дальше будут находить энтузиастов, желающих их решить, ведь в процессе работы над такими проблемами создаётся технологический прогресс и база знаний, в том числе, которой пользовался и я при конструировании робота из данного доклада. Дальнейшее развитие проекта также предполагает использование методов машинного обучения для повышения точности и естественности отрисовки, а также распределения вычислительных задач между специализированными модулями, а также проверку возможностей неконвенциональных кинематических систем.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Спасибо моему другу Разумову Константину Александровичу за неоценимый вклад и помощь в разработке моделей деталей для последующей печати на 3D-принтере.

Выражаю благодарность своему научному руководителю и преподавателю математического анализа Медведеву Алексею Николаевичу за содействие в изучении алгоритмов Монте-Карло и задачи коммивояжёра, а также помощь в написании данного доклада.

Благодарю своего преподавателя по физике Кузьмину Наталью Николаевну за помощь в подготовке текста доклада и рецензировании статьи, а также в изучении фундаментальных принципов работы электронных устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Singhose W.E., Seering W.P., Singer M.C. Input Shaping for Vibration Reduction With Specified Insensitivity to Modeling Errors. January 1996.
- [2] Moyer I.E. CoreXY. [Электронный ресурс]. URL: <https://corexy.com/theory.html> (дата обращения: 14.03.25).
- [3] Sollmann K., Jouaneh M.K., Lavender D. Dynamic modeling of a two-axis, parallel, H-frame-type XY positioning system. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2010, vol. 15, pp. 280–290. DOI: 10.1109/TMECH.2009.2020823.
- [4] Bertsekas D.P. A Course in Reinforcement Learning. Arizona State University, [2023]. [476].
- [5] Civardi G. The Portrait: How to Draw Faces and Figures. Печатается по изданию: Giovanni Civardi. «IL RITRATTO: COME DISEGNARE VOLTI E FIGURE». Перевод Олега Семенова. М.: Эксмо, 2006. 64 с, ил. (Классическая библиотека художника).