

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Науково-навчальний інститут комп'ютерно-інформаційних технологій,
автоматизації та радіоелектроніки**
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра Автоматики та телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
завідувач кафедри
В.В. Поцєпаєв
(підпис) (ініціали, прізвище)
“__” _____ 2025 р.

Випускна кваліфікаційна робота

магістра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **«Програмно-апаратний комплекс для вимірювання геометричних параметрів зразка оптичним методом»**

Виконав : студент 2 курсу, групи

СУАзм-23
(шифр групи)

напряму спеціальності

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Мирончук Г.Л.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник

зав. каф., к.т.н., доцент Поцєпаєв В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

зав. каф. ВНУ, д.ф-м.н., проф. Галян В.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

доц., к.т.н., доц. Штепа О.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль:

Дар'я Жуковська

13.05.2025 р

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Дрогобич – 2025 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Навчально-науковий інститут комп'ютерно-інформаційних технологій та
автоматизації

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра автоматики та телекомунікацій
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота
магістра

Тема: «Програмно-апаратний комплекс для вимірювання геометричних
параметрів зразка оптичним методом»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. СУАзм-23

Галина МИРОНЧУК

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Валерій ПОЦЕПАЄВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Ганна ТЕЛИЧКО

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Вікторія ВОРОПАЄВА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Олександр СЕРГІЄНКО

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтроль

Дар'я ЖУКОВСЬКА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дрогобич – 2025 р.

Державний вищий навчальний заклад

Кафедра Автоматика та телекомунікації

Галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Діаграма під'єднання комплектуючих; програмно-апаратний комплекс у
 зібраному вигляді.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Теличко Г.О., к.т.н., доцент		
2	Воропаєва В.Я. к.т.н., проректор		
3	Сергієнко О.І. к.т.н., доцент		
Нормо-контроль	Жуковська Д.О., ст. викладач	-	13.05.2025 р.

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд методів вимірювання геометричних параметрів об'єкта	01.10.2024	
2	Вибір складових програмно-апаратного комплексу для вимірювання розмірів оптичним методом	01.12.2024	
3	Теорія тріангуляції	01.02.2025	
4	Організація роботи програмно–апаратного комплексу	01.05.2025	

Студент _____ Галина МИРОНЧУК
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Валерій ПОЦЕПАЄВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Мирончук Г.Л. Програмно-апаратний комплекс для вимірювання геометричних параметрів зразка оптичним методом / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Дрогобич, 2025.

Пояснювальна записка: 116 стор., 63 рис., 17 табл., 20 посилання.

У випускній кваліфікаційній роботі представлено розробку програмно-апаратного комплексу для вимірювання геометричних параметрів об'єктів малого розміру (50–150 мм) з використанням оптичного методу лазерної тріангуляції. Система дозволяє отримувати тривимірну модель об'єкта на основі серії 2D-зображень, отриманих з веб-камери під час обертання об'єкта на кроковому моторі. Обробка зображень включає етапи фільтрації, бінаризації, виявлення лазерної лінії та побудову 3D-моделі методом визначення перетину площини лазерного випромінювання з променями камери. Для реконструкції об'єкта застосовано математичну модель пінхол-камери. Досягнута точність вимірювання становить $\pm 0,5$ мм. У роботі обґрунтовано вибір технічних засобів, проведено аналіз альтернативних методів. Розроблений комплекс не призначений для промислового використання, однак може бути легко модифікований з використанням промислових контролерів типу Siemens SIMATIC або Beckhoff. Практичне значення полягає у створенні доступної, модульної установки для вивчення технологій 3D-сканування в освітньому процесі, наукових дослідженнях і при розробці прототипів у сфері 3D-друку. Отримані результати демонструють ефективність недорогого підходу до точного тривимірного вимірювання об'єктів засобами інженерної автоматизації.

Ключові слова: оптичне вимірювання, лазерна тріангуляція, програмно-апаратний комплекс, 3D-моделювання, обробка зображень, геометричні параметри.

ABSTRACT

Myronchuk H.L. Hardware-Software Complex for Measuring the Geometric Parameters of a Sample Using an Optical Method / Graduation qualifying work for obtaining an educational degree "Master" in specialty 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» - SHEE DonNTU Drohobych, 2025.

The work contains the development of a hardware-software complex for measuring the geometric parameters of small-sized objects (50–150 mm) using the optical method of laser triangulation. The system enables the construction of a three-dimensional model of the object based on a series of 2D images obtained from a webcam during the object's rotation on a stepper motor. Image processing includes stages of filtering, binarization, laser line detection, and 3D model construction by determining the intersection of the laser projection plane with the camera rays. The mathematical model of a pinhole camera is applied for object reconstruction. The achieved measurement accuracy is ± 0.5 mm. The work substantiates the choice of technical components and presents an analysis of alternative methods. The developed complex is not intended for industrial use but can be easily adapted with industrial controllers such as Siemens SIMATIC or Beckhoff. The practical significance lies in creating an accessible, modular setup for studying 3D scanning technologies in educational environments, scientific research, and prototyping in the field of 3D printing. The obtained results demonstrate the effectiveness of a low-cost approach to accurate three-dimensional measurement of objects using automation engineering tools.

Keywords: optical measurement, laser triangulation, hardware-software complex, 3D modeling, image processing, geometric parameters.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА	13
1.1 Контактні методи.....	13
1.2. Безконтактні активні методи.....	13
1.3 Безконтактні пасивні методи.....	15
Висновки до розділу 1.....	15
2. ВИБІР СКЛАДОВИХ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ.....	16
2.1. Апаратні засоби для розробки системи вимірювання розмірів оптичним методом.....	16
2.1.1. Контролер.....	16
2.1.2. Кроковий мотор.....	21
2.1.3. Драйвер крокового мотору та блок живлення.....	28
2.1.4. Веб-камера.....	37
2.1.5. Лазер.....	41
2.1.6. Корпус.....	42
2.2. Програмні засоби для розробки системи вимірювання розмірів оптичним методом.....	46
2.2.1. MATLAB.....	46
2.2.2. MATLAB ArduinoIO Package.....	48
2.2.3. Image Acquisition Toolbox for MATLAB.....	49
2.2.4. Camera Calibration Toolbox for MATLAB.....	50
2.2.5. Image Processing Toolbox for MATLAB.....	50
2.2.6. MeshLab.....	51
Висновки до розділу 2.....	52
3. ТЕОРІЯ ТРІАНГУЛЯЦІЇ.....	53
3.1. Модель пінхол камери.....	53

3.2. Геометричні представлення векторів, прямих та площин.....	53
3.3. Відтворення поверхні за допомогою тріангуляції.....	56
3.4. Координатні системи.....	58
Висновки до розділу 3.....	62
4. ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ ПРОГРАМНО–АПАРАТНОГО	64
КОМПЛЕКСУ.....	
4.1. Складання апаратної частин комплексу.....	64
4.2. Калібрування камери.....	68
4.3. Керування кроковим мотором	76
4.4. Отримання зображень об'єкта.....	79
4.5. Тріангуляція	81
Висновки до розділу 4	87
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90
ДОДАТОК А – Економічне обґрунтування магістерської роботи.....	92
ДОДАТОК Б – Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	97
ДОДАТОК С – Лістинг програми для отримання зображень.....	110
ДОДАТОК Д – Лістинг програми для обробки зображень.....	113

ВСТУП

Актуальність роботи.

На даний час оптичні методи вимірювання знаходять широке застосування в промисловості, наприклад в контролі якості поверхонь, контролі цілісності виробів, розпізнаванні тривимірних об'єктів, системах відеоспостереження, системах комп'ютерного зору для роботів, навігації, тощо. Для усіх цих завдань є критично необхідним отримання тривимірної інформації про об'єкт, що досліджується (форма, поверхня, 3D-координати). Нажаль при застосуванні стандартних оптичних методів одна з координат втрачається (найчастіше інформація про глибину або відстань до об'єкта). Саме тому одна з технік 3D реконструкції має бути застосована:

- Триангуляція.
- Оптична інтерферометрія.
- Вимірювання часу польоту.

Перевагами оптичних методів є те, що вони швидкі, безконтактні та не руйнують об'єкт. Найчастіше вони використовуються разом з камерами та цифровою обробкою зображень

3D сканер – це пристрій, який дозволяє отримати тривимірну інформацію, необхідну для оцифровки повної чи часткової поверхні об'єкта.

Побудова такого пристрою вимагає двох складових: апаратної та програмної. Основними частинами апаратної складової є камера, яка отримує оптичну інформацію про об'єкт, та певний засіб проектування, найчастіше лазер. Основною задачею програмної складової є обробка зображень, у той чи інший спосіб, для відбудови 3D інформації про об'єкт з певної кількості його 2D зображень. Розроблений програмно-апаратний комплекс призначений для вимірювання об'єктів невеликих розмірів, зокрема в межах 50–150 мм по найбільшій стороні. Такий вибір пов'язаний із використанням доступної веб-камери з обмеженим полем зору та роздільною здатністю.

Вимоги до точності вимірювання в межах ± 0.5 мм є достатніми для завдань в освітньому процесі, лабораторних дослідженнях і аматорському 3D-моделюванні. Ця точність досягається завдяки використанню лазерної тріангуляції, попередньому калібруванню камери та алгоритмам обробки зображень.

Arduino Uno було обрано для реалізації прототипу через його низьку вартість, легкість використання та підтримку у середовищі MATLAB. Однак варто зазначити, що Arduino не призначений для промислового застосування через обмежену обчислювальну потужність, відсутність захисту від промислових перешкод та нестачу сертифікації для роботи у критичних умовах. Для промислового використання доцільно застосовувати контролери типу Siemens SIMATIC, Beckhoff, або контролери на базі промислових ПЛІС (FPGA), які забезпечують високу швидкодію, захист, сертифікацію, а також підтримку промислових інтерфейсів (EtherCAT, PROFINET, MODBUS).

У сучасних технологіях вимірювання просторових геометричних параметрів об'єктів особливої актуальності набувають оптичні методи. Вони забезпечують високу точність, безконтактність і оперативність у наукових та побутових застосуваннях. З огляду на розвиток цифрових технологій, зокрема 3D-друку, потреба в простих і доступних засобах для створення 3D-моделей зростає. Розробка недорогих, але ефективних програмно-апаратних засобів на основі доступних компонентів (Arduino, веб-камери) є актуальною задачею сучасного етапу розвитку інженерії.

Об'єкт розробки – програмно-апаратний комплекс, що реалізує метод тріангуляції для вимірювання геометричних параметрів об'єктів та формування їх тривимірних моделей.

Мета роботи – розробка та побудова програмно-апаратного комплексу для вимірювання геометричних параметрів зразка оптичним методом та побудови його 3D-моделі.

Методи дослідження. Для досягнення мети використовувались методи лазерної тріангуляції, цифрової обробки зображень, математичного

моделювання, а також експериментальні методи оцінювання точності конструкції. Для роботи була вибрана мікропроцесорна плата Arduino Uno на базі якої проводиться керування програмно-апаратним комплексом та веб-камера Logitech HD Webcam C270, яка використовується для отримання зображень.

Результат розробки – функціонуючий програмно-апаратний комплекс, який дозволяє отримувати 3D-модель об'єкта шляхом обробки серії зображень, отриманих за допомогою веб-камери та лазера, з точним керуванням за допомогою Arduino.

Завдання роботи, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

- 1) провести аналіз існуючих методів 3D-моделювання;
- 2) обґрунтувати вибір методу тріангуляції;
- 3) розробити апаратну частину комплексу;
- 4) реалізувати алгоритми обробки зображень і 3D-відновлення;
- 5) провести експериментальну перевірку комплексу;
- 6) провести економічне обґрунтування доцільності розробки;
- 7) розробити заходи з охорони праці.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонований комплекс може бути використаний як недорога альтернатива промисловим 3D-сканерам у навчальному процесі, малому бізнесі, наукових експериментах або при створенні прототипів у 3D-друці.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Структура магістерської кваліфікаційної роботи визначена її метою та запланованими в роботі завданнями. Робота складається з анотації на українській та англійській, вступу, чотирьох розділів, висновків до роботи, переліку посилань та додатків. Робота має 89 сторінок тексту, 63 рисунки, 20 посилань на використану літературу та додатків, які містять економічне обґрунтування (А), заходи з охорони праці (Б), лістинг програми для отримання (С) та обробки (Д) зображень.

1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА

Існує велика кількість методів для оцифровки поверхні тривимірного об'єкта. Вони поділяються на два види: контактні та безконтактні. Безконтактні методи, у свою чергу, поділяються на активні та пасивні.

1.1 Контактні методи

Контактні методи полягають у використанні фізичного дотику до об'єкту, коли він знаходиться на рівній поверхні. Якщо об'єкт не може бути встановлений на рівній поверхні, він утримується за допомогою затискача.

СММ (Coordinate-measuring machine) – машина для вимірювання координат є прикладом контактного 3D сканера. Вона використовується у промисловості для надзвичайно точного вимірювання розмірів. Недоліком СММ є необхідність контакту зі сканованим об'єктом тому процес сканування може його пошкодити. Цей недолік є дуже важливим при сканування делікатних чи цінних об'єктів. Ще одним недоліком СММ є дуже низька швидкість сканування, порівняно з іншими методами. Навіть найшвидші СММ можуть працювати з частотою до декількох сотень герц.

1.2 Безконтактні активні методи

Активні сканери випромінюють світло або випромінювання і виявляють його відбиття для того, щоб отримати інформацію про об'єкт. Можливим типами випромінювання є світло, ультразвук та рентгенівське випромінювання.

Час польоту. 3D сканери побудовані на метод час польоту – це активні сканери, що використовують лазерне випромінювання для отримання інформації про об'єкт. Основною частиною таких сканерів є лазерний дальномір. Лазерний

дальномір знаходить відстань до об'єкта засікаючи час польоту імпульсу лазерного випромінювання до об'єкта і назад. Лазер випромінює імпульс світла, а детектор вимірює час виявлення відбитого від об'єкта світла. Оскільки швидкість світла відома, то час польоту дозволяє отримати подвоєну відстань між сканером та об'єктом. Точність такого 3D сканеру залежить від того як точно можливо виміряти час польоту.

Лазерний дальномір визначає відстань лише до однієї точки за один раз. Для сканування усього куту огляду сканера необхідно змінювати напрям лазерного випромінювача. Типовий 3D сканер часу польоту може вимірювати відстань до 10000 точок за секунду.

Перевагами сканерів часу польоту є те що вони здатні працювати на дуже великих відстанях. Такі сканери здатні сканувати великі будівлі чи географічні об'єкти. Недоліками таких сканерів є низька точність, через складність вимірювання часу польоту.

Структуроване світло. Сканери на основі структурованого світла проєктують світловий узор на об'єкт і виявляють його деформацію на об'єкті. Узор проєктується за допомогою проєктору чи іншого джерела світла. Камера слідує за формою узору та обчислює відстань до кожної точки у полі зору.

Перевагами методу структурованого світла є швидкість і точність. Замість сканування однієї точки за раз, сканери на основі цього методу дозволяють сканувати багато та навіть усі точки у полі зору.

Тріангуляція. 3D сканери засновані на методі тріангуляції також є активним сканерами, що використовують лазерне випромінювання для отримання інформації про об'єкт. Такий сканер випромінює лазерне світло на об'єкт та використовує камеру для пошуку лазерної точки. Залежно від відстані до поверхні об'єкта лазерна точка буде знаходитись в певному місці в куті огляду камери. Цей метод називається тріангуляцією тому, що лазерна точка, камера, та лазер формують трикутник. Довжина однієї сторони трикутника, відстань між камерою та лазером відома. Кут під яким знаходиться лазер теж є відомим. Кут під яким знаходиться камера може бути визначений за допомогою визначення

положення лазерної точки на зображенні з камери. Ці три складові повністю визначають форму і розміри трикутника і дозволяють отримати положення лазерної точки. У більшості випадків замість лазерної точки використовуються лазерна лінія для збільшення швидкості сканування.

Сканери на основі тріангуляції мають обмежену відстань роботи і високу точність.

1.3 Безконтактні пасивні методи

Пасивні сканери самі нічого не випромінюють, натомість вони виявляють відбите навколишнє випромінювання. Більшість сканерів даного типу виявляють видиме світло через його розповсюдженість. Пасивні методи є дуже недорогими оскільки потребують лише камери.

Стереоскопічні системи використовують дві камери, на невеликій відстані, спрямовані на об'єкт. Аналізуючи різницю між зображеннями з кожної камери, можливо отримати відстань до кожної точки на зображенні.

Фотометричні системи використовують лише одну камери, але знімають зображення при різних режимах освітлення.

Висновки до розділу 1

Для даного програмно-апаратного комплексу було вибрано метод тріангуляції через високу точність, швидкість роботи та дешевизну.

2. ВИБІР СКЛАДОВИХ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ

2.1. Апаратні засоби для розробки системи вимірювання розмірів оптичним методом

Апаратна частина в даному проекті представлена контролером, кроковим мотором, веб-камерою, лазером, драйвером крокового мотору, блоком живлення та корпусом.

Системи з кроковими моторами складаються з трьох основних частин:

- контролер – це мікропроцесор, що здатний генерувати крокові імпульси для драйвера;
- драйвер конвертує команди контролера в напругу необхідну для збудження котушок мотора;
- кроковий мотор – це електромагнітний пристрій, що конвертує цифрові імпульси в механічні оберти валу.

2.1.1. Контролер

TI MSP430 Launchpad. LaunchPad (рис. 2.1) – це легкий для використання програматор і засіб для відладки недорогих мікроконтролерів серії MSP430G2xx від Texas Instruments. Він містить все потрібне для початку розробки на мікроконтролері MSP430. Він має вбудовану емуляцію для програмування та відладки, 20-піновий DIP роз'єм, кнопки, світлодіоди, розпіновку, що підтримує велику кількість плат розширення.

Особливістю даної плати є надзвичайно низька ціна.

Характеристики наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики TI MSP430 Launchpad

Мікроконтролер	TI MSP430
Частота	16 МГц
Розміри	66.1 × 50.8 мм
Інтерфейс	USB
Напруга	5 В
Флеш-пам'ять	16 кБ
RAM	512 Б
Цифрові виходи	20

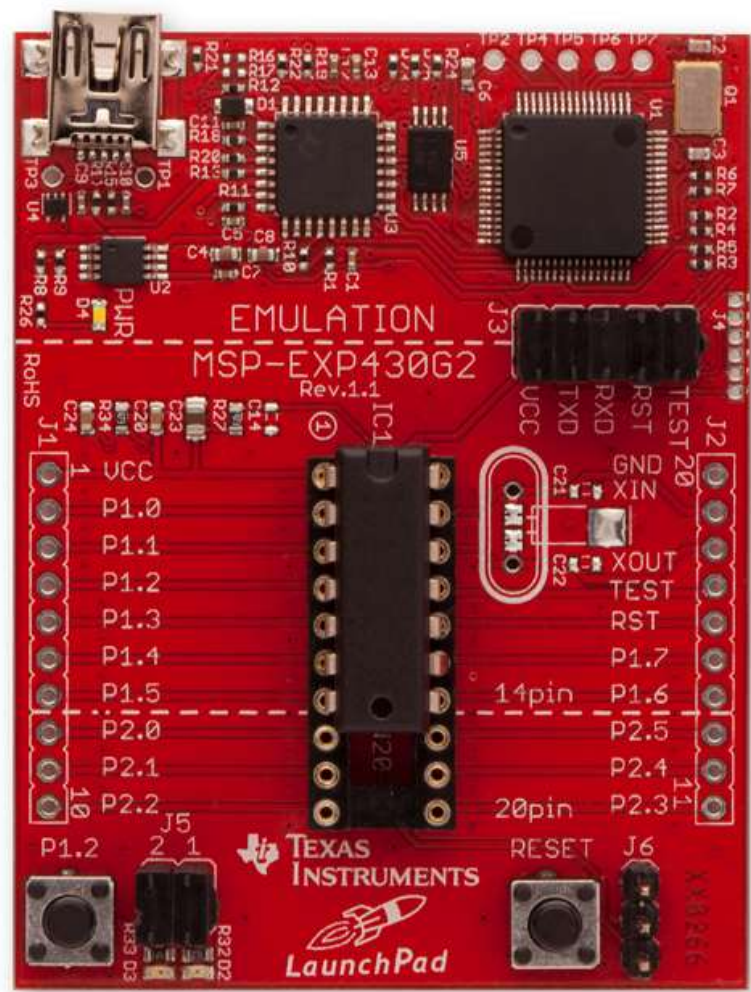


Рисунок 2.1 – TI MSP430 Launchpad

Raspberry Pi Model B. Raspberry Pi (рис. 2.2) — одноплатний комп'ютер, розроблений британським фондом Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi побудований на системі-на-чипі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore

IV, і 512 чи 256 мегабайт оперативної пам'яті. Жорсткий диск відсутній, натомість використовується SD карта. Така апаратна начинка дозволяє відтворювати відео формату H.264 в роздільній здатності 1080p, і запускати комп'ютерні ігри.

Особливостями є низька ціну, відкритий характер розробки та орієнтацію на навчання та експерименти. Характеристики наведені в табл. 2.2



Рисунок 2.2 – Raspberry Pi Model B

Таблиця 2.2 – Характеристики Raspberry Pi Model B

SoC:	BCM2835
CPU:	700 МГц ARM
GPU:	Broadcom VideoCore IV, OpenGL ES 2.0, з можливістю декодування відео в форматі 1080p H.264
Пам'ять (SDRAM):	256 МБ
USB 2.0 порти:	1
Відео вихід:	Композитний, HDMI
Аудіо вихід:	3.5 мм, HDMI
On-board storage:	SD/MMC/SDIO слот
On-board network:	—
Low-level peripherals:	SPI, I ² C, UART

Arduino ADK. Arduino ADK (рис. 2.3) – це плата з мікроконтролером ATmega2560. Вона включає USB інтерфейс з можливістю під'єднання до телефонів на операційній системі Android. Характеристики плати наведені в табл. 2.3.

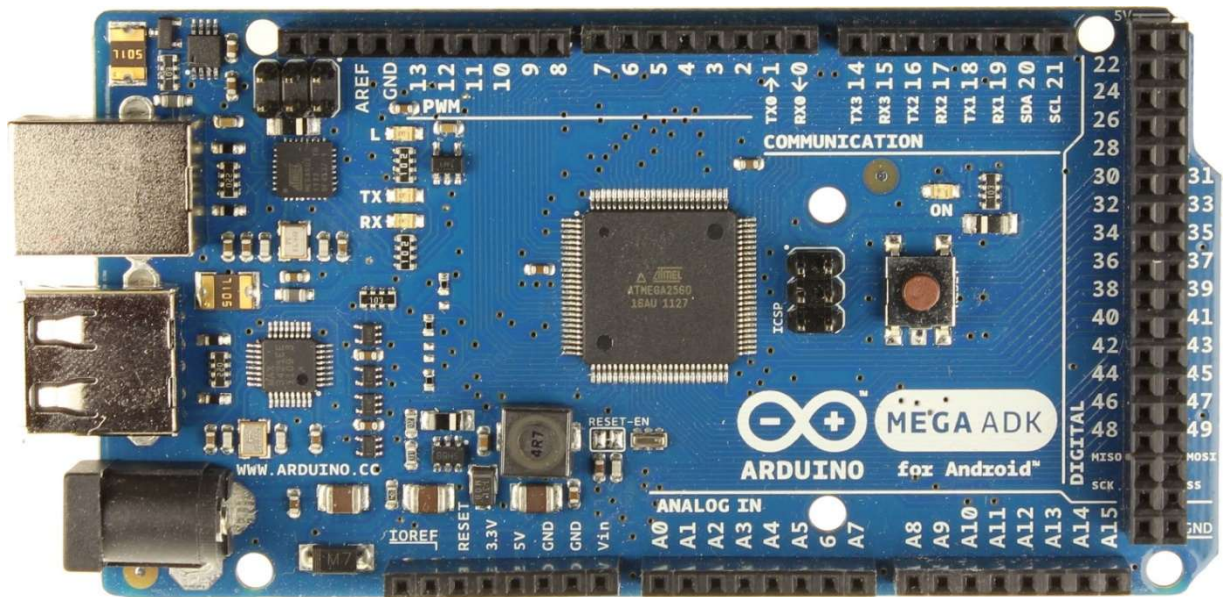


Рисунок 2.3 – Arduino ADK

Таблиця 2.3. – Характеристики Arduino Mega ADK

Мікроконтролер	ATmega2560
Частота	16 МГц
Розміри	101.6 × 53.3 мм
Інтерфейс	USB
Напруга	5 В
Флеш-пам'ять	256 кБ
EEPROM	4 кБ
SRAM	8 кБ
Цифрові виходи	54
Цифрові виходи з ШІМ	15
Аналогові виходи	16

Arduino Uno. В якості контролера була вибрана плата Arduino Uno (рис. 2.4 – 2.5). Arduino Uno – це плата з мікроконтролером ATmega328. Вона має 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватись в режимі ШІМ), 6

аналогових входів, керамічний резонатор на 16 МГц, USB інтерфейс та роз'єм живлення.

Arduino Uno може використовувати USB підключення або зовнішній блок живлення як джерело живлення, воно вибирається автоматично. Плата може працювати при зовнішньому живленні 7 – 20 В, але рекомендованими є 7 – 12 В.

Кожен з 14 цифрових пінів може використовуватись як для читання так і для запису. Вони працюють при робочій напрузі в 5 В.

Arduino Uno має 6 аналогових входів позначених A0 – A5, кожен з яких забезпечує 10 біт роздільної здатності (1024 різних значень).

Плата Arduino Uno була вибрана через: низьку ціну, простоту в підключенні, широку підтримку в програмних засобах (в тому числі Matlab) та наявність роз'єму для підключення зовнішнього живлення необхідного для крокового мотору. Характеристики плати наведені в таблиці 2.4.

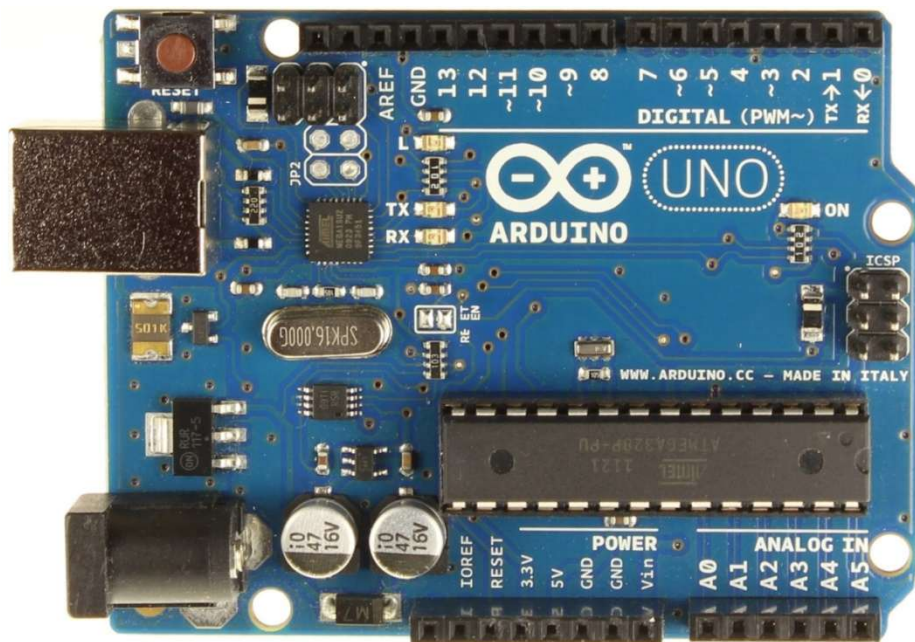


Рисунок 2.4 – Arduino Uno, вид спереду

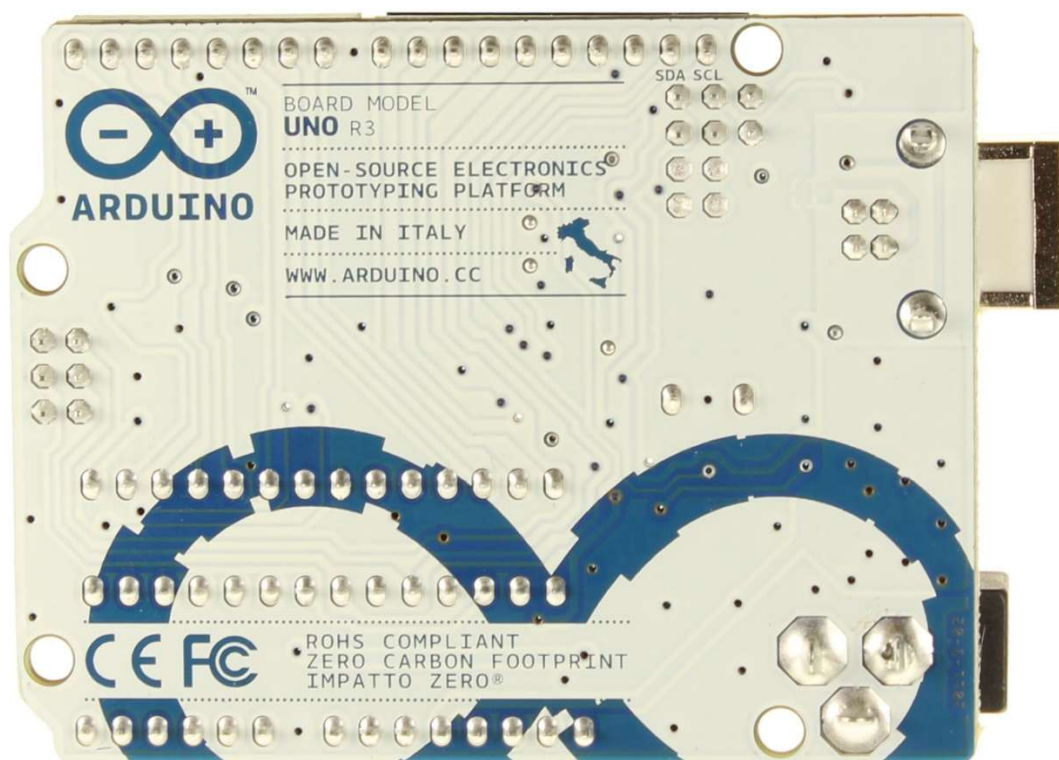


Рисунок 2.5 – Arduino Uno, вид ззаду

Таблиця 2.4 - Характеристики Arduino Uno

Мікроконтролер	ATmega328
Частота	16 МГц
Розміри	68.6 × 53.3 мм
Інтерфейс	USB
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7–12 В
Вхідна напруга (максимальна)	6–20 В
Флеш-пам'ять	32 кБ
EEPROM	1 кБ
SRAM	2 кБ
Цифрові входи/виходи	14
Цифрові входи/виходи з ШІМ	6
Аналогові виходи	6

2.1.2. Кроковий мотор

В якості двигуна для програмно-апаратного комплексу розглядалось два їх види:

1) Крокові мотори (рис 2.6)

2) Сервоприводи (рис 2.7)

Крокові мотори і сервоприводи відрізняються в у двох ключових аспектах: будова та спосіб контролю. Крокові мотори мають велику кількість полюсів (найчастіше 50 – 100), що генеруються за допомогою постійного магніту або електричного струму, Сервоприводи ж мають невелику кількість полюсів (найчастіше 4 – 12). Кожен полюс створює природню точку зупинки для мотору. Велика кількість полюсів дозволяє мотору рухатись більш точно та дозволяє мотору працювати без зворотного зв'язку. Сервоприводи потребують наявності енкодера положення валу мотору, особливо коли є вимога до точності позиціонування.

Крокові мотори надають декілька переваг над сервоприводами крім великої кількості полюсів. Конструкція крокових моторів дозволяє утримувати сталий крутний момент без додаткового живлення. Крутний момент крокових моторів на низьких швидкостях більший ніж у сервоприводів такого ж розміру.



Рисунок 2.6 – Крокові мотори



Рисунок 2.7 – Сервоприводи

Недоліки крокових моторів починають проявлятися коли вони досягають 90% їхньої максимальної швидкості. При таких швидкостях вони втрачають велику частину свого крутного моменту. Також вони можуть створювати вібрації при русі.

Сервоприводи мають значні переваги при застосуваннях де необхідними є великих швидкість та високий крутний момент. Сервоприводи також більш енергоефективні.

Недоліками сервоприводів є вимоги до дуже складних драйверів та зворотного зв'язку для забезпечення точного позиціонування.

Для застосування у даному програмно-апаратному комплексі необхідно точне позиціонування мотору при низьких швидкостях, тому було вибрано кроковий мотор

SY20STH30-0604A. SY20STH30-0604A (рис. 2.8) – це невеликий гібридний біполярний мотор з кроковим кутом в 1.8° (200 кроків за оберт) розміру NEMA 8. Кожна фаза споживає 600мА при 3.9 В, що дозволяє утримувати крутний момент в 180 г-см. Характеристики мотору наведені в таблиці 2.5.



Рисунок 2.8 – SY20STH30-0604A

Таблиця 2.5 – Характеристики SY20STH30-0604A

Розмір	30 × 20 × 20 мм
NEMA	8
Вага	60 г
Діаметр валу	4 мм
Кроків за оберт	200
Струм	600 мА
Напруга	3.9 В
Опір	6.5 Ом
Крутний момент	180 г-см
Індуктивність	1.7 мГн
Кількість провідників	4
Довжина провідників	300 мм

SY57STH41-1006A. SY57STH41-1006A (рис. 2.9) – це гібридний кроковий мотор з високим крутним моментом та кроковим кутом в 1.8° (200 кроків за оберт) розміру NEMA 23. Кожна фаза споживає 1 А при 5.7 В, що дозволяє утримувати крутний момент в 4 кг-см. Може використовуватись як уніполярний так і як біполярний мотор. Характеристики мотору наведені в таб. 2.6.



Рисунок 2.9 – SY57STH41-1006A

Таблиця 2.6 – Характеристики SY57STH41-1006A

Розмір	41 × 56.4 × 56.4 мм
NEMA	23
Вага	450 г
Діаметр валу	6.35 мм
Кроків за оберт	200
Струм	1000 мА
Напруга	5.7 В
Опір	5.7 Ом
Крутний момент	4 кг-см
Індуктивність	5.4 мГн
Кількість провідників	6
Довжина провідників	300 мм

SY28STH45-0674A. SY28STH45-0674A (рис. 2.10) – це гібридний біполярний кроковий мотор з кроковим кутом в 1.8° (200 кроків за оберт) розміру NEMA 11. Кожна фаза споживає 670 мА при 4.5 В, що дозволяє утримувати крутний момент в 950 г-см. Характеристики мотору наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Характеристики SY28STH45-0674A

Розмір	45 × 28 × 28 мм
NEMA	11
Вага	140 г
Діаметр валу	5 мм
Кроків за оберт	200
Струм	670 мА
Напруга	4.5 В
Опір	5.7 Ом
Крутний момент	950 г-см
Індуктивність	4.9 мГн
Кількість провідників	4
Довжина провідників	300 мм



Рисунок 2.10 – SY28STH45-0674A

SY42STH47-1206A. В якості мотора був вибраний кроковий мотор SY42STH47-1206A. SY42STH47-1206A (рис. 2.11) – це гібридний кроковий мотор з кроковим кутом в 1.8° (200 кроків за оберт) розміру NEMA 23. Кожна фаза споживає 1.2 А при 4 В, що дозволяє утримувати крутний момент в 3.2 кг-см. Може використовуватись як уніполярний так і як біполярний мотор. Фізичні розміри мотору наведені на рис. 2.12. Характеристики мотору наведені в табл. 2.8.



Рисунок 2.11 – SY42STH47-1206A

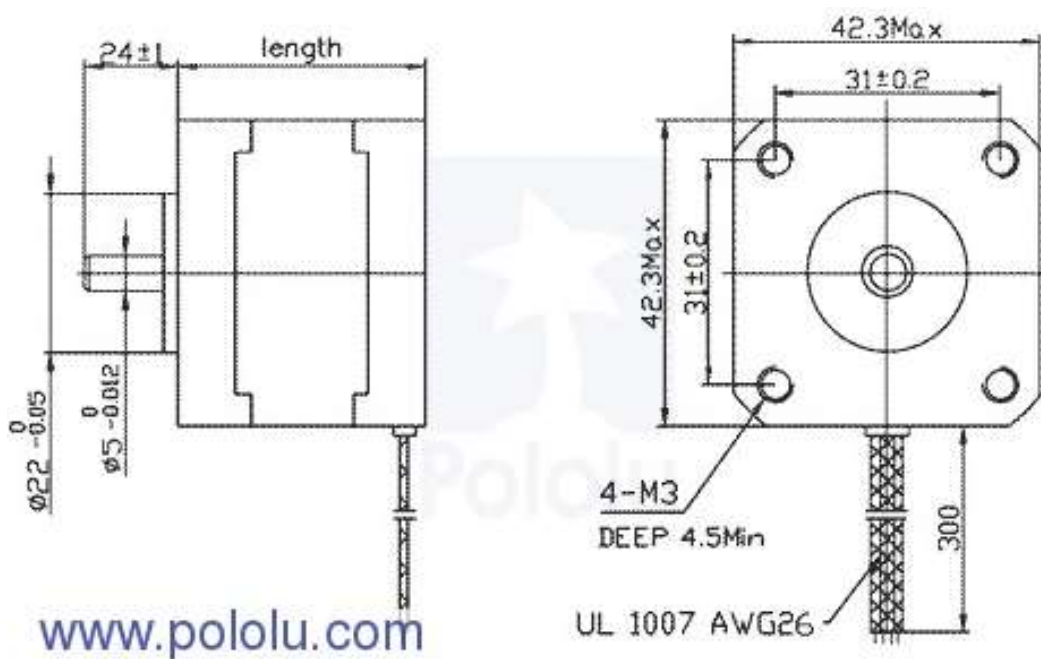


Рисунок 2.12 – Фізичні розміри мотору SY42STH47-1206A

Таблиця 2.8 – Характеристики SY42STH47-1206A

Розмір	48 × 42.3 × 42.3 мм
NEMA	17
Вага	350 г
Діаметр валу	5 мм
Кроків за оберт	200

Струм	1200 мА
Напруга	4 В
Опір	3.3 Ом
Крутний момент	3.2 кг-см
Індуктивність	2.8 мГн
Кількість провідників	6
Довжина провідників	300 мм

2.1.3. Драйвер крокового мотору та блок живлення

Продуктивність крокових моторів сильно залежна від якості драйверів, які застосовуються для їх керування. Крутний момент може бути збільшений при вищих швидкостях, якщо зміна полюсів відбувається швидше. Щоб досягнути цього необхідно збільшити робочу напругу. Це призводить до необхідності обмежувати максимальний струм, що виникає при вищих напругах.

Кроковий мотор – це багатофазний синхронний мотор змінного струму і працює найкраще при синусоїдному струмі. Форма хвилі при повному кроці є грубою апроксимацією синусоїди. Різні техніки були розроблені для кращої апроксимації синусоїди: напівкрок та мікрокрок (рис.2.14).

Повний крок – це звичайний метод керування мотором. Дві фази завжди увімкнені, тому мотор забезпечує свій максимальний крутний момент. Як тільки одна з фаз вимикається інша вмикається.

Напівкрок – це метод керування при якому відбувається чергування двох увімкнених фаз та однієї увімкненої фази. Це дозволяє подвоїти кількість кроків на оберт, але мотор має менший кроковий момент (~70%) у положеннях де увімкнена тільки одна фаза. Цей недолік можна усунути якщо збільшити струм у активної котушки.

Мікрокрок (синусоїдальний-косинусоїдальний мікрокрок) – це метод керування при якому струм котушок апроксимує синусоїдальну хвилю. При застосуванні цього методу мінімальний крок обертання зменшується, робота мотору стає більш плавною, при цьому значно зменшуючи резонанс у моторі та частинах до яких він приєднаний.

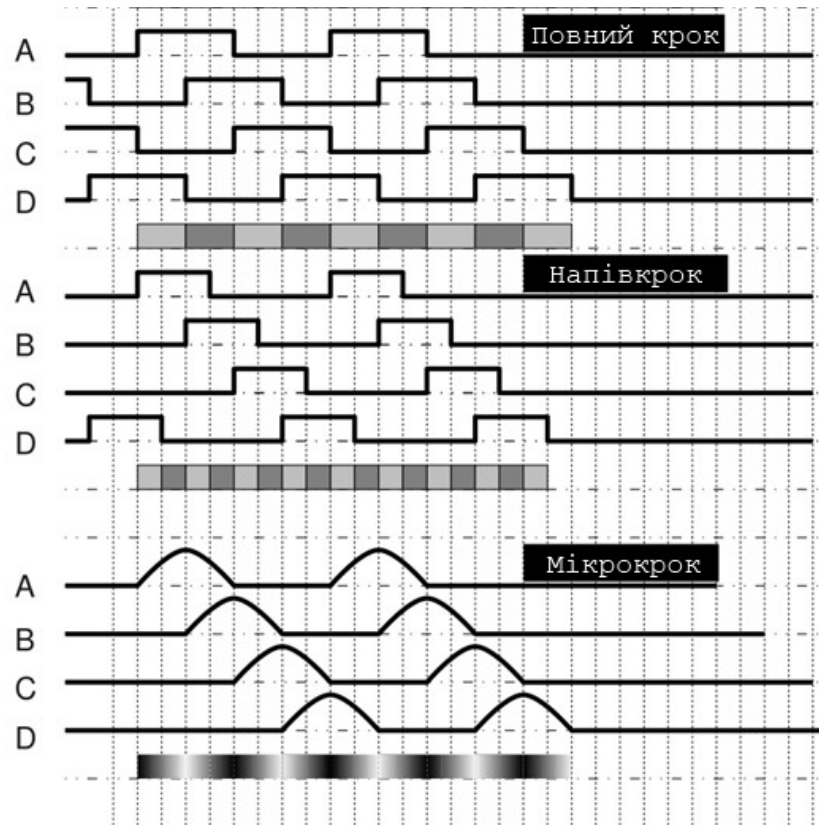


Рисунок 2.13 – Діаграма різних методів керування чотирифазним уніполярним мотором

Adafruit Motor/Stepper/Servo Shield for Arduino. Adafruit Motor/Stepper/Servo Shield for Arduino (рис. 2.14) – це додаток до Arduino, що дозволяє під'єднати велику кількість різних моторів:

- 2 роз'єми для сервоприводів на 5В;
- 4 Н-мости;
- до чотирьох моторів постійного струму;
- до двох крокових моторів(уніполярних або біполярних) з можливістю мікрокроку.

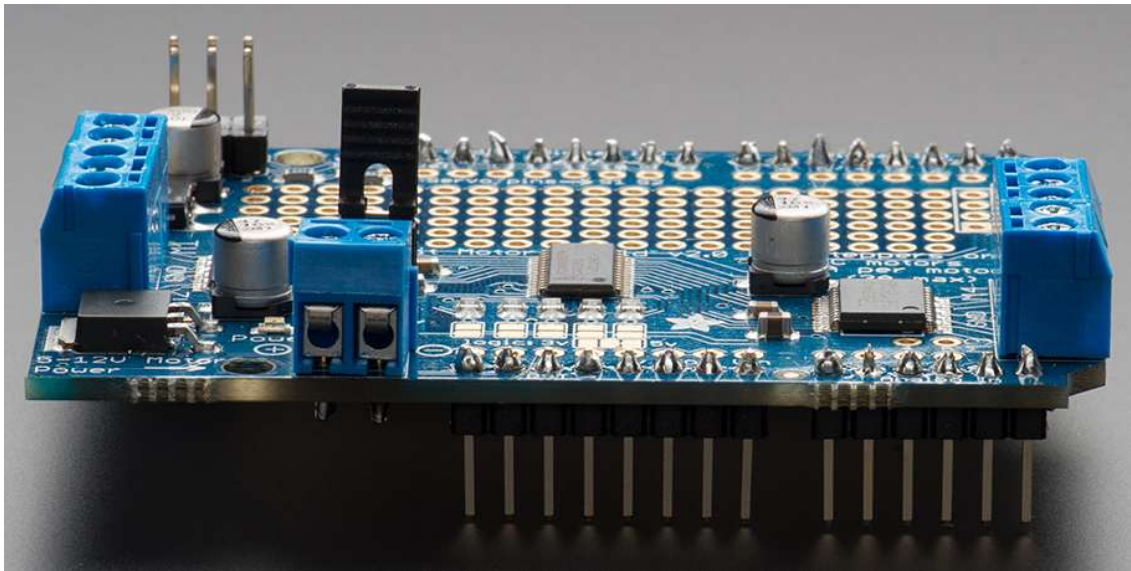


Рисунок 2.14 – Adafruit Motor/Stepper/Servo Shield for Arduino

EasyDriver Stepper Motor Driver. EasyDriver (рис. 2.15) – це простий у використанні драйвер для крокового мотору, який може видавати цифровий імпульс у межах від 0 до 5 В. EasyDriver вимагає наявності блока живлення на 7–30 В для живлення мотору, там може жити мотор будь-якої робочої напруги. EasyDriver має вбудований регулятор напруги для цифрового інтерфейсу, що може бути встановлений на 5 В або 3.3 В. EasyDriver дозволяє керувати біполярними моторами. Характеристики драйверу наведені в табл. 2.9.

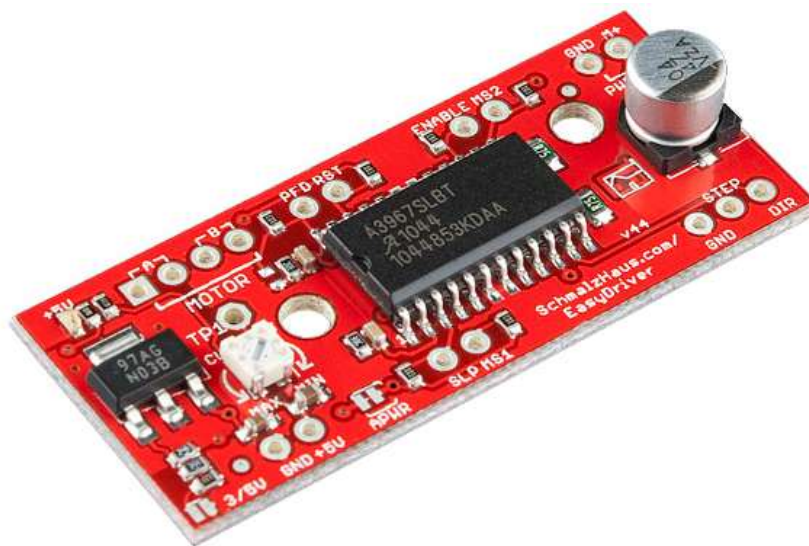


Рисунок 2.15 – EasyDriver Stepper Motor Driver

Таблиця 2.9 – Характеристики EasyDriver Stepper Motor Driver

Драйвер	A3967
Мікрокрок	1, 1/2, 1/4, 1/8
Можливість під'єднання	Мотори з 4, 6 або 8 провідниками
Контроль струму	150 мА – 750 мА
Блок живлення	7 В – 30 В

Big Easy Driver. Big Easy Driver (рис. 2.16) – це драйвер для біполярних крокових моторів, який може видавати струм до 2 А на фазу. Він є покращеною версією EasyDriver. Він може керувати моторами з робочою напругою до 35 В. та має вбудований регулятор напруги. Наявність радіатора є рекомендованою для навантаження, близького до 2 А на фазу. Характеристики драйверу наведені в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Характеристики Big Easy Driver

Драйвер	A4988
Мікрокрок	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Можливість під'єднання	Мотори з 4, 6 або 8 провідниками
Контроль струму	150 мА – 2 А
Блок живлення	7 – 30 В

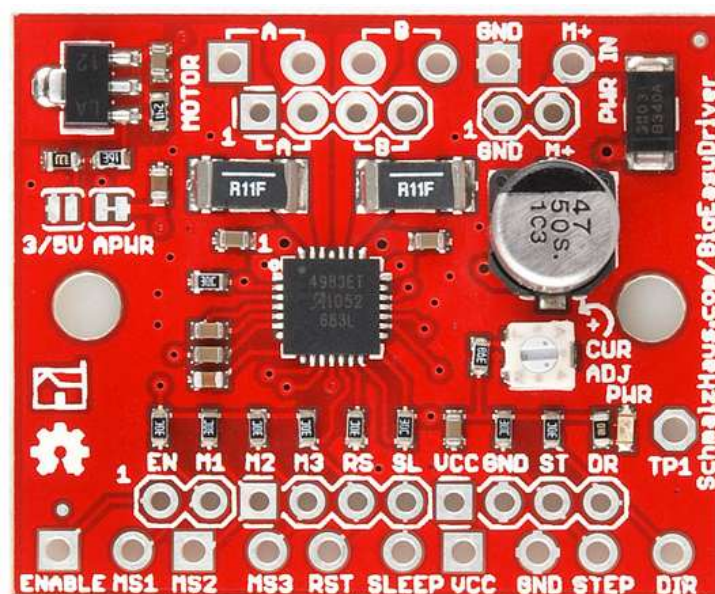


Рисунок 2.16 – Big Easy Driver

Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier with Voltage Regulators. Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier with Voltage Regulators (рис. 2.17) – це драйвер для біполярних крокових моторів, який може видавати струм до 2 А на фазу. Має вбудований регулятор струму та напруги. Характеристики драйверу наведені в табл. 2.11.



Рисунок 2.17 – Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier with Voltage Regulators

Таблиця 2.11 – Характеристики Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier with Voltage Regulators

Драйвер	A4988
Мікрокрок	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Можливість під'єднання	Мотори з 4, 6 або 8 провідниками
Розмір	18 × 35.5 мм
Вага	3.3 г
Робоча напруга	8 – 35 В
Струм на фазу	1 А
Максимальний струм на фазу	2 А
Напруга логіки	3 – 5.5 В

Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier. Для даного програмно-апаратного комплексу був вибраний драйвер Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier (рис. 2.18). Це драйвер для біполярних крокових моторів, який може видавати струм до 2 А на фазу.

Основні особливості драйверу:

- простий інтерфейс контролю напрямку обертання та кроку;
- 5 режимів мікрокроку: 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16;
- регульований контроль струму дозволяє встановлювати максимальний вихідний струм за допомогою потенціометра, що дозволяє досягати низьких режимів мікрокроку;
- автоматичне відключення при перегріві;
- захист від короткого замикання.

Характеристики драйверу наведені в табл. 2.12.

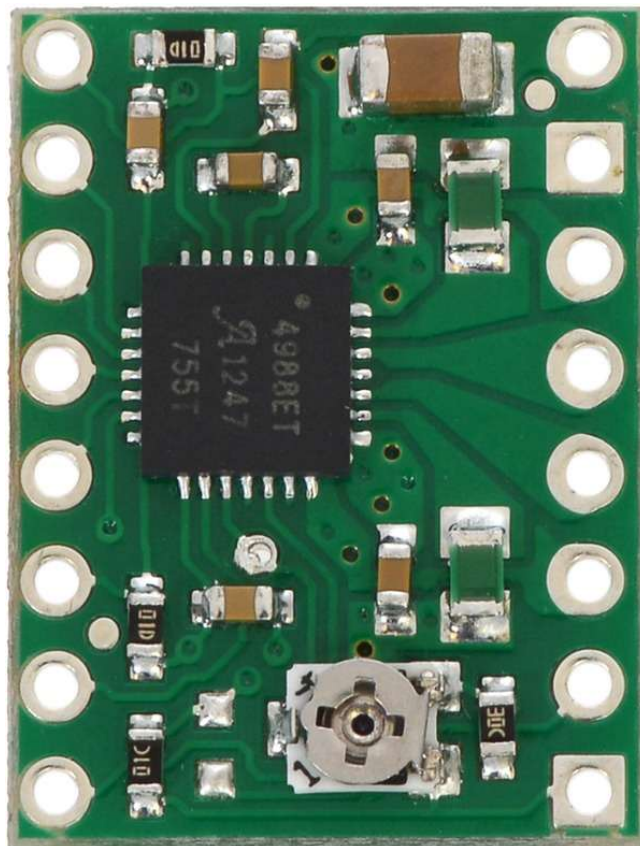


Рисунок 2.18 – Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier

Таблиця 2.12 – Характеристики Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier

Драйвер	A4988
Мікрокрок	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Можливість під'єднання	Мотори з 4, 6 або 8 провідниками
Розмір	15.2 × 20.3 мм
Вага	1.3 г
Робоча напруга	8 – 35 В
Струм на фазу	1 А
Максимальний струм на фазу	2 А
Напруга логіки	3 – 5.5 В

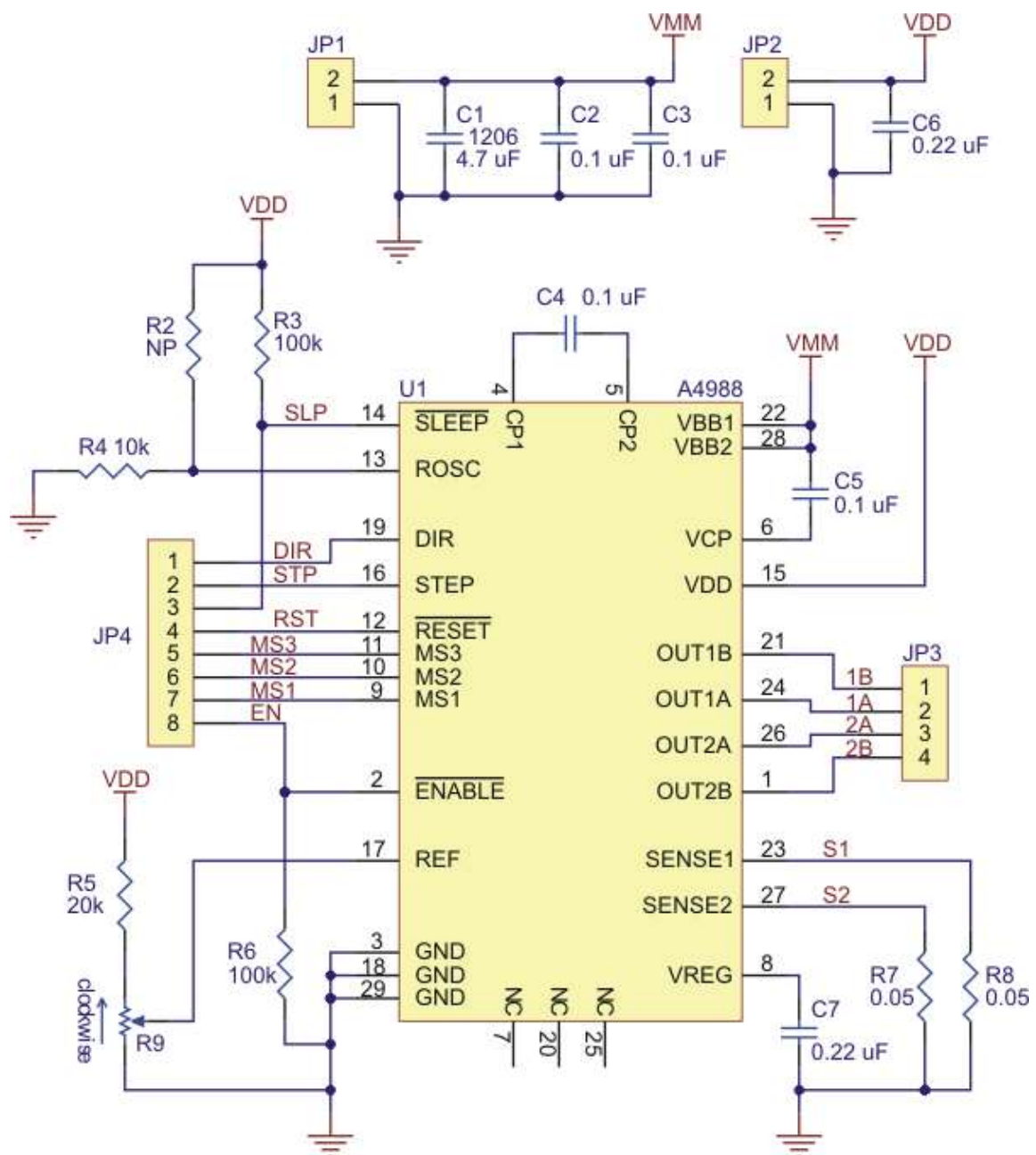


Рисунок 2.19 – Схема Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier

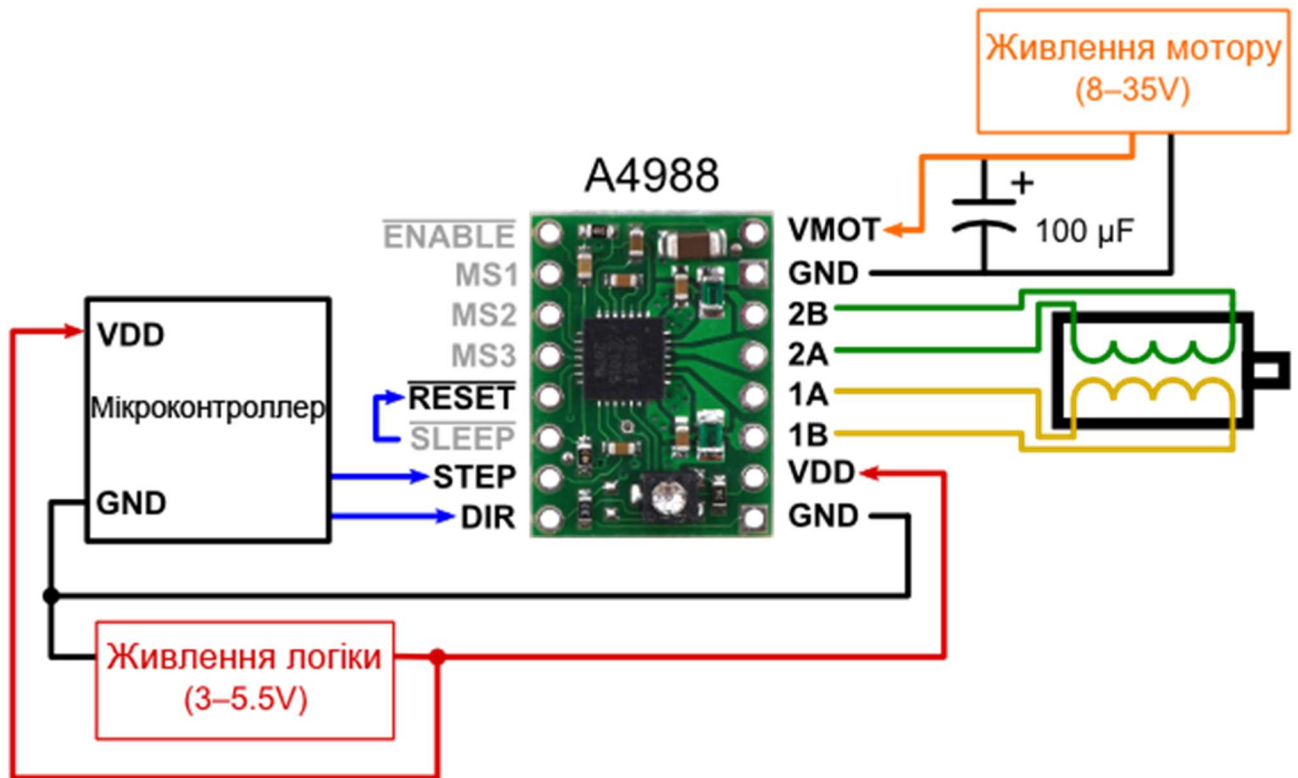


Рисунок 2.20 – Діаграма з мінімально необхідним для роботи підключенням Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier

Драйвер вимагає живлення логіки (3 – 5.5 В) підключене до VDD і GND та робоче живлення мотору (8 – 35 В) підключене до VMOT і GND, Драйвер може керувати моторам з 4ма, 6ма та 8ма провідниками при правильному під'єднанні. Розмір кроку вибирається за допомогою роз'ємів MS1, MS2, та MS3 згідно табл.2.13. MS1 та MS3 мають внутрішні резистори на 100 кОм, а MS2 на 50 кОм, тому залишаючи три мікрокрокові входи непід'єднаними вибирається режим повного кроку.

Таблиця 2.13 – Залежність мікрокроку від роз'ємів MS1, MS2, та MS3

MS1	MS2	MS3	Мікрокрок
0	0	0	1
1	0	0	1/2
0	1	0	1/4
1	1	0	1/8
1	1	1	1/16

Кожен імпульс на вході STEP відповідає одному мікрокроку мотора у напрямку вибраному на вході DIR.

Для того щоб досягти великої кількості кроків за оберт необхідно встановити високу робочу напругу мотора, що неможливо без активного обмеження струму. Таке обмеження можливе за допомогою потенціометра, встановленого на драйвері. Для встановлення ліміту струму необхідно виміряти напругу на виході VREF при режимі повного кроку та без посилення імпульси на вхід STEP. Тоді ліміт струму буде:

$$I_L = 2.5 \cdot VREF \quad (2.1)$$

MW3R15GS/6XC. Оскільки максимальну напругу, яку може видавати Arduino живлячись від USB-порта є 5 В, то для живлення мотору необхідним є підключення додаткового блоку живлення. Був вибраний блок живлення MW3R15GS/6XC (рис. 2.21). Особливістю даного блоку живлення є можливість переключати вихідну напругу. Характеристики блоку живлення наведені в табл. 2.14.

Таблиця 2.14 – Характеристики MW3R15GS/6XC

Вхідна напруга	90..264 В (50/60 Гц)
Довжина кабелю	1.75 м
Вага	145 г
Вихідна напруга	3 / 4.5 / 5 / 6 / 7.5 / 9 / 12 В
Максимальний вихідний струм	1.5 А
Максимальна вихідна потужність	18 Вт



Рисунок 2.21 – MW3R15GS/6XC

2.1.4. Веб-камера

Для отримання зображення деталі необхідне використання оптичного датчика. В якості камери для програмно-апаратного комплексу розглядалось два варіанти:

- 1) промислові CMOS-камери (рис. 2.22);
- 2) веб-камери.

Промислові CMOS-камери ідеально підходять для систем машинного зору, що вимагають високу швидкість, низьке споживання електроенергії, найкращі засоби боротьби з розпливчастістю та можливість зміни поля огляду.

Оскільки для даного програмно-апаратного комплексу висока швидкість та низьке споживання електроенергії не є необхідними, та через надзвичайно високу вартість промислових CMOS-камер в якості оптичного датчика були вибрані веб-камери.



Рисунок 2.22 – Промислові CMOS-камери

Logitech HD Pro Webcam C920. Logitech HD Pro Webcam C920 (рис. 2.23) – це веб-камера здатна знімати відео в форматі Full HD 1080p при 30 кадрах на секунду та з вбудованим автофокусом. Характеристики веб-камери наведені в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Характеристики Logitech HD Pro Webcam C920

Роздільна здатність	Full HD 1080p
16:9	+
Роздільна здатність фото	15 Мп
Фокус	Автофокус
Тип лінзи	Високоточна скляна лінза від Carl Zeiss



Рисунок 2.23 – Logitech HD Pro Webcam C920

Logitech HD Webcam C525. Logitech HD Webcam C525 (рис. 2.24) – це веб-камера здатна знімати відео в форматі HD 720p при 30 кадрах на секунду та з вбудованим автофокусом. Характеристики веб-камери наведені в табл. 2.16.

Таблиця 2.16 – Характеристики Logitech HD Webcam C525

Роздільна здатність	HD 720p
16:9	+
Роздільна здатність фото	8 Мп
Фокус	Автофокус
Тип лінзи	Пластикова лінза



Рисунок 2.24 – Logitech HD Webcam C525

Logitech HD Webcam C270. Для даного програмно-апаратного комплексу було вибрано веб-камеру Logitech HD Webcam C270 (рис. 2.25). Logitech HD Webcam C270 – це веб-камера здатна знімати відео в форматі HD 720p при 30 кадрах на секунду та вбудованою корекцією освітлення. Характеристики веб-камери наведені в табл. 2.17.

Таблиця 2.17 – Характеристики Logitech HD Webcam C270

Роздільна здатність	HD 720p
16:9	+
Роздільна здатність фото	3 Мп
Фокус	Фіксований фокус
Тип лінзи	Пластикова лінза



Рисунок 2.25 – Logitech HD Webcam C270

2.1.5. Лазер

Відповідно до джерела випромінювання тріангуляція буває трьох видів:

- 1) 1D-тріангуляція: форма джерела випромінювання - точка
- 2) 2D-тріангуляція: форма джерела випромінювання - лінія
- 3) 3D-тріангуляція: форма джерела випромінювання - площа

Найбільшу точність при простоті обробки образень забезпечують перші два методи. В якості джерела випромінювання для них найчастіше використовують лазери.

Оскільки при використанні точкового джерела випромінювання лазер потрібно постійно рухати, для програмно-апаратного комплексу було вибрано лазерний випромінювач у формі лінії 5mW Laser Module Emitter - Red Line. 5mW Laser Module Emitter (рис. 2.26) – це лазерний випромінювач у формі ліній з можливістю зміни фокусної відстані. Характеристики лазерного випромінювача наведені в табл. 2.18.



Рисунок 2.26 – 5mW Laser Module Emitter - Red Line

Таблиця 2.17 – Характеристики 5mW Laser Module Emitter - Red Line

Вихідна потужність	мін. 2.5 мВт, типова 3.0 мВт, макс. 5.0 мВт
Робочий струм	мін. 10 мА, типовий 20 мА, макс. 25 мА
Робоча напруга	мін. 2.3 В, типова 4.5 В, макс. 8.0 В
Довжина хвилі	650 нм
Робоча температура	мін. -15°C, типова 25°C, макс. 35°C
Ширина сфокусованої лінії	< 2мм з триметрової відстані

2.1.6. Корпус

Корпус програмно-апаратного комплексу складається з наступних п'ятьох частин:

- 1) Підставка (рис. 2.27)
- 2) Корпус підставки для камери та лазера (рис. 2.28)
- 3) Корпус для крокового двигуна (рис. 2.29)
- 4) Корпус для лазера (рис. 2.30)
- 5) Поворотний круг (рис. 2.31)

Корпус виготовлений з ПВХ товщиною 5мм за допомогою фрезерного станку з ЧПУ

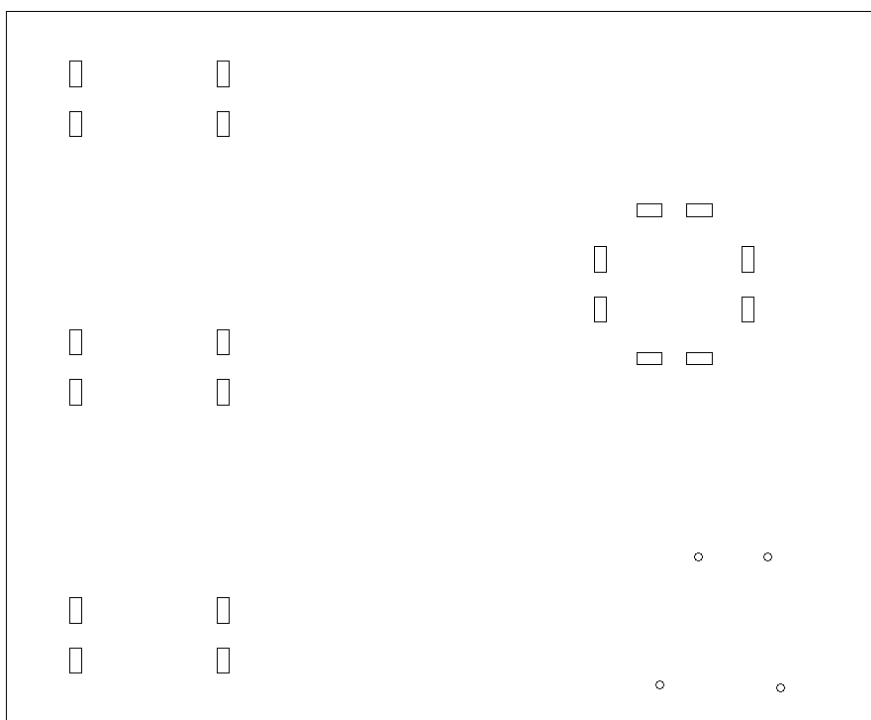


Рисунок 2.27 – Підставка

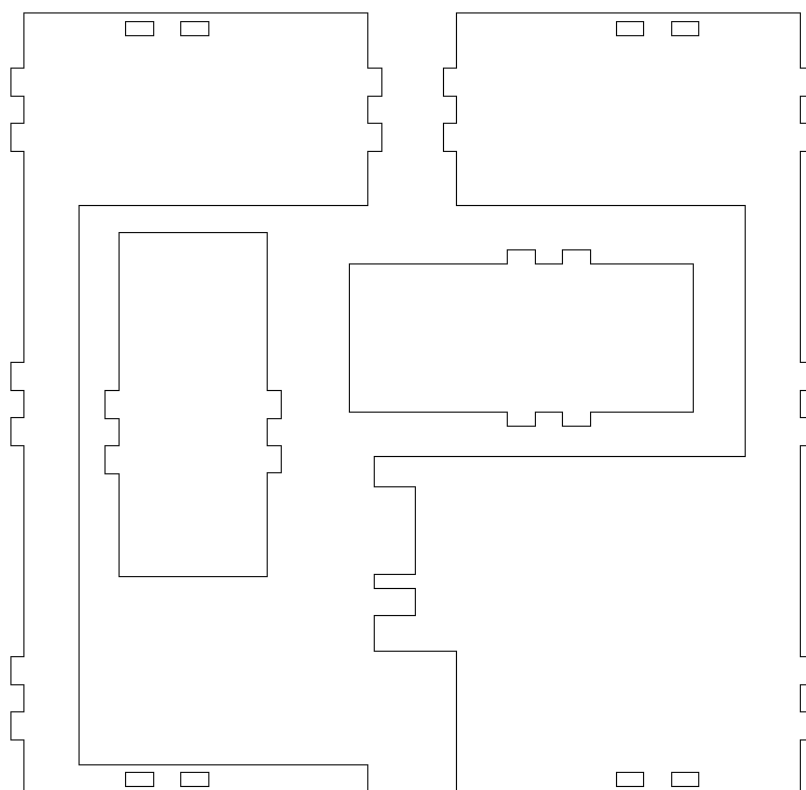


Рисунок 2.28 – Корпус підставки для камери та лазера

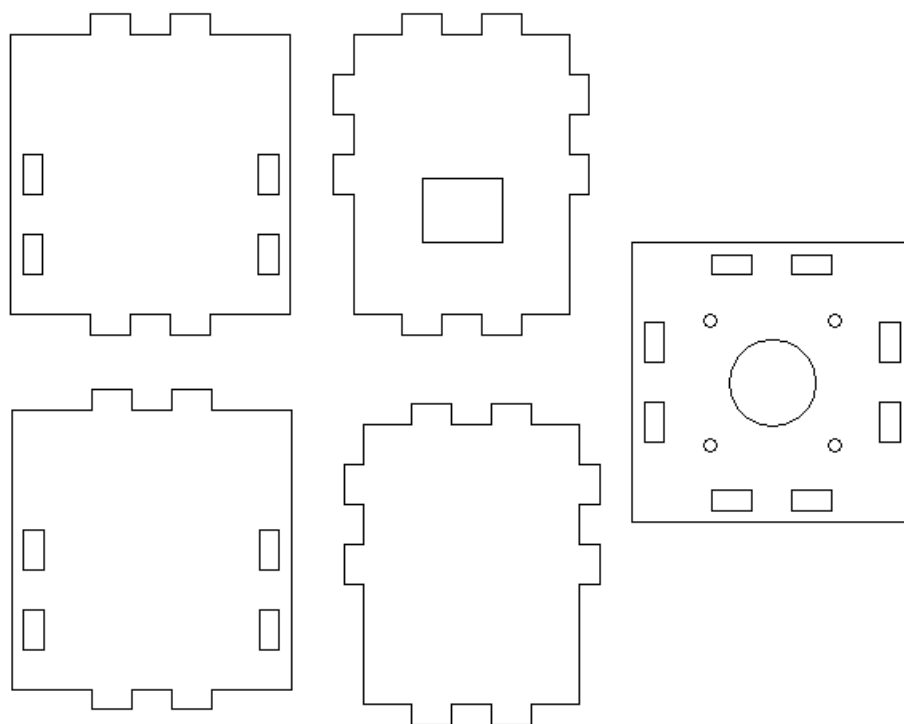


Рисунок 2.29 – Корпус для шагового двигателя

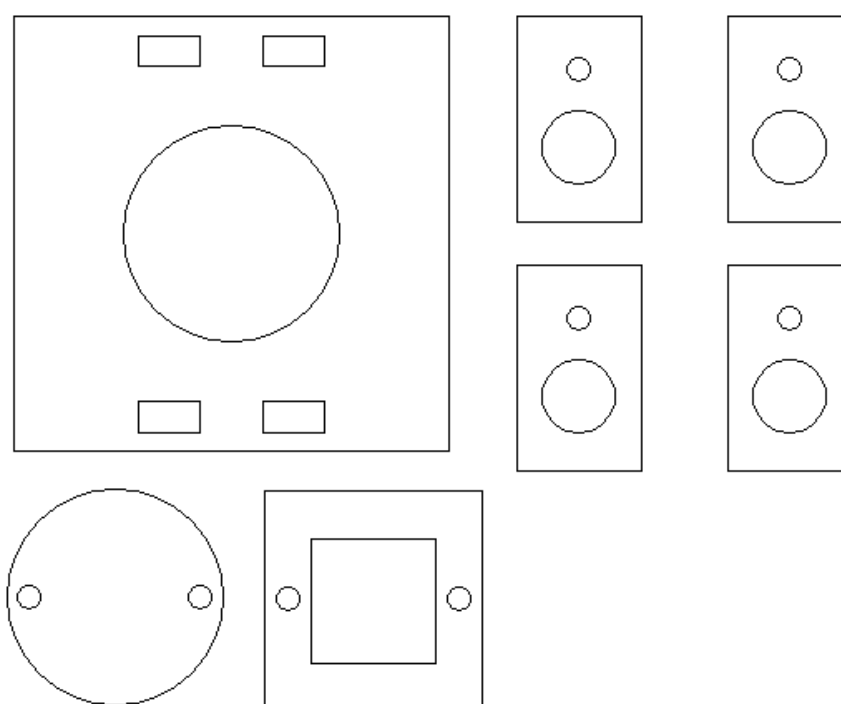


Рисунок 2.30 – Корпус для лазера

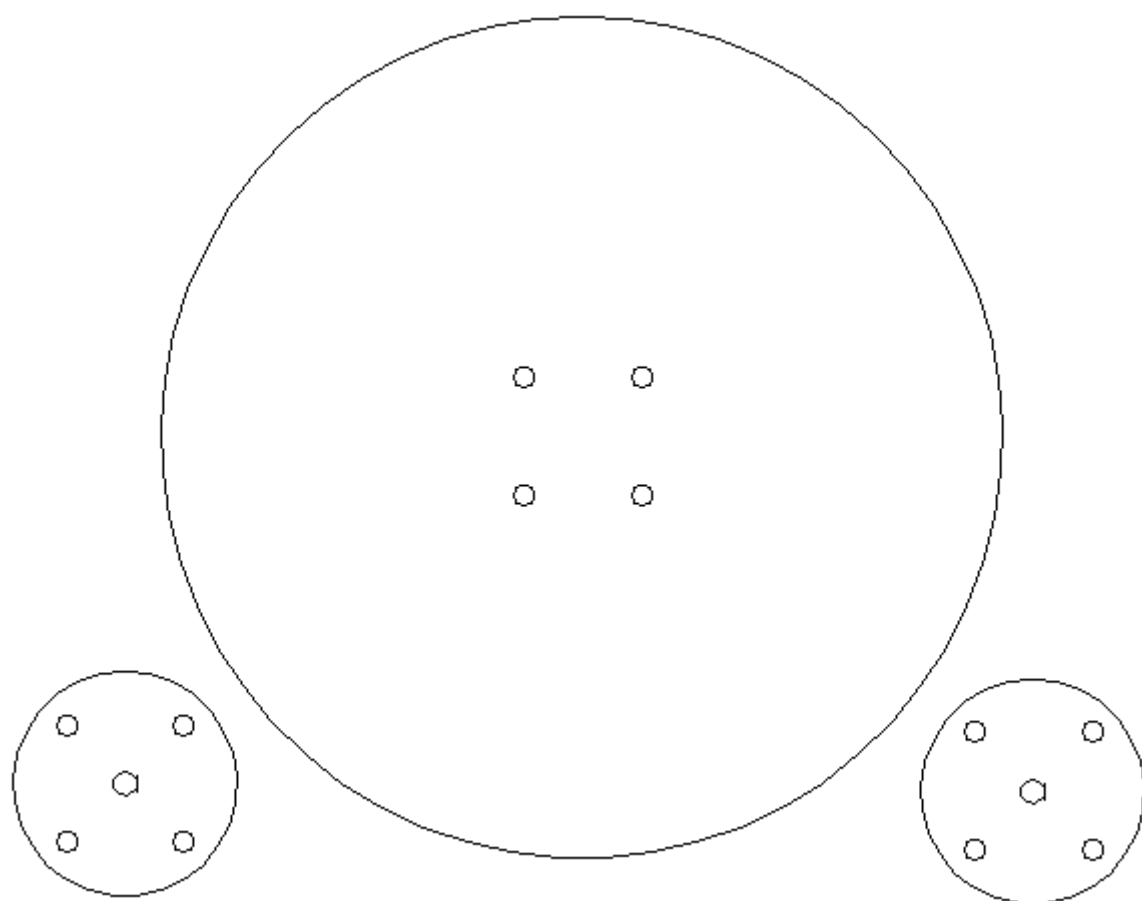


Рисунок 2.31 – Поворотный круг

2.2. Програмні засоби для розробки системи вимірювання розмірів оптичним методом

Програмні засоби для даного програмно-апаратного комплексу повинні мати можливість виконувати наступні основні функції:

- 1) Керування Arduino
- 2) Отримання зображень з веб-камери
- 3) Калібрування веб-камери
- 4) Обробка зображень
- 5) Побудова поверхні з хмари точок

Пункти 1 – 4, за допомогою додаткових модулів, дозволяє виконувати пакет програмного забезпечення MathWorks MATLAB. Для виконання п'ятого пункту використовується система MeshLab.

2.2.1. MATLAB

MATLAB – це мова програмування високого рівня та інтерактивне середовище для числових обчислень, візуалізації та програмування. Використання MATLAB дозволяє аналізувати дані, розробляти алгоритми і створювати моделі та додатки. Мова програмування, інструменти та вбудовані математичні функції дозволяють досліджувати різні підходи та досягти рішення швидше ніж з використанням традиційних мов програмування, таких як C/C++ чи Java.

MATLAB можна застосовувати при вирішенні багатьох задач, таких як обробка сигналів, обробка зображень та відео, системи автоматичного контролю, тестування та вимірювання, та фінанси. Більше мільйона інженерів та науковців в промисловості і навчанні застосовують MATLAB.

Основні особливості MATLAB:

- мова програмування високого рівня для обчислень, візуалізації та розробки додатків;

- інтерактивне середовище для дослідження, розробки та вирішення проблем;
- математичні функції лінійної алгебри, статистики, перетворення Фур'є, фільтрації, оптимізації, інтегрування та розв'язання диференціальних рівнянь;
- вбудована графічна система для візуалізації даних та створення графіків;
- засоби розробки для покращення якості коду та максимізації продуктивності;
- засоби для створення додатків з графічним інтерфейсом;
- засоби інтеграції алгоритмів створених в MATLAB з зовнішніми додатками написаними на C, Java та .NET.

Числові обчислення. MATLAB включає широкий спектр методів обчислення для аналізу даних, розробки алгоритмів та створення моделей. Мова MATLAB включає математичні функції, які найчастіше використовуються в інженерних та наукових задачах. Основні математичні функції використовують оптимізовані бібліотеки, що забезпечують швидке виконання векторних та матричних обчислень.

Доступні методи включають:

- інтерполяція та регресія;
- диференціювання та інтегрування;
- системи лінійних рівнянь;
- перетворення Фур'є;
- диференціальні рівняння.

Додатки до MATLAB дозволяють використовувати функції для специфічних областей: статистики, оптимізації, аналізу сигналів, машинного навчання та обробки зображень і відео.

Аналіз та візуалізація даних. MATLAB включає інструменти для отримання, аналізу та візуалізації даних.

MATLAB дозволяє отримувати дані з інших файлів, програм, баз даних та зовнішніх пристроїв. Він дозволяє читати дані з популярних форматів файлів: Microsoft Excel, текстових чи бінарних файлів, зображень, звукових та відео файлів.

MATLAB надає можливість керувати, фільтрувати та обробляти дані. MATLAB включає функції для фільтрації, згладжування, інтерполяції, конволюції та перетворень Фур'є. Він має вбудовані функції для побудови інтерактивних 2D та 3D графіків.

Мова програмування MATLAB має вбудовану підтримку операцій над матрицями та векторами, які є надзвичайно важливими для розв'язання інженерних та наукових проблем.

MATLAB включає різні інструменти для ефективної розробки алгоритмів:

- Command Window – дозволяє інтерактивно вводити дані, виконувати команди та програми і виводити результати;
- MATLAB Editor – надає засоби для редагування та відладки;
- Code Analyzer – автоматично перевіряє код, та надає рекомендації для максимізації продуктивності;
- MATLAB Profiler – вимірює продуктивність програм та визначає секції коду, які необхідно покращити.

MATLAB використовує оптимізовані бібліотеки для швидкого виконання матричних та векторних обчислень. Для використання переваги багатоядерних систем MATLAB включає багато функцій. Що автоматично виконуються на декількох обчислювальних потоках.

2.2.2. MATLAB ArduinoIO Package

MATLAB ArduinoIO Package дозволяє використовувати MATLAB для комунікації з платою Arduino за допомогою USB кабелю. Цей пакет складається з серверної програми, що запущена на платі Arduino, яка слухає команди, що приходять через USB порт, виконує їх і якщо потрібно повертає результат.

Такий підхід дозволяє:

- почати програмувати зразу без необхідності інших додатків;
- працювати середовищі MATLAB для інтерактивної розробки та відладки;
- керувати цифровими та аналоговими входами/виходами на платі Arduino;
- розробляти програми для отримання аналогових та цифрових даних, а також контролювати сервоприводи та крокові мотори;
- виконувати цикли з частотою до 25 Гц (не в реальному часі).

2.2.3. Image Acquisition Toolbox for MATLAB

Image Acquisition Toolbox дозволяє отримувати зображення та відео з камер та передавати їх в MATLAB чи Simulink. Він може автоматично виявляти обладнання та налаштовувати його властивості. Image Acquisition Toolbox підтримує широкий спектр камер від різних виробників, від недорогих веб-камер до високоякісних наукових та промислових пристроїв.

Основні особливості:

- підтримка промислових стандартів, включаючи DCAM, Camera Link, та GigE Vision;
- підтримка поширених інтерфейсів для веб-камер, включаючи Direct Show, QuickTime, та video4linux2;
- підтримка великої кількості виробників промислових та наукових камер;
- декілька режимів отримання зображень;
- додаток для швидкого налаштування пристроїв, отримання зображень та перегляду відео наживо.

MATLAB, Image Acquisition Toolbox та Image Processing Toolbox разом створюють завершене середовище для розробки програмного забезпечення для

обробки зображень. Вони дозволяють отримувати зображення та відео, візуалізувати дані, розроблювати алгоритми обробки, та створювати графічні інтерфейси. Image Acquisition Toolbox дозволяє отримувати кадри так швидко наскільки це дозволяють камера та комп'ютер.

Image Acquisition Toolbox включає програму та функції для доступу до пристроїв з MATLAB. Він автоматично виявляє сумісні пристрої отримання зображень та відео. Кожне підключення до пристрою є окремим об'єктом, що надає програмний інтерфейс для налаштування та отримання зображень.

2.2.4. Camera Calibration Toolbox for MATLAB

Camera Calibration Toolbox це додаток до MATLAB, що дозволяє отримати усі основні внутрішні та зовнішні параметри камери необхідні для точних вимірювань. Даний додаток для MATLAB побудований на добре відомому алгоритмі для калібрації Жанга.

Параметри, що визначаються:

- фокусна відстань;
- головна точка;
- коефіцієнт зміщення;
- коефіцієнти спотворення;
- вектор переходу;
- матриця повороту.

2.2.5. Image Processing Toolbox for MATLAB

Image Processing Toolbox включає алгоритми, функції та програми для обробки, аналізу, візуалізації зображень. Він дозволяє проводити покращення зображень, усувати розмитості, виявляти ознаки, усувати шум, проводити сегментацію зображень та геометричні перетворення. Багато вбудованих

функцій мають можливість працювати в паралельному режимі для покращення продуктивності на багатоядерних ПК.

Image Processing Toolbox підтримує велику кількість форматів зображень та відео. Функції візуалізації дозволяють розглядати зображення, змінювати контраст, створювати контури чи гістограми та маніпулювати регіонами зображень. Вбудовані алгоритми дозволяють відновлювати спотворені зображення, знаходити та вимірювати об'єкти, аналізувати форми та текстури та змінювати кольори.

Основні особливості:

- покращення, фільтрація зображень та усунення розмитості;
- аналіз зображень включаючи сегментацію, морфологію та вимірювання;
- геометричні перетворення;
- програми для перегляду зображень та відео;
- імпорт та експорт

2.2.6. MeshLab

MeshLab – це прогресивний програмний пакет для обробки тривимірних полігональних сіток. MeshLab є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом.

MeshLab призначений для керування та обробки великих неструктурованих полігональних сіток та включає набір інструментів для їх редагування, очистки, покращення, огляду, рендерингу та конвертації.

MeshLab використовується у різних академічних дослідницьких проектах, таких як мікробіологія, відновлення поверхонь, палеонтологія, ортопедичні операції та 3D-друк.

Висновки до розділу 2

До апаратної частини програмно-апаратного комплексу належать:

- контролер – Arduino Uno;
- кроковий мотор – SY42STH47-1206A;
- драйвер – Polulu A4988 Stepper Motor Driver Carrier;
- блок живлення – MW3R15GS/6XC;
- веб-камера – Logitech HD Webcam C270;
- лазер – 5mW Laser Module Emitter;
- корпус.

До програмної частини належать:

- MATLAB;
- MATLAB ArduinoIO Package;
- Image Acquisition Toolbox for MATLAB;
- Camera Calibration Toolbox for MATLAB;
- Image Processing Toolbox for MATLAB;
- MeshLab.

3. ТЕОРІЯ ТРІАНГУЛЯЦІЇ

3.1. Модель пінхол камери

Простою та поширеною геометричною моделлю камери є модель пінхол камери, що складається з площини та точки за її межами (рис 3.1). Площиною є площина зображення, а точкою є центр проєкції. У камері кожна точка в тривимірному просторі є частиною прямої, що проходить через центр проєкції. Якщо ця пряма не паралельна площині зображення, вона мусить перетинати її в одній точці зображення. В математиці таке відображення 3D точки на площину називається проєкцією.

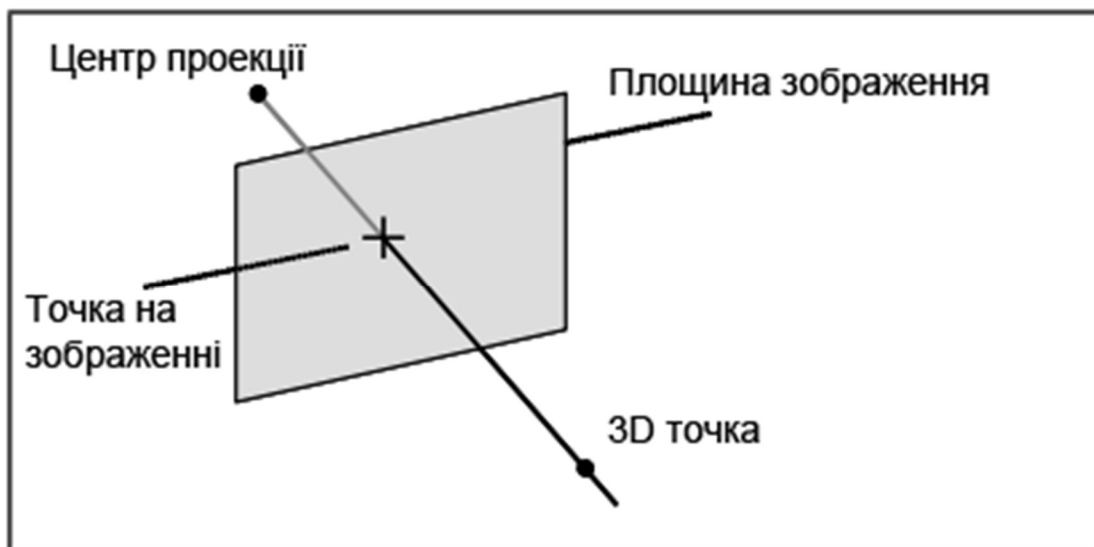


Рисунок 3.1 – Модель пінхол камери

3.2. Геометричні представлення векторів, прямих та площин

Оскільки світло рухається по прямій (в однорідних середовищах, таких як повітря), то для отримання рівнянь для 3D реконструкції використовуються

рівняння лінійної алгебри. Основними елементами є точки, прямі, промені та площини.

Ми використовуємо малі літери для позначення точок p та векторів v . Усі вектори є векторами-стовпцями з дійсними координатами $v \in \mathbb{R}^3$, які можуть бути представлені як матриці з трьома рядками і одним стовпцем $v \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$. Довжина вектору – це скаляр $\|v\| \in \mathbb{R}$

Точки та вектори. Оскільки вектори утворюють векторний простір, вони можуть бути помноженими на число та додані один до одного. Вектори та точки пов'язані: точка додана до вектору є $p+v$ іншою точкою, а різниця між двома точками $q-p$ є вектором. Якщо p – це точка, λ – число, а v – вектор, то $q = p + \lambda v$ є іншою точкою. У даному рівнянні λv є вектором довжиною $|\lambda| \cdot \|v\|$.

Параметричні рівняння прямих та променів. Пряма L може бути представлена за допомогою однієї з її точок q та вектором напрямку v (рис 3.2). Будь-яка інша точка p на прямій L може бути представлена як додавання скалярного множника вектору напрямку λv , до точки q (λ може бути додатнім, від'ємним чи нулем):

$$L = \{p = q + \lambda v : \lambda \in \mathbb{R}\} \quad (3.1)$$

Це параметричне рівняння прямої, де число λ є параметром. Таке рівняння не є унікальним, точка q може бути замінена на будь-яку точку на прямій L , а вектор v може бути замінений на будь-який ненульовий множник вектору v .

Промінь – це половина прямої. Коли в рівнянні прямої параметр λ може набувати будь-якого значення, в рівнянні променя λ мусить бути невід'ємним.

$$R = \{p = q + \lambda v : \lambda \geq 0\} \quad (3.2)$$

Точка q є початком променя.

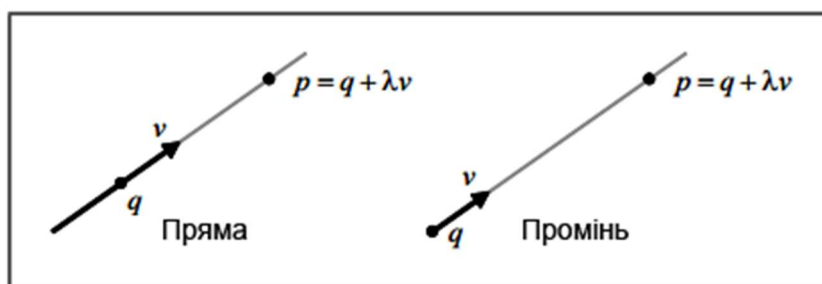


Рисунок 3.2 – Параметричні рівняння прямих та променів

Параметричне рівняння площини. Площина P може бути представлена у параметричній формі за допомогою точки q на ній та двох лінійно незалежних векторів напрямку v_1 та v_2 (рис 3.3). Будь-яка інша точка p на площині P може бути представлена як результат додавання скалярних множників векторів напрямку $\lambda_1 v_1$ та $\lambda_2 v_2$ до точки q :

$$P = \{ p = q + \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 : \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R} \} \quad (3.3)$$

Як і у випадку з прямою, таке рівняння не є унікальним, точка q може бути замінена на будь-яку точку на площині P , а вектори v_1 та v_2 можуть бути замінені на два будь-яких лінійно незалежні вектори на площині.

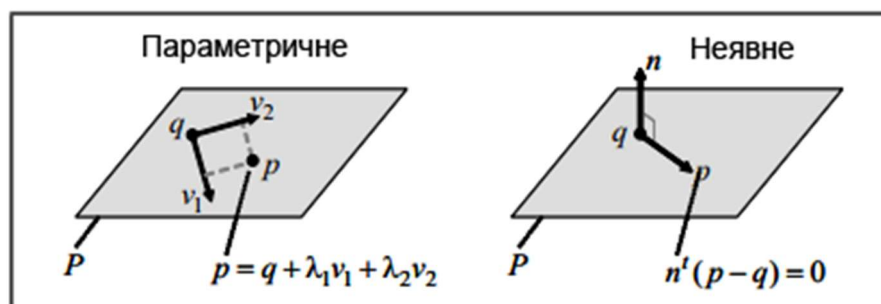


Рисунок 3.3 – Параметричне та неявне рівняння площини

Неявне рівняння площини. Площина P може бути представлена у неявній формі за допомогою точки q на ній та нормального векторів n (рис 3.3). Будь-яка інша точка p належить площині P тоді і тільки тоді, коли вектори $p - q$ та n ортогональні:

$$P = \{p : n'(p - q) = 0\} \quad (3.4)$$

Знову ж таки це рівняння не є унікальним, точка q може бути замінена на будь-яку точку на площині P , а вектор n може бути замінений на будь-який ненульовий множник вектору n .

Для переходу з параметричного до неявного рівняння необхідно взяти вектор $n = v_1 \times v_2$ як векторний добуток двох базисних векторів v_1 та v_2 . Точка q може бути використана у обох рівняннях.

3.3. Відтворення поверхні за допомогою тріангуляції

Лазери, що використовуються для проекції створюють лінії або точки на зображенні, що можуть бути ідентифіковані. Користуючись моделлю пінхол камери спроектована лінія створює площину світла (унікальну площину, що містить лінію на площині зображення та центр проекції), а спроектована точка створює промінь світла (унікальну пряму, що містить точку на площині зображення та центр проекції).

Перетин площини випромінювання з об'єктом містить багато підсвічених викривлених сегментів. Кожен з цих сегментів складається з багатьох підсвічених точок. Кожна підсвічена точка, видима камерою створює промінь камери. Якщо положення камери та лазера відомі, то рівняння спроектованої площини і рівняння променів камери можуть бути створені. З цих рівнянь положення підсвічених точок можуть бути знайдені за допомогою обчислення перетину площини лазера та променя камери.

Перетин площини та прямої. Обчислення перетину площини та прямої можливе якщо пряма представлена в параметричній формі:

$$L = \{ p = q_L + \lambda v : \lambda \in \mathbb{R} \}, \quad (3.5)$$

а площина представлена в неявній формі:

$$P = \{ p : n^t(p - q_P) = 0 \} \quad (3.6)$$

Пряма та площина можуть не перетинатись у випадку, коли вони паралельні. Тоді вектори v і n ортогональні і $n^t \cdot v = 0$. Якщо вектори v і n не ортогональні і $n^t \cdot v \neq 0$, тоді пряма і площина перетинаються тільки в одній точці p . Оскільки точка p належить прямій то вона може бути записана як $p = q_L + \lambda v$, для значення λ , яке необхідно знайти. Оскільки точка p належить і площині, вона має задовольняти лінійне рівняння:

$$n^t(p - q_P) = n^t(\lambda v + q_L - q_P) = 0, \quad (3.7)$$

звідки:

$$\lambda = \frac{n^t(q_P - q_L)}{n^t v} \quad (3.8)$$

Оскільки пряма проходить через точку, то це рівняння можна розв'язати. Геометрична інтерпретація перетину площини і прямої зображена на рис. 3.4.

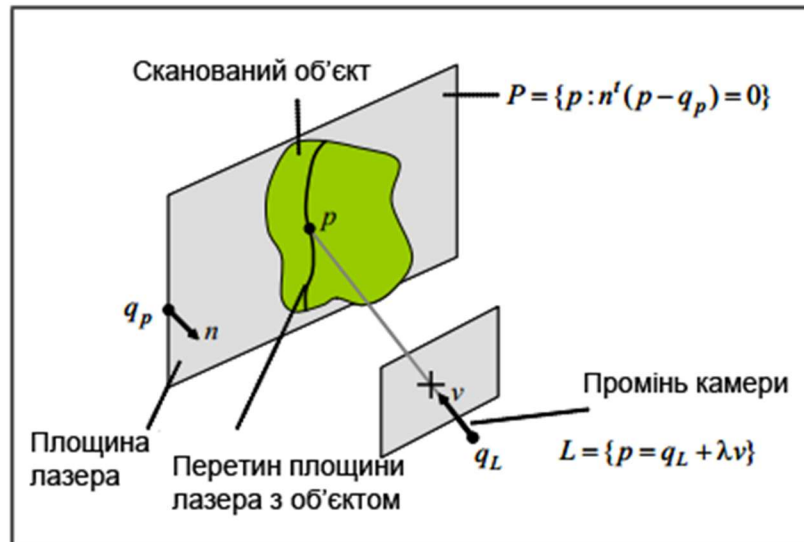


Рисунок 3.4 – Перетин площини та прямої

3.4. Координатні системи

Розглянемо модель пінхол камери з центром проєкції o і площиною зображення $P = \{p = q + u^1 v_1 + u^2 v_2 : u^1, u^2 \in \mathbb{R}\}$. Будь-яка 3D точка p , не обов'язково

на площині зображення, має координати $\begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$ відносно початку системи

координат. На площині зображення точка q та вектори v_1 і v_2 формують локальну систему координат. Координати точки $p = q + u^1 v_1 + u^2 v_2$ на площині зображення це

параметри u^1 та u^2 , що можуть бути записані як вектор $\begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix}$. Використовуючи

цю нотацію точка p може бути виражена наступним чином:

$$\begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = [v_1 \mid v_2 \mid q] \cdot \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Ідеальна модель пінхол камери показана на рис. 3.5, центр проекції o є центром системи координат з координатами $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ і точка q та вектори v_1 і v_2

визначені як:

$$[v_1 | v_2 | q] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Не кожна точка має проекцію на площину зображення. Точки без проекції знаходяться в площині паралельній зображенню, що проходить через центр проекції. Точка з координатами $\begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$ лежить на цій площині якщо $p^3 = 0$. У

іншому випадку, точка проектується на площину зображення з координатами:

$$\begin{aligned} u^1 &= p^1 / p^3 \\ u^2 &= p^2 / p^3 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Проекція 3D точки p з координатами $\begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$ має координати $u = \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix}$ в

площині зображення, якщо для деякого $\lambda \neq 0$ виконується:

$$\lambda \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

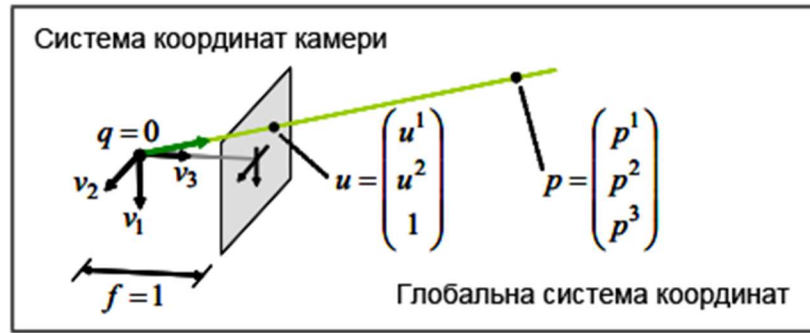


Рисунок 3.5 – Ідеальна модель пінхол камери

Центр загальної моделі пінхол камери не завжди знаходиться в центрі головної системи координат і може бути у будь-якому положенні (рис. 3.6).

Точка в 3D просторі має координати $p_w = \begin{pmatrix} p_w^1 \\ p_w^2 \\ p_w^3 \end{pmatrix}$ в глобальній системі координат,

та координати $p_c = \begin{pmatrix} p_c^1 \\ p_c^2 \\ p_c^3 \end{pmatrix}$ в системі координат камери. Ці два вектори можна

перетворити за допомогою вектору переходу $T \in \mathbb{R}^3$ та матриці повороту $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ відповідно до рівняння:

$$p_c = R \cdot p_w + T.$$

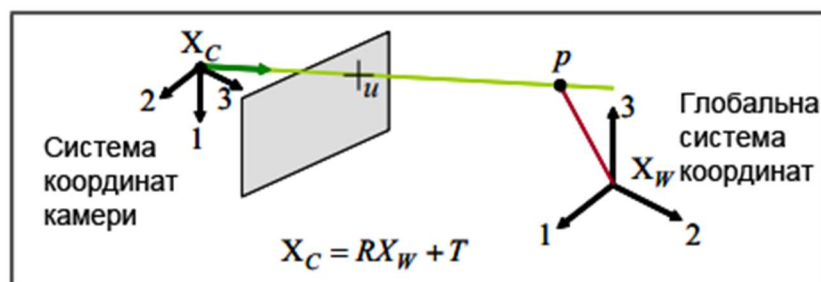


Рисунок 3.6 – Загальна модель пінхол камери

У системі координат камери відношення між 3D точкою і координатами на зображення описується рівнянням ідеальної моделі з $\lambda u = p_c$. У глобальній координатній системі рівняння набуває вигляду

$$\lambda \cdot u = R \cdot p_w + T. \quad (3.12)$$

Параметри R та T називаються зовнішніми параметрами камери і описують положення камери відносно глобальної системи координат.

Попереднє рівняння працює тоді, коли міра довжини на площині зображення співпадає з мірою довжини в головній системі координат, відстань між центром проекції і площиною зображення дорівнює одній мірі довжини та центр системи координат камери має координати на площині зображення $u^1 = 0$ та $u^2 = 0$. Жодне з цих припущень не виконується на практиці. Міра довжини на площині зображення це піксель, а міра довжини в глобальній координатній системі це міліметр, відстань між центром проекції і площиною зображення може бути будь-якою, а центр проекції знаходиться в лівому верхньому кутку зображення. Для компенсації цих недоліків в рівняння вводиться матриця K , яка описує внутрішні параметри камери:

$$\lambda \cdot u = K(R \cdot p_w + T) \quad (3.13)$$

Матриця K має наступну форму:

$$K = \begin{pmatrix} f \cdot s_1 & f \cdot s_\theta & o^1 \\ 0 & f \cdot s_2 & o^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.14)$$

де f – фокусна відстань (відстань між центром проекції і площиною зображення). Параметри s_1 і s_2 – це параметру масштабу відносно першої та другої координатної осі. Ці параметри є необхідними оскільки деякі камери мають неквадратні пікселі. Параметр s_θ використовується для компенсації похиленої площини зображення. $\begin{pmatrix} o^1 \\ o^2 \end{pmatrix}$ це координати перетину площини

зображення з вертикальною прямою, що виходить з центру проекції. Ця точка називається центром зображення або головною точкою.

Усі внутрішні параметри камери не залежать від її положення, вони описують фізичні властивості, що залежать від механічної і оптичної будови камери. Ці параметри, зазвичай, не змінюються, тому їх потрібно визначити лише один раз за допомогою процедури калібрації. Після цього виміри на площині зображення у пікселях можуть бути переведені у міліметри за допомогою матриці K .

Отримання прямих з точок на зображення. Точка на зображенні з координатами $u = \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix}$ є частиною унікальної прямою, що проходить через неї та центр проекції. Необхідно знайти параметричне рівняння $L = \{p = q + \lambda v : \lambda \in \mathbb{R}\}$ цієї прямої. Оскільки ця пряма містить центр проекції усі її точки будуть мати одні й ті ж координати на зображенні. Якщо p_w — це вектор координат точки на цій прямій, тоді глобальні координати та координати на зображенні пов'язані рівнянням $\lambda \cdot u = R \cdot p_w + T$. Оскільки R є матрицею повороту, то $R^{-1} = R^t$ і рівняння проекції може бути записане у вигляді

$$p_w = (-R^t T) + \lambda (R^t u)$$

Дана пряма описується точкою q з координатами $q_w = -R^t T$, що є центром проекції та вектором $v_w = R^t u$.

Висновки до розділу 3

У даному розділі було розглянуто основи тріангуляції — ключового методу для 3D-реконструкції об'єктів за допомогою комп'ютерного зору. Було представлено модель пінхол камери, яка слугує основою для побудови

геометричних зв'язків між тривимірними об'єктами та їх проекціями на площині зображення. Важливе значення мали математичні описання прямих, променів та площин, як у параметричній, так і в неявній формах. Основна увага приділялася процесу визначення положення точок у просторі через перетин променів камери з площинами лазерного випромінювання.

Також було розглянуто важливість координатних систем — як глобальних, так і локальних для камери — та описано перетворення між ними за допомогою внутрішніх і зовнішніх параметрів камери. Отримані моделі і рівняння створюють фундамент для побудови точних 3D зображень, що застосовуються у комп'ютерній графіці, робототехніці, медичній візуалізації та інших галузях.

4. ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ ПРОГРАМНО–АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ

4.1. Складання апаратної частин комплексу

Процес складання апаратної частини комплексу складався з наступних етапів:

1) складання усіх частин корпусу вирізаних з ПВХ:

- збирання оборотного стола;
- кріплення мотору до його корпусу;
- збирання корпусу для лазера а його кріплення;
- збирання підставки для лазера та камери;
- кріплення усіх зібраних частин до підставки;
- кріплення оборотного стола до валу мотора (рис. 4.1)

2) під'єднання комплектуючих:

- кріплення Arduino до підставки;
- кріплення веб-камери до підставки;
- кріплення макетної плати до підставки;
- кріплення драйверу до макетної плати;
- кріплення радіатору до драйвера, для відведення зайвого тепла, що виділяється при високому струмі (рис. 4.2);
- кріплення мотору до макетної плати за допомогою безгвинтових термінальних блоків (рис. 4.3);
- кріплення лазера до Arduino (роз'єми 12 та GND);
- під'єднання живлення з роз'єму зовнішнього живлення (VIN) до макетної плати, для живлення мотору;
- під'єднання живлення 5 В (роз'єм 5V) до макетної плати, для живлення драйвера;

- під'єднання роз'ємів 4, 5 та 6 Arduino до виходів MS1, MS2 та MS3 драйверу відповідно, для керування мікрокроком;
- під'єднання роз'єму 2 Arduino до виходу STEP драйверу для керування рухом мотора;
- під'єднання роз'єму 3 Arduino до виходу DIR драйверу для керування напрямом руху мотора;
- підключення живлення мотору до виходів VMOT та GND драйверу паралельно з конденсатором на 100 мкФ для запобігання стрибків напруги, що можуть зруйнувати драйвер;
- підключення першої обмотки мотора (чорний та зелений провідники) до виходів 1A та 1B драйвера;
- підключення другої обмотки мотора (червоний та синій провідники) до виходів 2A та 2B драйвера;
- підключення живлення драйверу до виходів VDD та GND драйверу;
- підключення блоку живлення на 9 В до роз'єму зовнішнього живлення Arduino;
- підключення Arduino до комп'ютера за допомогою USB-кабелю;
- підключення веб-камери до комп'ютера.



Рисунок 4.1 – Кроковий мотор з встановленим кріпильним елементом

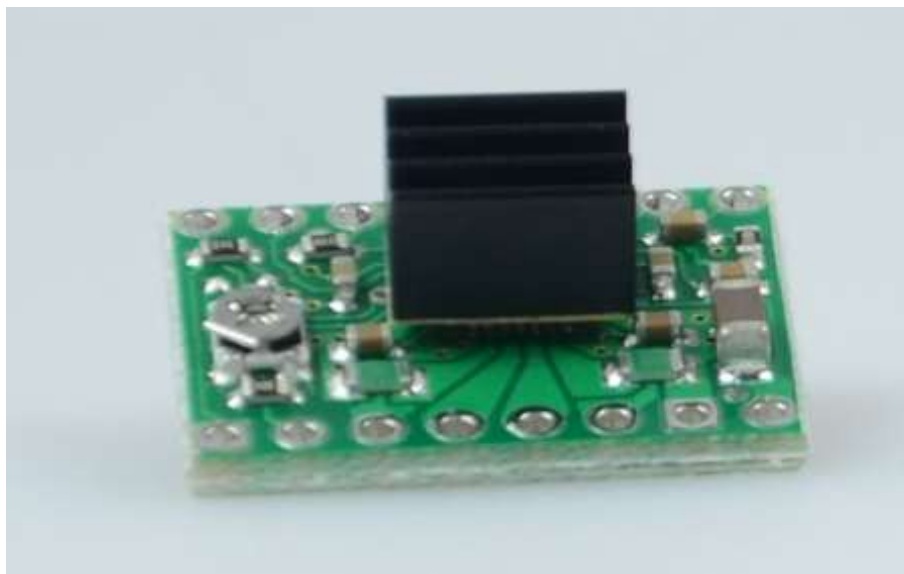


Рисунок 4.2 – Драйвер з встановленим радіатором

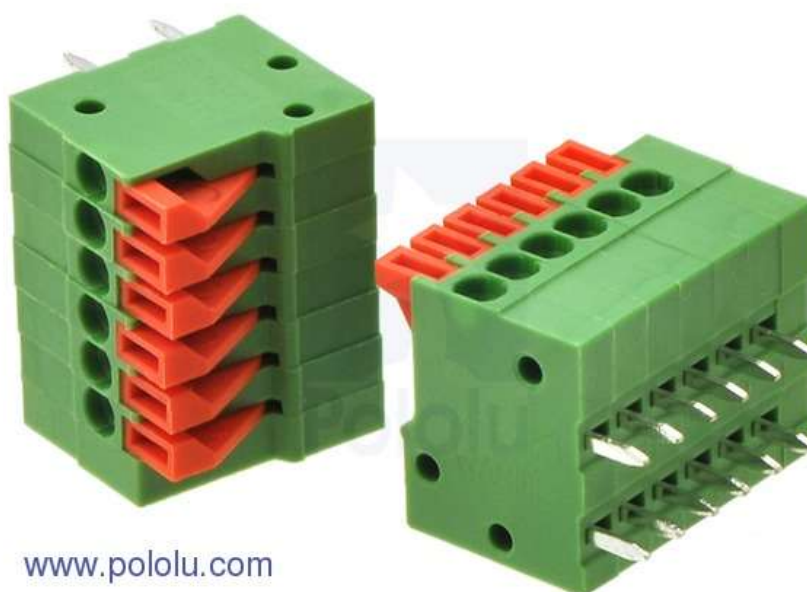


Рисунок 4.3 – Безгвинтові термінальні блоки

Діаграма під'єднання комплектуючих зображена на рис. 4.4. Програмно-апаратний комплекс у зібраному вигляді зображений на рис. 4.5.

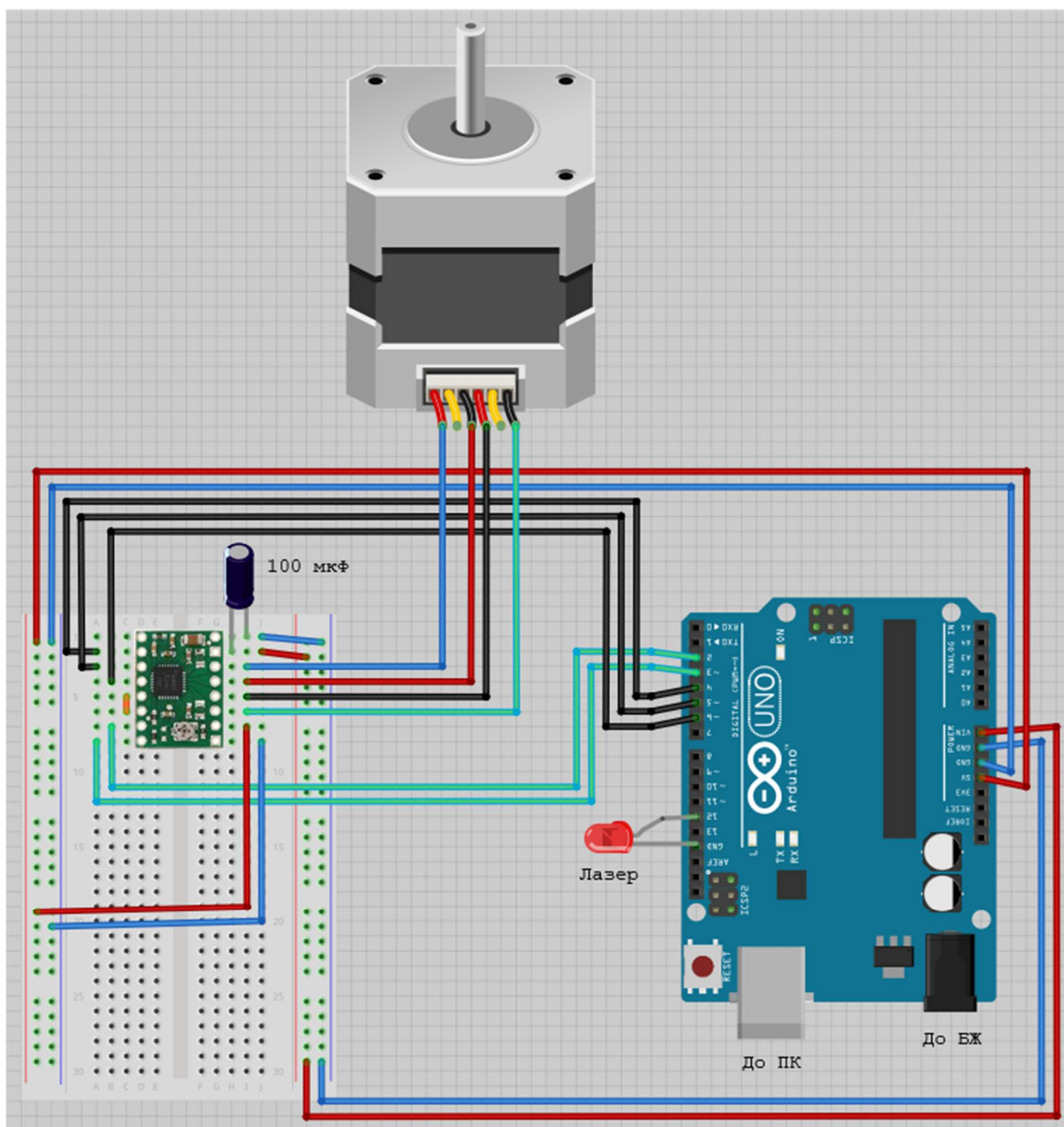


Рисунок 4.4 – Діаграма під'єднання комплектуючих

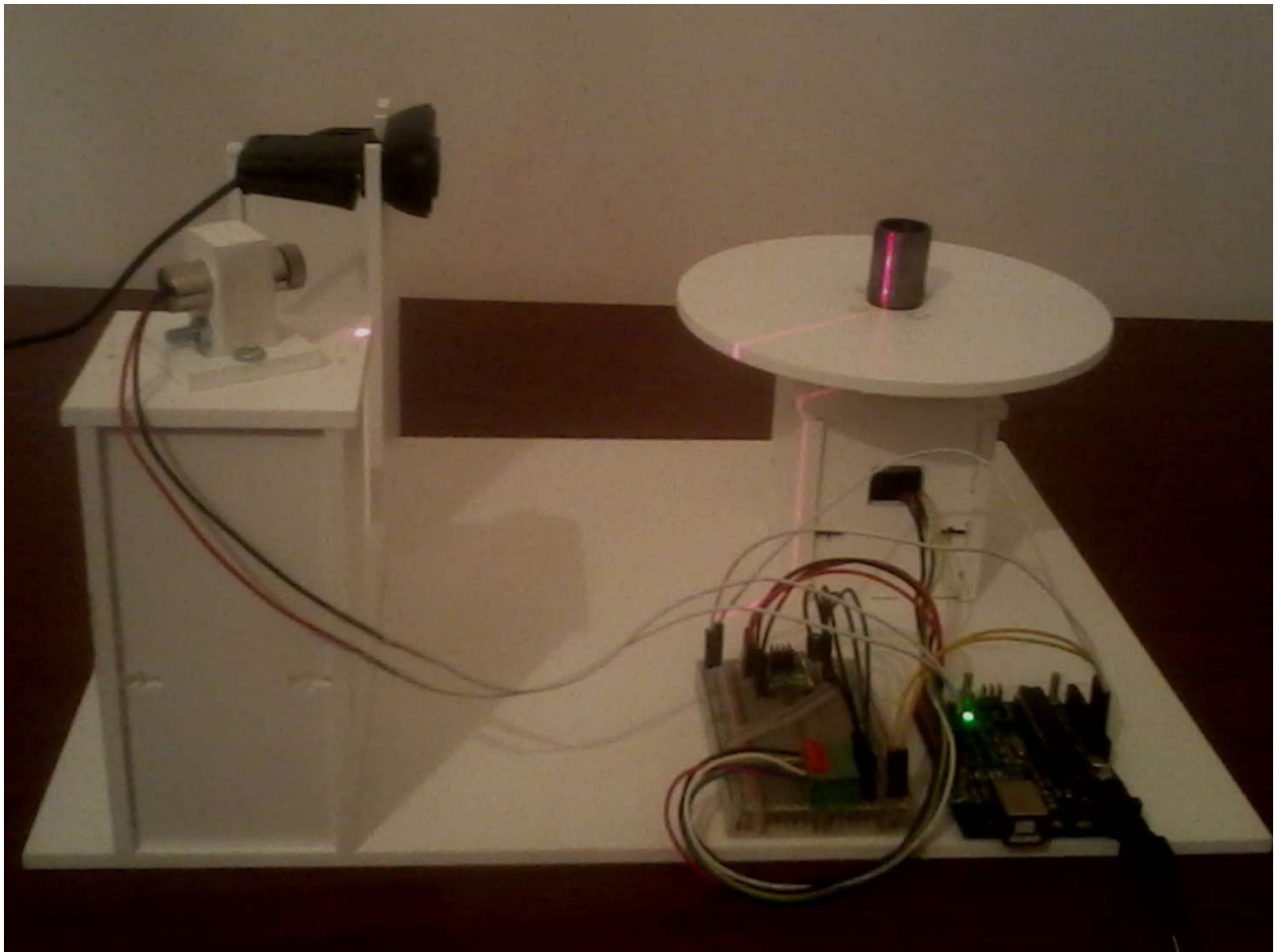


Рисунок 4.5 – Програмно-апаратний комплекс у зібраному вигляді

4.2. Калібрування камери

На перший погляд тріангуляції здається простою концепцією, що включає знаходження точки перетину прямої і площини. Але на практиці різні камери потрібно точно відкалібрувати для того щоб отримати правильні рівняння прямих та площин із зображення

Процес калібрації камери проводиться з використанням Camera Calibration Toolbox for MATLAB (рис. 4.6). Калібрація необхідна для визначення внутрішніх та зовнішніх параметрів загальної моделі пінхол камери описаних у розділі 3.4.

Внутрішні параметри: фокусна відстань; головна точка; коефіцієнт зміщення. Зовнішні параметри: вектор переходу; матриця повороту.



Рисунок 4.6 – Головне вікно Camera Calibration Toolbox for MATLAB

Визначення внутрішніх параметрів.

Процес калібрації вимагає знімання певної кількості зображень об'єкту калібрації, що складається з набору помітних особливостей з відомим положення. Найчастіше в якості об'єкту калібрації використовується зображення шахівниці (рис. 4.7) (сторона квадрату 30 мм).

Для калібрації необхідно зняти 10 – 20 зображень шахівниці у різних положеннях. Для калібрації даної камери було знято 15 зображень (рис. 4.8).

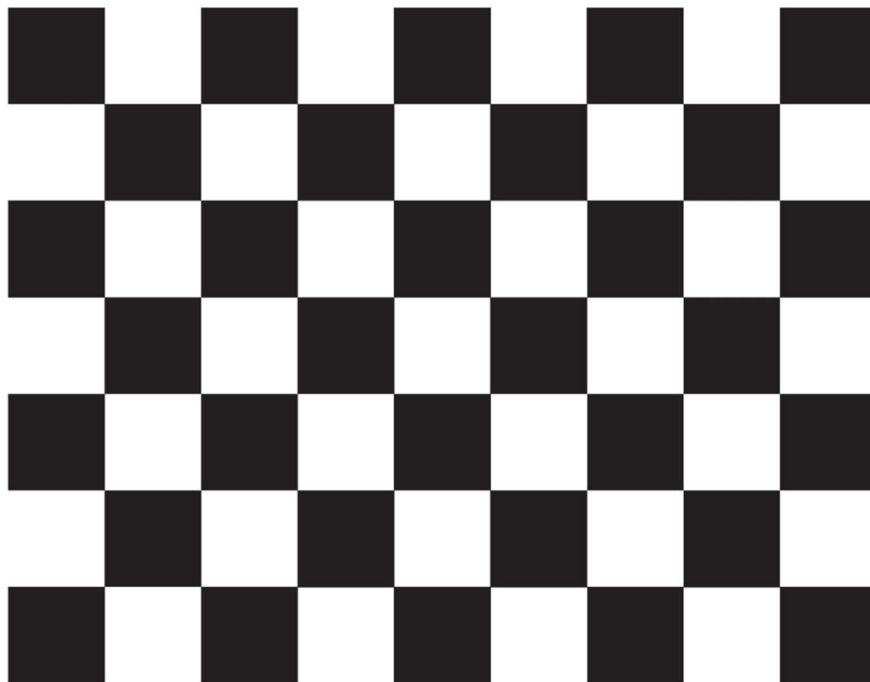


Рисунок 4.7 – Зображення шахівниці для калібрації

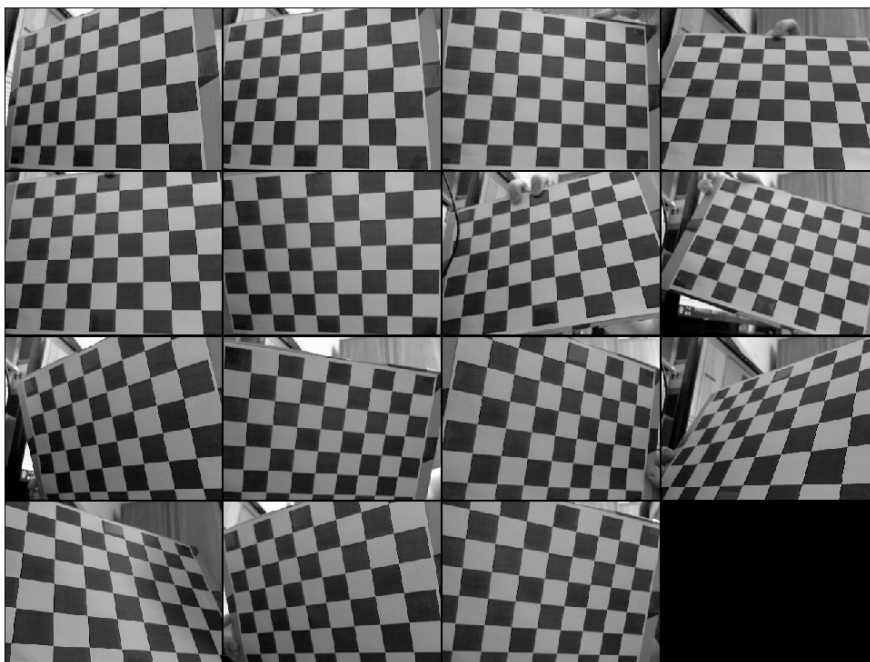


Рисунок 4.8 – Зображення для калібрації

Процес калібрації полягає у позначенні чотирьох зовнішніх кутів шахівниці на кожному з зображень (рис. 4.9). В результаті алгоритм будує двовимірну систему координат паралельну площині шахівниці та в центрі першого вибраного кута (рис. 4.10). Алгоритм визначає усі кути квадратів, що лежать в межах зображення (рис. 4.11).

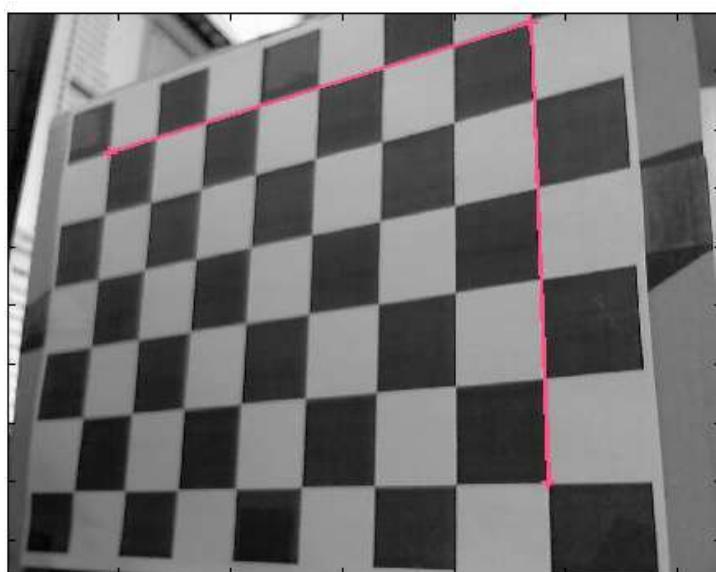


Рисунок 4.9 – Позначення кутів зображення

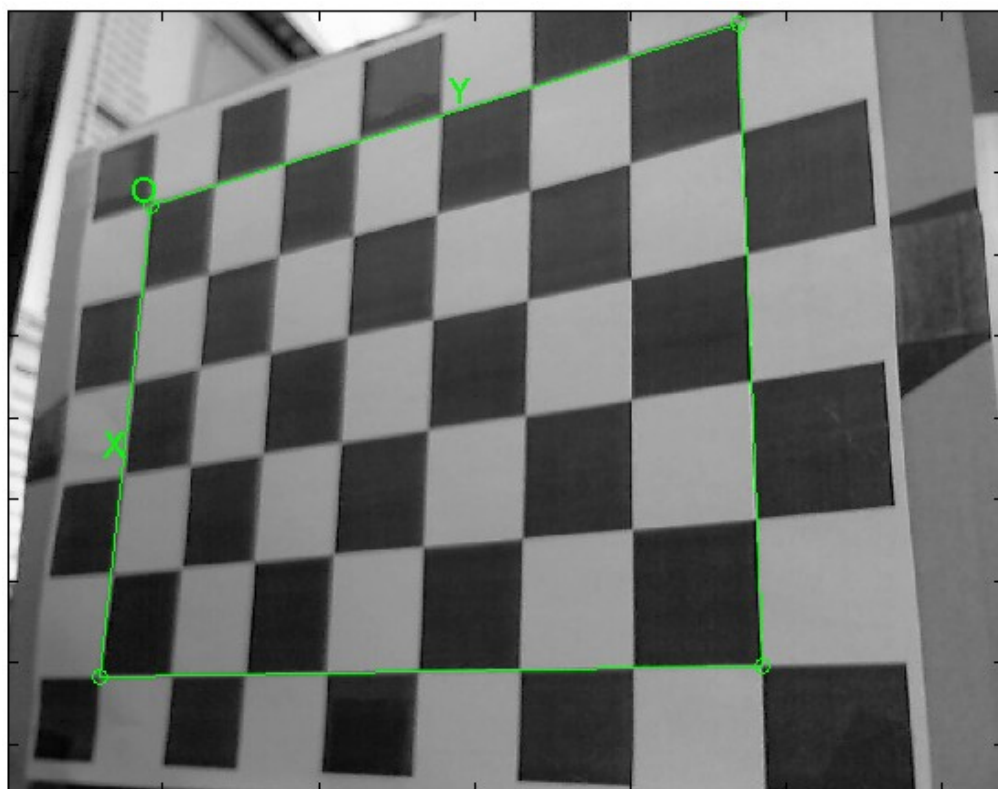


Рисунок 4.10 – Утворена система координат

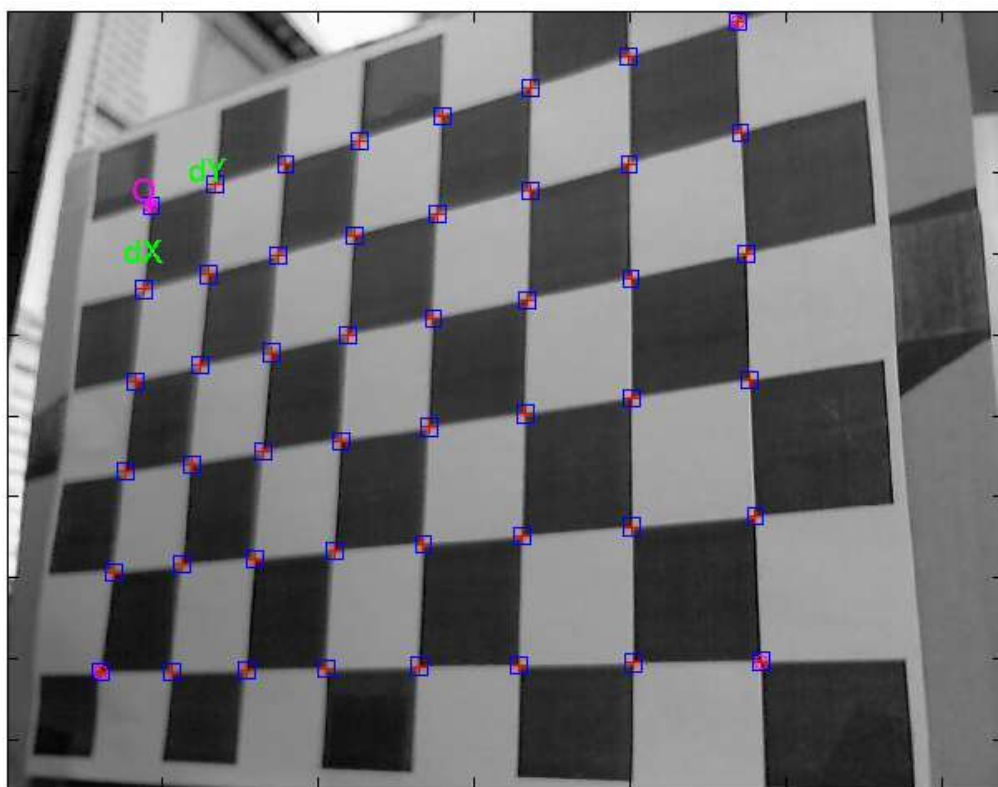


Рисунок 4.11 – Визначені кути

Повторивши ці дії для решти зображень проводиться процес калібрації. Він складається з двох кроків: ініціалізація та нелінійна оптимізація. При ініціалізації відбувається перше обчислення параметрів камери з визначених кутів не враховуючи спотворення лінзи. Нелінійна оптимізація мінімізує загальну помилку обчислень за допомогою методу найменших квадратів.

Отримані результати калібрації для веб-камери Logitech HD Webcam C270:

Фокусна відстань: $f_c = |1431.96973 \quad 1432.96487| \pm |0.70652 \quad 0.67193|$

Головна точка: $cc = |666.45952 \quad 481.19995| \pm |1.01818 \quad 0.81324|$

Зсув: $alpha_c = |0.00000| \pm |0.00000| \Rightarrow$ кут між осями координат
 90.00000 ± 0.00000 градусів

Спотворення: $kc = |0.07147 \quad -0.14079 \quad -0.00120 \quad 0.00127 \quad 0.00000| \pm$
 $|0.00250 \quad 0.00987 \quad 0.00023 \quad 0.00028 \quad 0.00000|$

Помилка: $err = |0.11574 \quad 0.12486|$

Помилки обчислень зображені на рис. 4.12.

На рисунках 4.13 і 4.14 зображені положення шахівниць відносно камери та положення камери відносно однієї шахівниці відповідно

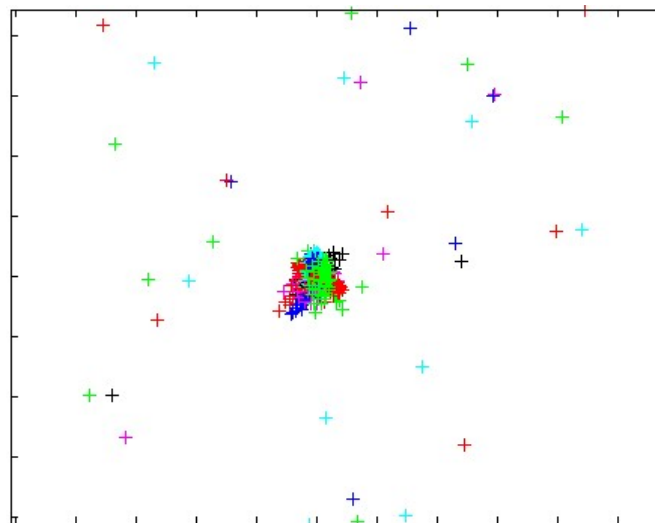


Рисунок 4.12 – Помилка обчислень

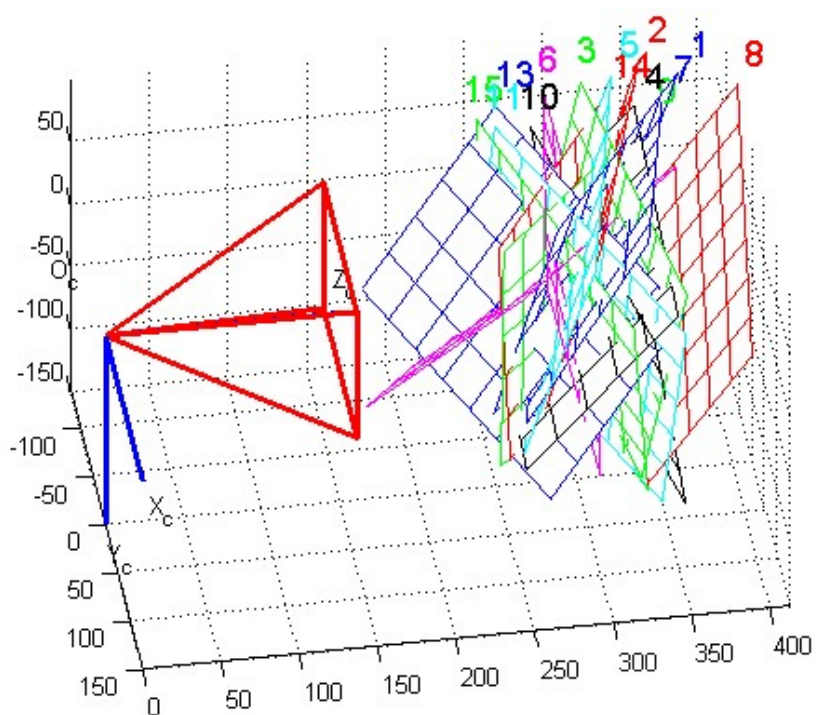


Рисунок 4.13 – Положення шахівниць відносно камери

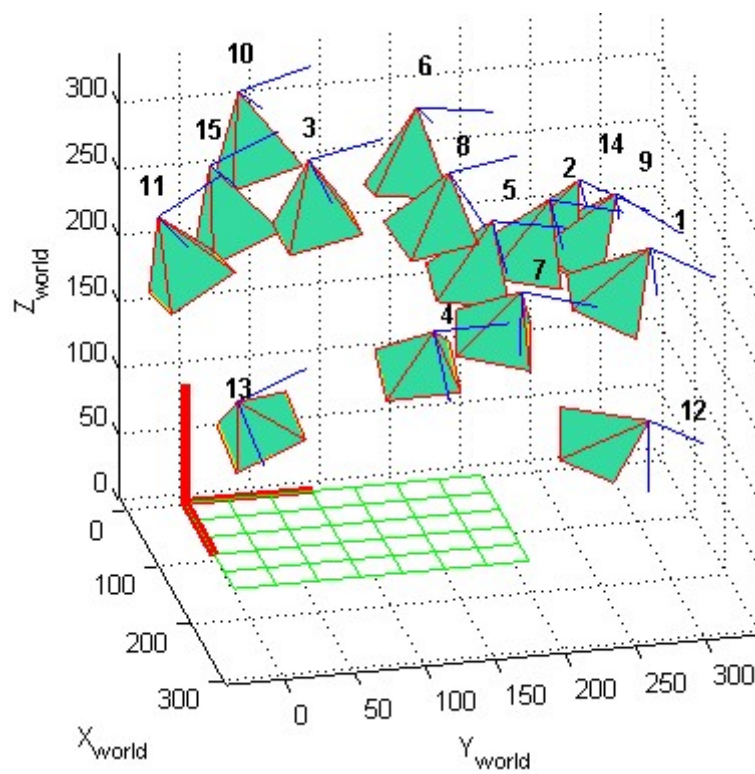


Рисунок 4.14 – Положення камери відносно шахівниці

Також оброблюються загальні коефіцієнти спотворення лінзи, а також радіальні та тангенціальні їх складові. На рис. 4.15 зображено вплив загальної моделі спотворення (суми радіальної та тангенціальної частин) на кожен піксель зображення. Кожна стрілка означає зсув пікселя створений спотворенням лінзи. Найбільшим є зсув у 8 пікселів. На рис. 4.16 зображено вплив тангенціальної частини спотворення. Найбільшим є зсув у 2.1 пікселів. На рис. 4.17 зображено вплив радіальної частини спотворення. Найбільшим є зсув у 6 пікселів.

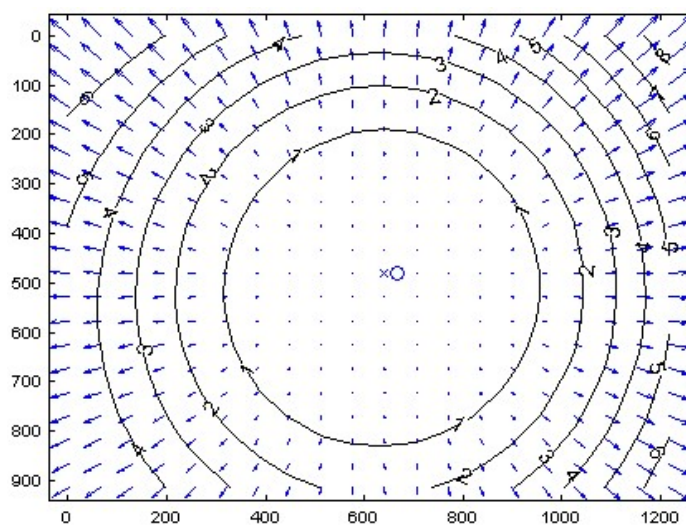
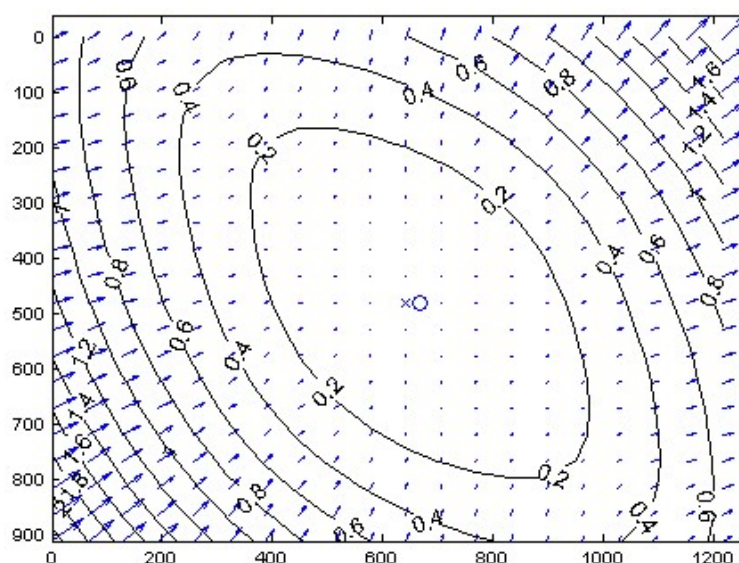


Рисунок 4.15 – Загальна модель спотворення



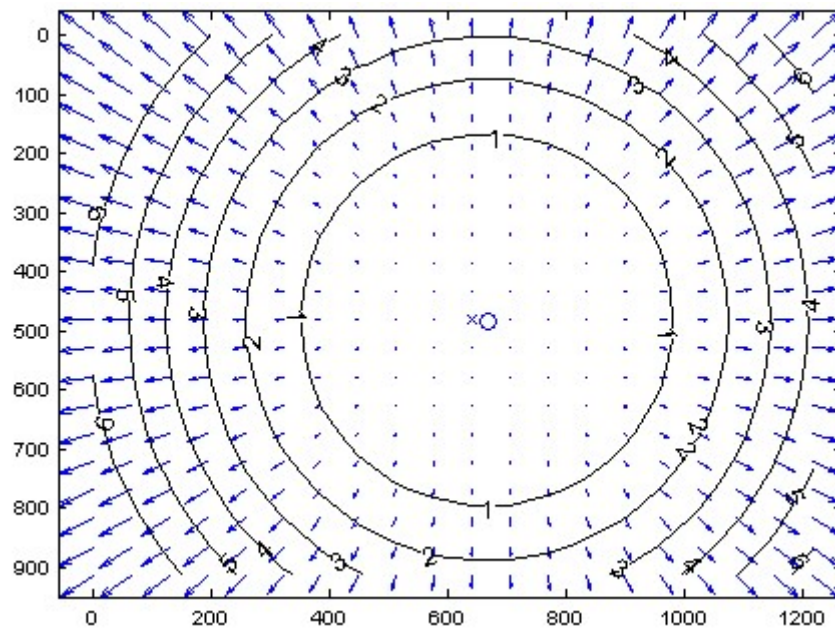


Рисунок 4.17 – Радіальна частина спотворення

Визначення зовнішніх параметрів.

Для визначення матриці повороту та вектору переходу необхідно лише одне зображення шахівниці (рис. 4.18). Центр глобальної системи координат буде встановлено в перший вибраний кут шахівниці.

Отримано наступні зовнішні параметри:

Вектор переходу: $Tc_ext = [-108.797160 \quad 58.622060 \quad 247.081071]$

Вектор повороту: $omc_ext = [-3.136461 \quad -0.024271 \quad -0.007180]$

Матриця повороту: $Rc_ext = \begin{bmatrix} 0.999870 & 0.015487 & 0.004539 \\ 0.015464 & -0.999868 & 0.005065 \\ 0.004617 & -0.004994 & -0.999977 \end{bmatrix}$

Помилка: $err = [1.35952 \quad 1.34762]$

Отримана система координат зображена на рис. 4.18.

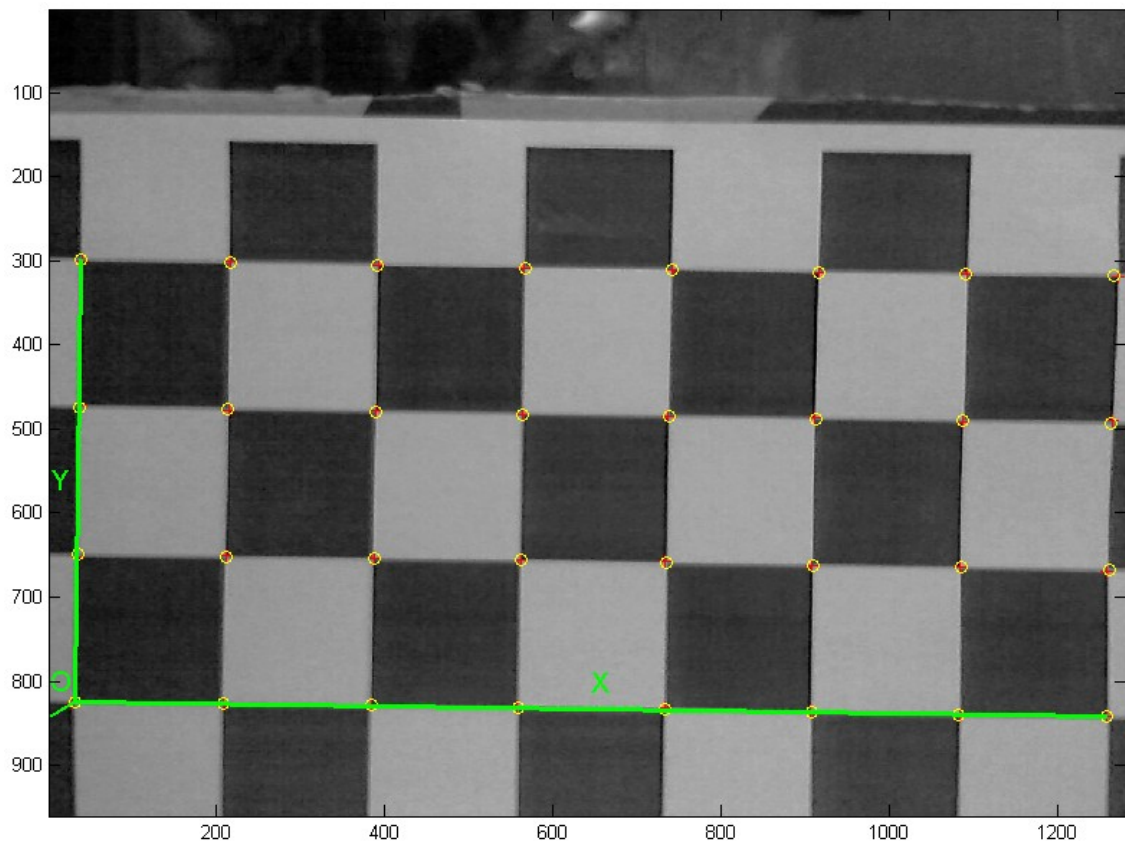


Рисунок 4.18 – Глобальна система координат

4.3. Керування кроковим мотором

Керування кроковим мотором та Arduino відбувається за допомогою ArduinoIO Package. Цей додаток до MATLAB складається з двох частин:

- серверної, яка завантажується на плату Arduino за допомогою Arduino IDE. Серверна частина чекає команди від комп'ютера, виконує їх при отриманні та повертає результат якщо потрібно;
- об'єкту в MATLAB через який здійснюється комунікація з серверною програмою на Arduino.

Для створення об'єкту для керування Arduino використовується функція `arduino`:

```
a = arduino('COM5')
```

При цьому змінній `a` присвоюється об'єкт для керування Arduino підключеної до порту COM5.

Для керування налаштуваннями виходів Arduino використовується функція `pinMode`:

```
a.pinMode(1, 'output') – встановлює роз'єм 1 у режим виходу
a.pinMode(1, 'input') – встановлює роз'єм 1 у режим входу
```

Для запису встановлення виходу Arduino у режим логічного «0» або логічної «1» використовується функція `digitalWrite`:

```
a.digitalWrite(1, 0) – встановлює вихід 1 у режим логічного «0»
a.digitalWrite(1, 1) – встановлює вихід 1 у режим логічної «1»
```

Для увімкнення лазера, підключеного до виходу 12 використовується наступний код:

```
laserPin = 12;
a.pinMode(laserPin, 'output');
a.digitalWrite(laserPin, 1);
```

Для вимкнення лазера:

```
a.digitalWrite(laserPin, 1);
```

Для встановлення напряму обертання мотору проти годинникової стрілки використовується вихід 3 Arduino підключений до входу DIR драйвера:

```
dirPin = 5;
a.pinMode(dirPin, 'output');
a.digitalWrite(dirPin, 0);
pause(1);
```

За годинниковою стрілкою:

```
a.digitalWrite(dirPin, 0);
pause(1);
```

Затримка в одну секунду необхідна для того, щоб мотор встиг опрацювати команду.

Для встановлення режиму мікрокроку використовується виходи 4, 5 та 6 Arduino підключені до входу MS1, MS2 та MS3 драйвера, відповідно. Значення цих входів необхідні для кожного режиму мікрокроку встановлюються відповідно до таблиці 2.13. Для встановлення повного кроку необхідно:

```
MS1Pin = 2;
MS2Pin = 3;
MS3Pin = 4;
a.pinMode(MS1Pin, 'output');
a.pinMode(MS2Pin, 'output');
a.pinMode(MS3Pin, 'output');
a.digitalWrite(MS1Pin, 0);
a.digitalWrite(MS2Pin, 0);
a.digitalWrite(MS3Pin, 0);
```

Для встановлення значення мікрокроку в 1/16:

```
a.digitalWrite(MS1Pin, 1);
a.digitalWrite(MS2Pin, 1);
a.digitalWrite(MS3Pin, 1);
```

Для кроку мотору у встановленому напрямі використовується вихід 2 Arduino підключений до входу STEP драйвера. Для кроку необхідно подати імпульс від 0 до 1 на цей вихід:

```
stepPin = 5;
```

```

a.pinMode(stepPin, 'output');
a.digitalWrite(stepPin, 0);
pause(0.1);
a.digitalWrite(stepPin, 1);
pause(0.3);

```

Затримки необхідні для того, щоб мотор встиг опрацювати команди.

По завершенню роботи з Arduino функція `delete` використовується для знищення об'єкта для керування:

```
delete(a)
```

4.4. Отримання зображень об'єкта

Для отримання фотографій об'єкта з веб-камери у MATLAB використовується Image Acquisition Toolbox. Цей додаток дозволяє створити об'єкт у MATLAB за допомогою якого можливе керування веб-камерою.

Для створення об'єкту для керування веб-камерою використовується функція `videoinput`:

```

adaptorName = 'winvideo';
deviceId = 1;
vidFormat = 'RGB24_1280x960';

```

```
vid = videoinput(adaptorName, deviceId, vidFormat);
```

Де `adaptorName` – це інтерфейс операційної системи, що використовується для зв'язку з веб-камерою, `deviceId` – унікальний ідентифікатор підключеної веб-камери, `vidFormat` – формат знімання зображень, у даному випадку це RGB з роздільною здатністю 1280x960 пікселів.

При цьому змінній `vid` присвоюється об'єкт для керування веб-камерою з описаними параметрами.

Для додаткових налаштувань камери використовуються наступні функції:

`set(vid, 'ErrorFcn', @imaqcallback)` – встановлює стандартну функцію помилок

`set(vid, 'FramesPerTrigger', 1)` – встановлює кількість знятих фотографій за один тригер, в даному випадку 1

`set(vid, 'ReturnedColorSpace', 'rgb')` – встановлює простір кольору поверненого зображення, в даному випадку RGB

`triggerconfig(vid, 'manual')` – встановлює тип тригеру камери, `manual` означає, що знімання фотографій відбувається по запиту з програми.

Для початку роботи веб-камери у режимі зазначеному в налаштуваннях використовується функція `start`:

```
start(vid)
```

Для отримання зображення використовується функція `getsnapshot`:

```
curFrame = getsnapshot(vid);
```

При цьому в змінну `curFrame` записується зняте зображення.

Для збереження зображення у файл використовується функція `imwrite`:

```
imwrite(curFrame, ['photo\' num2str(i) '.png'],  
'png');
```

При цьому зображення зі змінної `curFrame` записується у файл.

По завершенню роботи з веб-камерою функція `stop` використовується для зупинки роботи об'єкта для керування веб-камерою:

```
stop(vid)
```

4.5. Тріангуляція

Процес тріангуляції складається з наступних етапів:

- обчислення кута повороту;
- побудова рівняння площини лазера;
- читання зображення;
- обробка зображення;
- пошук пікселі з лазерною лінією на зображенні;
- проведення тріангуляції для кожного знайденого пікселя;
- розміщення знайдених точок у тривимірному просторі відповідно до кута повороту;
- побудова отриманої хмари точок.

Тріангуляція здійснюється за допомогою внутрішніх та зовнішніх параметрів камери отриманих за допомогою калібрації.

Обчислення кута повороту відповідно до вибраного розміру мікрокроку:

```
angleInc = 2*pi/fileCount;
```

При 200 мікрокроках за поворот, розмір кута повороту рівний 1.8°

Для отримання рівняння площини у неявній формі $P = \{p : n'(p - q) = 0\}$ необхідно три точки p_1 , p_2 та p_3 з координатами у глобальній системі координат, що лежать на площині:

```
p1 = [60; 0; 0];
```

```
p2 = [60; 60; 0];
```

```
p3 = [153; -88; 142];
```

Обчислюються два базисні вектори u_p та v_p , що лежать на площині:

```
u_p = p3 - p1;
```

```
v_p = p3 - p2;
```

Обчислюється нормальний вектор n перпендикулярний до площини та транспонований нормальний вектор n' :

```
n = cross(u_p, v_p);
```

```
n_t = n';
```

Також вибирається одна будь-яка точка, що лежить на площині, q_p :

```
q_p = p3;
```

Рівняння площини має вигляд:

$$P = \{p : n'(p - q_p) = 0\}$$

Для кожного із зображень обчислюється кут його повороту, при чому перше зображення має кут повороту 0°

Обробка зображень здійснюється у наступні етапи:

- читання зображення за допомогою функції `imread` (рис. 4.19):
 - `image_RGB = imread(['photo\' files(step).name]);`
- отримання червоної складової кольору (рис. 4.20):
 - `image_red=image_RGB(:, :, 1);`
- бінаризація зображення за допомогою функції `im2bw` (рис. 4.21):
 - `image_bw = im2bw(image_adjust, 0.99);`
- видалення шуму на зображенні за допомогою функції `bwareaopen` що дозволяє прибирати об'єкти на зображенні, що менші заданого розміру (рис. 4.22):
 - `image_without_noise = bwareaopen(image_bw, 70, 8);`
- визначення центру лазерної лінії для кожного рядка зображення за допомогою морфологічного перетворення звуженням функцією `bwmorph` (рис. 4.23):

```
- I(i, :) = bwmorph(image_without_noise(i, :),  
    'shrink', Inf);
```

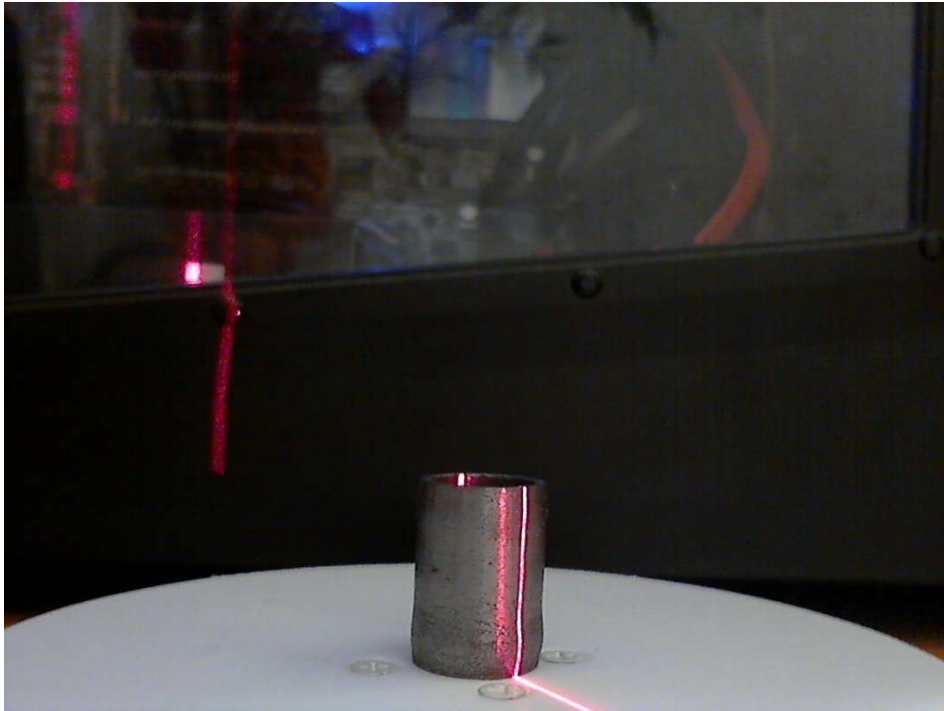


Рисунок 4.19 – Оригінальне зображення з веб-камери

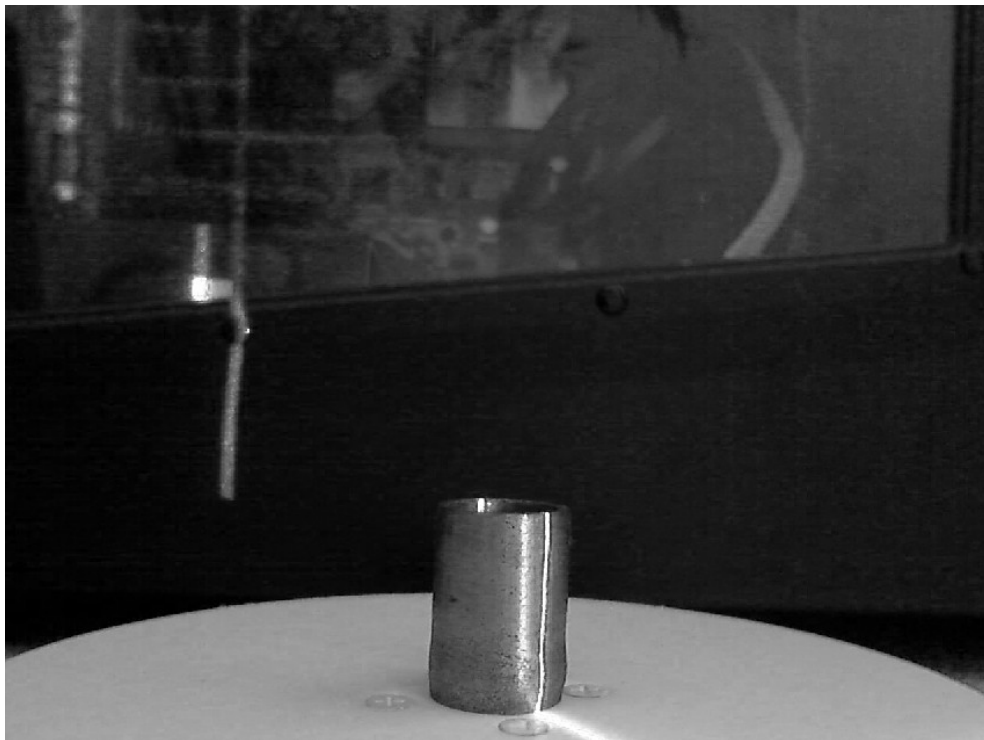


Рисунок 4.20 – Червона складова зображення

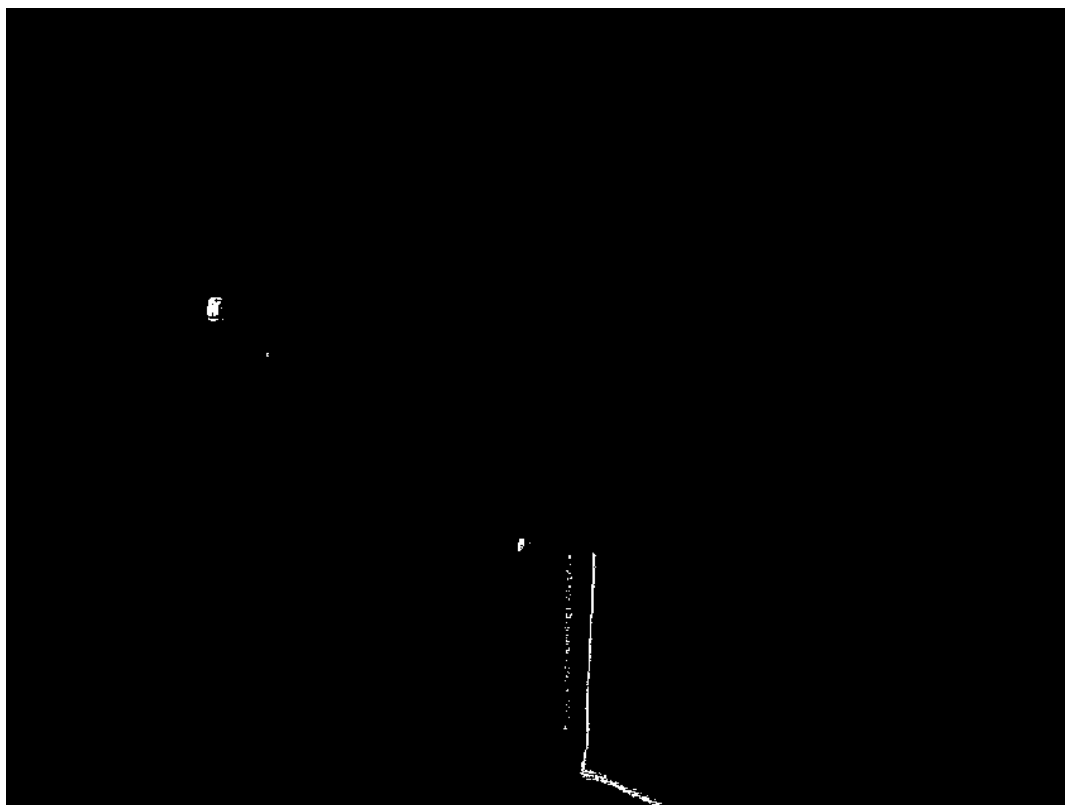


Рисунок 4.21 – Чорно-біле зображення

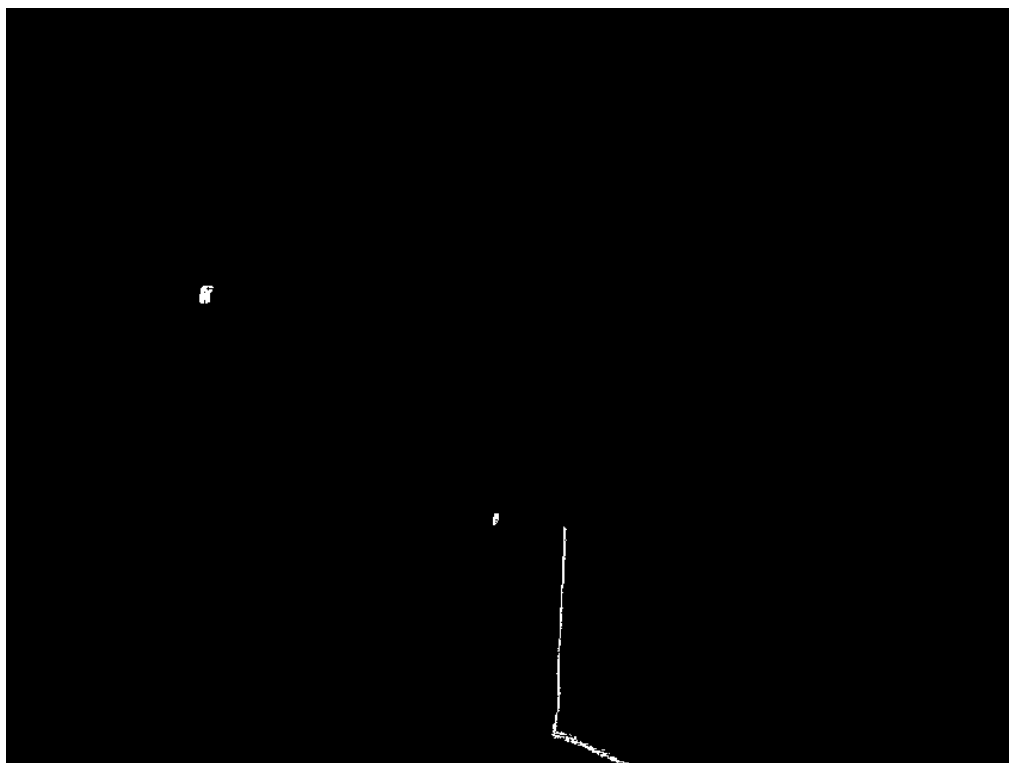


Рисунок 4.22 – Зображення без шуму

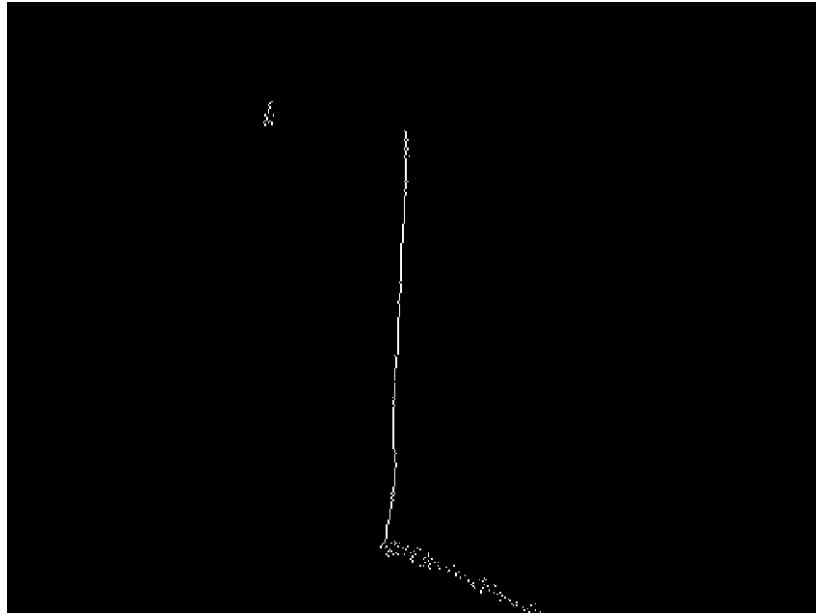


Рисунок 4.23 – Зображення з центром лазерної лінії

Після знаходження центрів лазерної лінії, для кожного знайденого пікселя проводиться тріангуляція:

- визначення вектору координат пікселя на зображенні:

$$\blacksquare u = [j; i; 1];$$

- обчислення вектору напрямку променя v з центру проекції камери, за допомогою матриці повороту Rc_ext та матриці, що описує внутрішні параметри камери KK :

$$\blacksquare v = Rc_ext^{-1} * KK^{-1} * u;$$

- обчислення параметру λ за допомогою рівняння $\lambda = \frac{n^t(q_p - q_l)}{n^t v}$:

$$\blacksquare \lambda = n_t * (q_p - q_l) / (n_t * v);$$

- обчислення координат точки в глобальній системі координат:

$$\blacksquare p = q_l + \lambda * v;$$

- зміна системи координат точки з глобальної на локальну з центром в осі обертання:

$$\blacksquare p_moved = p + coord_t;$$

- обертання точки на кут повороту, вздовж осі обертання мотору за допомогою матриці повороту

$$\begin{aligned} \blacksquare \text{ coord_r} &= \begin{vmatrix} \cos(\text{step} * \text{angleInc}) & 0 & \sin(\text{step} * \text{angleInc}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\text{step} * \text{angleInc}) & 0 & \cos(\text{step} * \text{angleInc}) \end{vmatrix} : \\ \blacksquare \text{ p_rotated} &= \text{coord_r} * \text{p_moved}; \end{aligned}$$

- збереження координат точки у файл

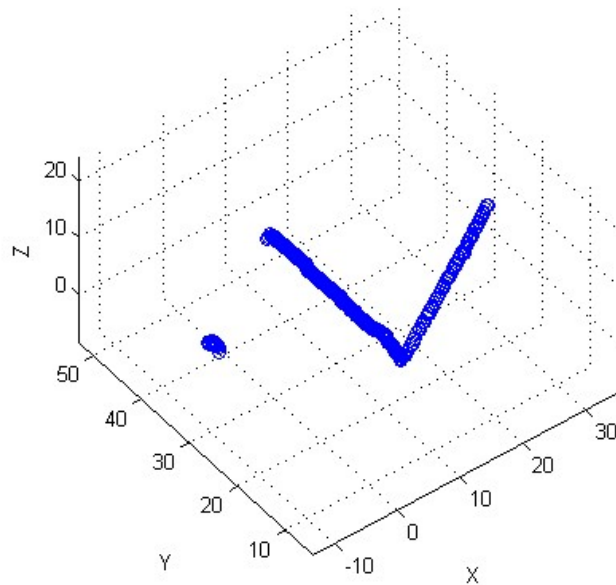


Рисунок 4.24 – Точки об'єкта отримані після одної ітерації алгоритму

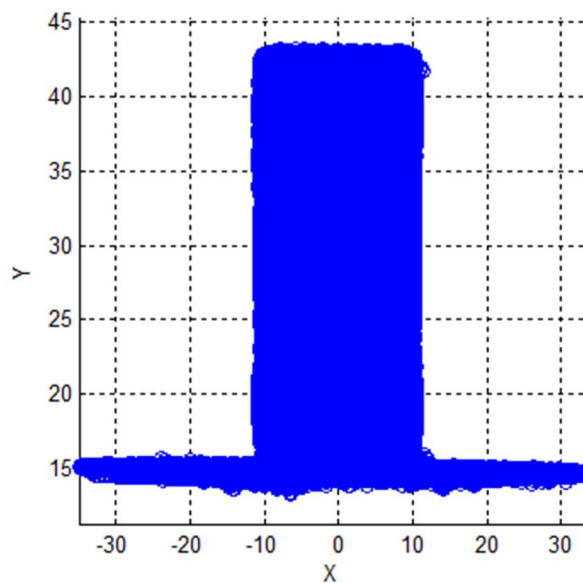


Рисунок 4.25 – Отримана хмара точок об'єкта після виконання тріангуляції усіх знятих файлів

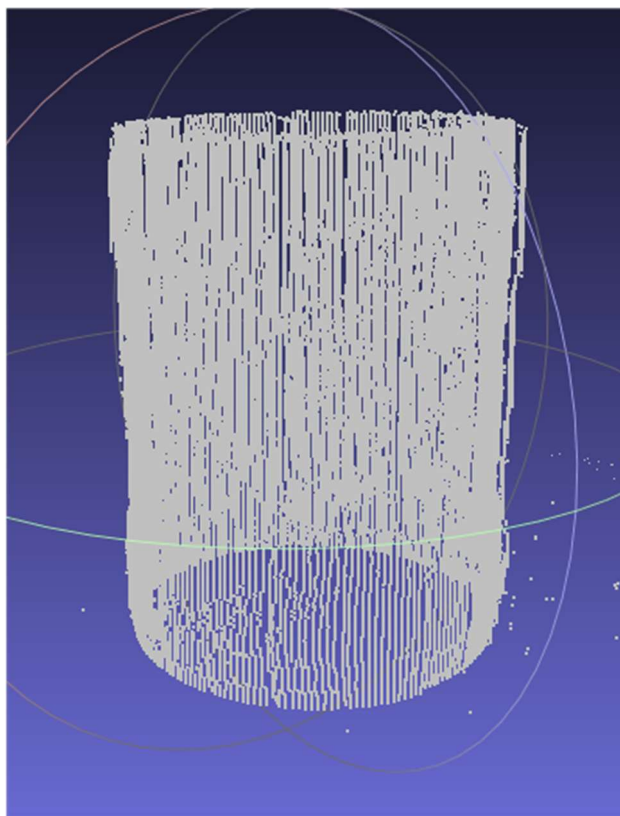


Рис. 4.26. Отримана хмара точок об'єкта побудована в MeshLab

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було детально розглянуто процес створення програмно-апаратного комплексу для тривимірного сканування об'єктів методом тріангуляції. На першому етапі було реалізовано складання апаратної частини, включаючи монтаж усіх конструктивних елементів, електричне підключення компонентів (Arduino, драйвер, кроковий мотор, камера, лазер) та підготовку до взаємодії з комп'ютером.

Особливу увагу було приділено калібруванню камери, без якого неможливе точне виконання тріангуляції. За допомогою інструментів MATLAB було визначено як внутрішні (фокусна відстань, головна точка, параметри спотворення), так і зовнішні параметри камери (вектор переходу та матриця повороту), що дозволило забезпечити високу точність відображення просторових координат.

Окремим етапом було розроблено програмне керування кроковим мотором та лазером через Arduino, що забезпечує обертання об'єкта з фіксованим кроком і точне позиціонування. Також реалізовано програмну обробку зображень, знятих з веб-камери, та алгоритм виявлення лазерної лінії на зображенні. Калібрування камери за допомогою Camera Calibration Toolbox дозволи визначити основні параметри камери.

Завершальним етапом є реалізація тріангуляції — побудови тривимірної моделі об'єкта у вигляді хмари точок. Для кожного зображення обчислювалися координати точок перетину променя з площиною лазера, які згодом формували 3D-модель об'єкта, готову до візуалізації в таких інструментах як MeshLab. Використання лазерної тріангуляції дозволяє даному програмно-апаратному комплексу побудувати 3D-модель об'єкта.

Результати демонструють повноцінну інтеграцію апаратної та програмної частини, що дозволяє виконувати точне сканування об'єктів у тривимірному просторі.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було розроблено та реалізовано програмно-апаратний комплекс для вимірювання геометричних параметрів об'єктів малого розміру з використанням методу лазерної тріангуляції, що дозволяє отримати 3D-модель досліджуваної деталі з високою точністю та швидкістю.

В даній роботі було розроблено програмно-апаратний комплекс для вимірювання геометричних параметрів зразка методом оптичної лазерної тріангуляції. Створено установку для отримання фотографій зразка з усіх кутів огляду, побудовано алгоритм для обробки отриманих зображень та створення його 3D-моделі.

Є перспективною подальша робота в даному напрямку, зокрема удосконалення апаратної та програмної частин комплексу для підвищення точності його роботи та використання у галузі 3D-друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 22, 11 (2000)
2. Arduino Uno // <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
3. Matthew Burris. Stepper Motors vs Servo Motors - Selecting a Motor // <http://components.about.com/od/Components/a/Stepper-Motors-Vs-Servo-Motors-Selecting-A-Motor.htm>
4. Pololu - A4988 Stepper Motor Driver Carrier // <http://www.pololu.com/product/1182>
5. Arduino Support from MATLAB // <http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html>
6. Camera Calibration Toolbox for Matlab // http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
7. Gary Bradski and Adrian Kaehler. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 1st edition, October 2008.
8. David Acosta. Laser Triangulation for shape acquisition in a 3D Scanner Plus Scanner. Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. – 2006. – 6 с.
9. Bagus Arthaya. Point Clouds Construction Algorithm From a Home-made Laser Scanner. Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. – 2008. – 6 с.
10. Ilona Kalova. Industrial Applications Of Triangulation Technique. – 2005. – 6 с.
11. Douglas Lanman Build Your Own 3D Scanner: 3D Photography for Beginners, SIGGRAPH 2009. – 94 с.
12. Охорона праці / Батлук В.А., Кулик М.П., Яцюк Р.А. Підручник. – Львів: Інститут дистанційного навчання, 2011.

13. Основи охорони праці. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Підручник. — К.: Каравела, 2012. — 384 с.
14. Безпека життєдіяльності. Підручник для вузів / Белов С. В., Ільницька А. В., Козьяков А. Ф. та ін. - М.: Вища школа, 2005. - 448 с.
15. Основи безпеки життєдіяльності. Підручник для загальноосвітніх установ /За ред. Смирнова А.Т. - М: АСТ, 2004. – 568 с.
16. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин (затверджено постановою Головою Держгірпромнагляду України 19 квітня 2010р. за № 293/17588). - К., 2010. - 25 с
17. Вісловух А.М. Безпечні умови праці на комп'ютеризованих робочих місцях // «Ринок праці та зайнятість населення». – 2009. – №1. – С. 53-55.
18. Охорона праці: Підручник для студентів вузів / За ред. Б.А.Князевського, П.А. Долина та ін - М: Вища школа, 2003. Р
19. Виробнича санітарія / В.Л. Луценков та ін. – К.: “Урожай”, 1996.– 376.
20. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене — Х.: Вид-во «Форт», 2011. - 736 с.

ДОДАТОК А – Економічне обґрунтування магістерської роботи

Планування магістерської роботи

Для виконання науково-дослідних робіт потрібно визначити терміни проведення науково-теоретичних досліджень (див. табл. А.1.).

Таблиця А.1.

Терміни проведення науково-теоретичних досліджень

Найменування етапів	Тривалість етапів %
1	3
Підготовчий етап	25
Розробка теоретичної частини теми	20
Розробка експериментальної частини теми	18
Проведення експериментів	21
Обробка результатів експерименту	8
Внесення коректив в розробки і дослідження	2
Висновки і пропозиції по темі дослідження	2
Завершальний етап	1
Всього	100

Далі сформуємо етапи виконання. Для їх формування використаємо дослідно-статистичний метод, одним з варіантів якого є імовірнісний метод, коли очікуваний час виконання роботи визначається за формулою:

$$t_0 = \frac{3 * t_{min} + 2 * t_{max}}{5}$$

де t_{min} – мінімальний термін виконання роботи, днів;

t_{max} – максимальний термін виконання роботи, днів;

Дані розрахунків представлені в таблиці А.2.

Таблиця А.2.

Формування етапів проведення ДР

Назва етапів	$t_{\min}$	$t_{\max}$	t_0
1	3	5	3,8
Обґрунтування для проведення робіт	6	8	6,8
Мета і вихідні дані для проведення робіт	6	10	7,6
Збирання, вивчення науково-технічної літератури, науково-довідкової інформації	50	56	52,4
Складання аналітичного огляду	7	11	8,6
Формування можливих напрямків рішень завдань, поставлених в ТЗ НДР і їх порівняльна оцінка	4	6	4,8
Вибір і обґрунтування прийнятого напрямку досліджень і способу рішень	5	8	6,2
Розробка загальної методики проведення дослідження (програма робіт, план-графік)	4	6	4,8
Проведення експериментальних даних	28	32	29,6
Обробка експериментальних даних	30	34	31,6
Аналіз проведених розрахунків	8	12	9,6
Оформлення документації	32	38	34,4
Захист теми	1	2	1,4
Всього	184	228	201,6

Розраховуємо тривалість етапу в календарних днях, врахувавши коефіцієнт календарності за формулою:

$$D_{\text{кал}} = D_{\text{роб}} * K_{\text{кал}}$$

де $K_{\text{кал}}$ – коефіцієнт календарності (1.41 ... 1.5);

$$D_{\text{кал}} = 201,6 \cdot 1,46 \approx 294 \text{ дні.}$$

Розрахунок витрат

Згідно з поданих статей витрат розраховуємо кошторис виконання дослідної роботи:

1) Витрати на спеціальне обладнання.

До спеціального обладнання, що використовуються у даній ДР можна віднести персональний комп'ютер, апаратну частину комплексу, а також амортизаційні відрахування комп'ютерної техніки, відповідно за формулою:

$$AB = \frac{C_{tex} \cdot H_a}{100 \cdot D_p} \cdot D_{кал}$$

де C_{tex} – ціна нової техніки;

H_a – норма амортизаційних відрахувань;

D_p – кількість днів у році.

$$AB = \frac{(1000 + 3500 \cdot 60)}{100 \cdot 365} \cdot 294 = 2174,78$$

Отже, сума амортизаційних відрахувань дорівнює 2174,78 грн

2) Основна і додаткова заробітна плата науково-виробничого персоналу.

До цієї статті можна віднести:

а) стипендію студента, котрий виконує ДП:

$$ЗП_{студента} = C_T \cdot M_p$$

де C_T – стипендія студента за місяць, грн.;

M_p – термін виконання кваліфікаційної роботи, місяців.

$$ЗП_{студента} = 790 \cdot 12 = 9480 \text{ грн.}$$

б) заробітну плату керівника кваліфікаційної роботи

$$ЗП_{керівника} = \frac{ЗП_{к.м.}}{\Phi p.ч.м.} \cdot K$$

де $ЗП_{к.м.}$ – заробітна плата керівника, грн.;

$\Phi p.ч.м.$ – фонд робочого часу місячний, грн..

K – годин консультацій.

$$ЗП_{\text{керівника}} = \frac{2800}{170} \cdot 48 = 790,59$$

Сумарна заробітна плата

$$ЗП_{\text{по темі}} = ЗП_{\text{студента}} + ЗП_{\text{керівника}} = 9480 + 790,59 = 10270,59 \text{ грн}$$

3) Нарахування в фонд соціального та пенсійного забезпечення.

$$Нар = 0,375 \cdot ЗП_{\text{по темі}} = 0,375 \cdot 10270,59 = 3851,47$$

4) Інші витрати.

До цієї статті відносять витрати на консультації, експертизи та ін. Вони визначаються з розрахунку 5-10% від суми попередніх статей:

$$\begin{aligned} IB &= 0.1 \cdot \left(\sum AB + ЗП_{\text{по темі}} + Н_{\text{ар}} \right) = \\ &= 0,1 \cdot (2174,78 + 10270,59 + 3851,47) = 1629,69 \end{aligned}$$

5) Накладні витрати.

Ці витрати визначаються з розрахунку 60% від основної і додаткової заробітної плати науково-виробничого персоналу.

$$НВ = 0.6 \cdot ЗП_{\text{по темі}} = 0.6 \cdot 10270,59 = 6162,36$$

6) Всього витрат.

Визначимо суму всіх витрат

$$\begin{aligned} СВ &= \sum AB + ЗП_{\text{по темі}} + Н_{\text{ар}} + IB + НВ = \\ &= 2174,78 + 10270,59 + 3851,47 + 1629,69 + 6162,36 = 24088,89 \text{ грн.} \end{aligned}$$

7) Прибуток.

Ця стаття визначається з розрахунку 25% від всіх витрат.

$$П = 0.25 \cdot СВ = 0.25 \cdot 24088,89 = 6022,22 \text{ грн.}$$

8) Податок на додану вартість.

Визначається як 20% від суми всіх витрат та прибутку.

$$\text{ПДВ} = 0.2 \cdot (\text{СВ} + \text{П}) = 0.2 \cdot (24088,89 + 6022,22) = 6022,22 \text{ грн} \quad (4.2.11)$$

9) Всього вартість розробки.

$$\text{ВР} = \text{СВ} + \text{П} + \text{ПДВ} = 24088,89 + 6022,22 + 6022,22 = 36133,33 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку витрати на НДР зведемо у таблицю А.3.

Таблиця А.3.

Кошторис виконання ДР

Найменування статей витрат	Сума, грн.	Структура, %
1	2	3
Спеціальне обладнання (амортизаційні відрахування)	2174,78	6,02
Основна і додаткова заробітна плата науково-виробничого персоналу	10270,59	28,42
Нарахування у фонд соціального, пенсійного забезпечення	3851,47	10,66
Інші витрати	1629,39	4,51
Накладні витрати	6162,36	17,05
Всього витрат	24088,89	66,67
Прибуток	6022,22	16,67
Податок на додану вартість	6022,22	16,67
Всього вартість розробки	36133,33	100,00

ДОДАТОК Б – Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Аналіз умов праці, небезпечних і шкідливих виробничих факторів при роботі з ЕОМ

Електронно-обчислювальна (комп'ютерна) техніка (далі – ЕОТ) – це електротехнічні та електронні пристрої, до яких належать електронно-обчислювальна машина (далі – ЕОМ) та периферійні пристрої для візуалізації, документування або передачі інформації (наприклад, відеотермінал, принтер, модем). Розвитку ЕОТ сприяє постійна діалектична взаємодія двох її базових складових частин – апаратного (технічного) та програмного забезпечення. За останні 60 років (період одного людського покоління) використовувалися різні ЕОМ – від громіздких релейних, лампових, напівпровідникових до мікро-ЕОМ, персональних ЕОМ (ПЕОМ) та сучасних ЕОМ, апаратне забезпечення яких ґрунтується на нанотехнологіях. Нажаль, нормативна база з охорони праці сьогодні не відповідає досягнутому рівню технічного прогресу в цій галузі [12].

З розвитком ЕОТ змінювалися умови роботи її апаратного забезпечення та вимоги до обслуговуючого персоналу. В 1970–1980 рр. ЕОТ розміщувалась в обчислювальних центрах. Це були відокремлені будівлі (приміщення) з жорсткими вимогами щодо параметрів повітряного середовища, а в зайнятті посади провідного фахівця обчислювального центра пріоритет надавався фахівцеві зі ступенем кандидата технічних наук та іншими регаліями в галузях, пов'язаних з ЕОТ. Сучасні ЕОМ у переважній більшості є персональними, оскільки розміщуються, де заманеться, та експлуатуються ким завгодно (незалежно від віку та професії користувача). Саме з цієї причини поняття “оператор ЕОМ” модифікувалось у поняття “користувач ЕОМ”.

Наслідками регулярної роботи з комп'ютером без застосування захисних заходів є:

- захворювання органів зору (у 60 % користувачів);
- хвороби серцево-судинної системи (в 60 %);

- захворювання шлунково-кишкового тракту (у 40 %);
- шкірні захворювання (у 10 %);

Під час роботи на комп'ютерах основним обладнанням робочого місця користувача комп'ютера є відеодисплейні термінали (ВДТ), клавіатура, робочий стіл, стілець (крісло); допоміжним: пюпітр, шафи, полиці тощо.

На працівників можуть діяти такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори: [13]

- фізичні:
 - підвищений рівень шуму на робочому місці (від вентиляторів, процесорів та аудіоплат);
 - підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини;
 - підвищений рівень статичної електрики;
 - підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
 - підвищена напруженість електричного поля;
 - прямий та відбитий від екранів блиск, несприятливий розподіл яскравості в полі зору;
- психофізіологічні:
 - фізичні перевантаження статичної та динамічної дії;
 - нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, пере-напруження аналізаторів, від монотонності праці, емоційні перевантаження).

Під час роботи з комп'ютером найбільшому ризику піддаються зорова, опорно-рухова, нервово-психічна системи і репродуктивна функція у жінок (достовірно невідомо, що саме порушує її - випромінювання або постійна статична поза, тому вагітним жінкам слід уникати комп'ютера).

Дисплей - головне джерело небезпеки. Він випускає випромінювання декількох видів: рентгенівське, ультрафіолетове, інфрачервоне, електромагнітне. Для кожного з цих випромінювань розроблені гранично допустимі норми, проте

вони досить умовні й різняться у кожній країні. Норми передбачають, що опромінюється весь організм людини, тоді як на ділі впливу піддається лише верхня частина тулуба. Згадані норми встановлені з розрахунку на кожен вид опромінення в окремо, хоча реально всі поля діють одночасно, а їх комплексний вплив досі не досліджено.

Крім того, відеодисплейний термінал порушує рівновагу між позитивно і негативно зарядженими іонами в повітрі. Електростатичне поле дисплея притягає негативні іони, порушуючи тим самим загальний баланс атмосфери. Це також шкодить здоров'ю. Вже через годину роботи біля монітора спостерігається майже повне зникнення негативних іонів. Ось чому необхідно, щоб до робочого місця за комп'ютером проникав свіже повітря. У зв'язку з усіма цими небезпеками досить чітко регламентовані розміри столу і стільця для роботи з комп'ютером. Адже "закам'яніла" постава шкідливо впливає на скелетно-м'язову систему. Стіл повинен бути просторим, із спеціальною підставкою для ніг, а робочий стілець - мати відрегульовану висоту, певний кут нахилу сидіння і спинки [16].

Джерел випромінювання два. Системний блок і монітор.

1. Системний блок створює тільки електромагнітне поле (випромінювання). Правда є ще й шум від вентиляторів, але ця тема всім зрозуміла і не вимагає знань електроніки. Шкода від електромагнітного поля однозначно є при високому рівні поля. Однак поле комп'ютер створює набагато менше, ніж мобільний телефон. Тобто йому далеко до мікрохвильової печі по потужності.

2. Монітор має два основних шкідливих фактора. Бета-випромінювання (а простіше, потік електронів), яке власне кажучи і створює картинку на екрані, і висока напруга (як і в будь-якому телевізорі, воно досягає 16-20 кіловольт), що викликає іонізацію повітря.

Бета-випромінювання поширюється монітором у двох напрямках - вперед і назад. У старих телевізорах і моніторах випромінювання досягало одного або двох метрів від екрану. Тобто виходив такий собі потужний прожектор, що

стріляє в нас шквалом електронів. По дорозі вибиваючи електрони з молекул повітря, перетворюючи їх у позитивні іони, так шкідливі для людини. На даний момент монітори мають дуже низький рівень бета-випромінювання, тобто електрони вилітають за межі екрану на пару сантиметрів. Основне випромінювання монітора є направлене тому «зона поразки» поширюється на метр-півтора. Саме її і слід уникати. Висока напруга примудряється відхоплювати у молекул повітря електрони, також перетворюючи молекули на шкідливі позитивні іони. До виробників моніторів і телевізорів пред'являються все більш жорсткі вимоги щодо використання високих напруг [15].

Гранично допустима напруженість електростатичного поля на робочих місцях не повинна перевищувати рівнів, наведених у ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарно-гігієнічні норми допустимої напруженості електростатичного поля» [20].

Будь-яка поза при тривалій фіксації шкідлива для опорно-рухового апарату, веде до застою крові в органах. Це особливо проявляється при фізіологічному положенні різних частин тіла і тривало повторюваних одноманітних рухах. небезпека для здоров'я представляє не тільки втому тих груп м'язів, які ці рухи виконують, але і психологічна фіксація на них (утворення стійких вогнищ збудження ЦНС з компенсаторним гальмуванням інших її ділянок). Хоча найбільш шкідливі саме повторювані одноманітні навантаження. Під час роботи за комп'ютером людина сидить кілька годин поспіль в незручному становищі. Це не тільки загрожує втомою і загальним втомою, а й може призвести до розвитку остеохондрозу різних ділянок хребта - шийного, грудного, попереково-крижового.

У зв'язку з цим лікарі надають великого значення підтримці правильної пози під час роботи за комп'ютером. Дотримання цього правила - важливий елемент профілактики захворювань. Щоб робота за комп'ютером не шкодила здоров'ю, необхідно постійно стежити за своєю поставою. Правильна постава максимально розвантажує м'язи і дозволяє працювати довше, менше втомлюючись.

Якщо в процесі роботи ви постійно горбитесь, навантаження на хребет збільшується, що приводить до надмірного розтягування м'язів. Згорблене положення може стати причиною синдрому зап'ястного каналу, грижі міжхребцевих дисків поперекового і шийного відділів [17].

Заходи, спрямовані на зниження небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Обладнання і організація робочого місця мають забезпечувати відповідність конструкції всіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності (ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ 22.269-76, ГОСТ 21.889-76).

Конструкція робочого місця має забезпечити підтримання оптимальної робочої пози. Робочі місця слід так розташовувати відносно світлових прорізів, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва.

При розміщенні робочих столів слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ВДТ - 1,2 м; від тильної поверхні одного ВДТ до екрана іншого - 2,5 м.

Екран ВДТ має розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, що становить 600...700 мм, але не ближче ніж за 600.

Розташування екрана ВДТ має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом $+30^\circ$ до нормальної лінії погляду працюючого.

Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю, звернутого до працюючого. У конструкції клавіатури має передбачатися опорний пристрій (виготовлений із матеріалу з високим коефіцієнтом тертя, що перешкоджає мимовільному її зсуву), який дає змогу змінювати кут нахилу поверхні клавіатури у межах $5...15^\circ$.

Для забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів комп'ютерних випромінювань необхідно застосовувати приєкранні фільтри, локальні

світлофільтри (засоби індивідуального захисту очей) та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат [18].

При організації праці, пов'язаної з використанням ВДТ ЕОМ і ПЕОМ, для збереження здоров'я працюючих, запобігання професійним захворюванням і підтримки працездатності передбачаються внутрішньозмінні регламентовані перерви для відпочинку.

Внутрішньозмінні режими праці і відпочинку містять додаткові нетривалі перерви в періоди, що передують появі об'єктивних і суб'єктивних ознак стомлення і зниження працездатності.

При виконанні робіт, що належать до різних видів трудової діяльності, за основну роботу з ВДТ слід вважати таку, що займає не менше 50% робочого часу. Впродовж робочої зміни мають передбачатися:

- перерви для відпочинку і вживання їжі (обідні перерви);
- перерви для відпочинку і особистих потреб (згідно з трудовими нормами);
- додаткові перерви, що вводяться для окремих професій з урахуванням особливостей трудової діяльності [19].

Правилами встановлюються такі внутрішньозмінні режими праці та відпочинку при роботі з ЕОМ при 8-годинній денній робочій зміні в залежності від характеру праці:

- для розробників програм із застосуванням ЕОМ слід призначати регламентовану перерву для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожну годину роботи за ВДТ;
- для операторів із застосуванням ЕОМ слід призначати регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години;
- для операторів комп'ютерного набору слід призначати регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 10 хвилин після кожної години роботи за ВДТ.

У всіх випадках, коли виробничі обставини не дозволяють застосувати регламентовані перерви, тривалість безперервної роботи з ВДТ не повинна перевищувати 4 години.

При 12-годинній робочій зміні регламентовані перерви повинні встановлюватися в перші 8 годин роботи аналогічно перервам при 8-годинній робочій зміні, а протягом останніх 4-х годин роботи, незалежно від характеру трудової діяльності, через кожну годину тривалістю 15 хвилин.

Для зниження нервово-емоційного напруження, втомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно деякі перерви використовувати для виконання комплексу вправ.

При проведенні сеансів психофізіологічного розвантаження рекомендується використовувати деякі елементи методу аутогенного тренування, який ґрунтується на свідомому застосуванні комплексу взаємопов'язаних прийомів психічної саморегуляції й виконанні нескладних фізичних вправ із словесним самонавіюванням. Головна увага при цьому приділяється набуванню й закріпленню навичок м'язового розслаблення (релаксації) [13].

Безпека в надзвичайних ситуаціях

Найбільш поширеними видами надзвичайних ситуацій при експлуатації ПК є пожежа в приміщеннях та будівлях та ураження електричним струмом.

Пожежа - неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується у часі і просторі.

Значний відсоток пожеж спричинений незадовільним станом електричного устаткування та приладів, а також порушенням правил їхнього монтажу та експлуатації. До чинників, що можуть викликати пожежу саме із цієї причини, належать короткі замикання, несправності електроустановок та приладів, струмові перевантаження, що виникають у силових та освітлювальних електромережах, великі значення перехідних опорів.

Короткі замикання виникають внаслідок неправильного монтажу або експлуатації електроустановок, старіння або пошкодження ізоляції. Струм короткого замикання залежить від потужності джерела струму, відстані від джерела струму до місця замикання та виду замикання. Великі струми замикання викликають іскріння та нагрівання струмопровідних частин до високої температури, що може викликати займання ізоляції провідників та горючих будівельних конструкцій, що знаходяться поруч.

Стумові перевантаження виникають при під'єднанні до мережі додаткових споживачів струму або при зниженні напруги в мережі. Тривале перевантаження призводить до нагрівання провідників, що може викликати займання ізоляції.

Збільшення місцевих перехідних опорів виникає внаслідок окислення або недостатньо щільного з'єднання електричних контактів. Іскріння, що виникає при цьому, може ініціювати пожежу. Для запобігання пожежі від великих перехідних опорів мідні проводи та кабелі з'єднують скручуванням жил, а потім спаюють їх оловом без застосування кислоти. Алюмінієві кабелі з'єднують гільзами.

Вибір типу електроустаткування, схеми електропроводки, використуваних матеріалів, площ поперечного перерізу провідників, виду ізоляції залежить від ступеня вибухо- та пожежонебезпеки навколишнього середовища, режиму роботи електроустановок та можливих перевантажень [12].

Узагальнюючи вищевикладене, причини пожеж можна розподілити на такі групи.

Причини неелектричного характеру [13]:

- неправильне обладнання котельних печей, опалювальних приладів, відсутність іскрогасників, залишення топок без нагляду;
- несправність виробничого обладнання, порушення технологічного режиму та герметичності технологічного обладнання;
- необережне поводження з вогнем;
- неправильне обладнання і несправність вентиляційних систем;

- самозагорання або самоспалахування вугілля, торфу, нафти, промаслених ганчірок тощо.

Причини електричного характеру:

- короткі замикання, при яких струми досягають високих величин і псують електрообладнання та ізоляцію. Запобігає цьому правильний вибір перерізу струмопровідних дротів, їхньої марки і виду ізоляції, а також профілактичні огляди і ремонти. При короткому замиканні для швидкого від'єднання застосовують запобіжники і автоматичні вимикачі;
- перевантаження мереж струмом, що перевищують допустимі значення, через помилкові розрахунки, введення до мережі додаткових споживачів, тому для запобігання цьому необхідно правильно вибирати переріз провідників на стадії проектування;
- великі перехідні опори в місцях з'єднань, розгалужень кінцівок електропроводів, у контактах електричних машин, що призводить до місцевого перегрівання. Запобігає цій причині пожежі надійне з'єднання проводів (закручуванням з подальшим паянням, зварюванням, механічним пресуванням), захист контактів від окислення (нанесення антикорозійного покриття, герметизація), застосування гнучких контактів або спеціальних сталевих пружин;
- електростатичні заряди і блискавки;
- статична електрика;
- аварія оливного вимикача під час вимкнення струмів КЗ, якщо його розривна потужність менша за потужність, яку вимикаємо, що може призвести до викидання парів оливи і утворення вибухонебезпечної суміші з повітрям;
- в акумуляторних приміщеннях під час заряджання акумуляторів із електроліту виділяється кисень і водень, які змішуються з повітрям, і за недостатньої вентиляції концентрація водню може бути вищою за нижню межу вибуховості;

- роботи з відкритим вогнем під час зварювання і різання металу, коли використовуються горючі речовини (ацетон, бензол), а також з використанням природного газу.

Під пожежною безпекою розуміють такий стан промислового або цивільного об'єкта, за якого з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення і розвитку пожеж та впливу на людей небезпечних чинників пожежі, а також забезпечується захист матеріальних цінностей та довкілля.

Пожежна безпека об'єкта – доволі складне і багатоаспектне завдання, тому для його вирішення потрібно підходити комплексно. Комплекс заходів та засобів щодо пожежної безпеки складається із відповідних систем, зокрема:

- системи запобігання пожеж, що містить підсистеми запобігання утворенню горючого середовища та виникненню в горючому середовищі джерела запалювання;
- системи протипожежного захисту, що, своєю чергою, містить такі підсистеми: підсистема обмеження розвитку пожежі; підсистема забезпечення безпечної евакуації людей та майна; підсистема створення умов для успішного гасіння пожежі;
- системи організаційно-технічних заходів, що передбачає організаційні, технічні, режимні та експлуатаційні заходи.

Організаційні заходи пожежної безпеки передбачають організацію пожежної охорони на об'єкті, проведення навчань з питань пожежної безпеки (інструктажі та пожежно-технічні мінімуми), застосування наочних засобів протипожежної пропаганди та агітації, організацію ДПД та ПТК, проведення перевірок, оглядів стану пожежної безпеки приміщень, будівель, об'єкта загалом та ін.

До технічних заходів належать суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при реконструкції приміщень, будівель та об'єктів, технічному переоснащенні виробництва, експлуатації чи

можливому переобладнанні електромереж, опалення, вентиляції, освітлення тощо.

Заходи режимного характеру передбачають заборону куріння та застосування відкритого вогню у недозволених місцях, недопущення появи сторонніх осіб у вибухонебезпечних приміщеннях чи об'єктах, регламентацію пожежної безпеки при проведенні вогневих робіт тощо.

Експлуатаційні заходи передбачають своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів технологічного та допоміжного устаткування, а також інженерного господарства (електромереж, електроустановок, опалення, вентиляції).

Система запобігання пожежі – це комплекс заходів і технічних засобів, які запобігають виникненню пожежі.

Передумови виникнення пожежі (горіння). Одним із основних принципів запобігання пожежам є положення про те, що горіння (пожежа) можливе лише за певних умов. Основною умовою є наявність трьох чинників: горючої речовини, окисника та джерела запалювання (так званий трикутник Лавуазьє). Крім того, необхідно, щоб горюча речовина була нагріта до необхідної температури і знаходилась у відповідному кількісному співвідношенні з окисником, а джерело запалювання мало необхідну енергію для створення початкового імпульсу (запалювання). Так, наприклад, сірником неможливо запалити дерев'яну колоду чи стіл, тоді як аркуш паперу легко загориться. Крім того, всі три чинники повинні збігтися в одному просторі та в один момент часу [15].

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів, а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї. Протипожежний захист об'єктів здійснюється за такими чотирма напрямками [17]:

1. Обмеження розмірів та поширення пожежі:
 - розміщення будівель та споруд на території об'єкта із дотриманням протипожежних розривів та інших вимог пожежної безпеки;

- дотримання обмежень стосовно кількості поверхів будівель та площі поверху;
- правильне планування та розміщення виробничих цехів, приміщень, діляниць у межах будівель;
- розміщення пожежонебезпечних процесів та устаткування в ізольованих приміщеннях, відсіках, камерах;
- вибір будівельних конструкцій необхідних ступенів вогнестійкості;
- встановлення протипожежних перешкод у будівлях, системах вентиляції, паливних та кабельних комунікаціях;
- обмежування витікання та розтікання легкозаймистих та горючих рідин при пожежі;
- влаштування систем автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння.

2. Обмеження розвитку пожеж:

- обмеження кількості горючих речовин, що одночасно знаходяться в приміщенні;
- використання оздоблювальних будівельних та конструкційних матеріалів з нормативними показниками вибухопожежонебезпечності;
- аварійне стравлювання горючих рідин та газів;
- своєчасне звільнення приміщень від залишків горючих матеріалів;
- застосування для пожежонебезпечних речовин спеціального устаткування із посиленням захистом від пошкодження.

3. Забезпечення безпечної евакуації людей та майна:

- вибір такого об'ємно-планувального та конструктивного вирішення будівлі, щоб евакуація людей була завершена до настання гранично допустимих рівнів чинників пожеж;
- застосування будівельних конструкцій будівель та споруд відповідних ступенів вогнестійкості, щоб вони зберігали несучі та огорожувальні функції протягом всього часу евакуації;
- вибір відповідних засобів колективного та індивідуального захисту;
- застосування аварійного вимкнення устаткування та комунікацій;

- влаштування систем протидимного захисту, які запобігають задимленню шляхів евакуації;
- влаштування необхідних шляхів евакуації (коридорів, сходових кліток, зовнішніх пожежних драбин), раціональне їхнє розміщення та належне утримання.

4. Створення умов для успішного гасіння пожежі:

- встановлення у будівлях та приміщеннях установок пожежної автоматики;
- забезпечення приміщень нормованою кількістю первинних засобів пожежогасіння;
- влаштування та утримання в належному стані території підприємства, під'їздів до будівельних споруд, пожежних водойм, гідрантів.

При виявленні ознак горіння (дим, запах гару) треба вимкнути апаратуру, знайти джерело займання і вжити заходів щодо його ліквідації, повідомити керівника робіт.

У разі виникнення пожежі необхідно негайно повідомити пожежну частину за тел. 101, вжити необхідних заходів щодо евакуації людей і приступити до гасіння первинними засобами пожежогасіння.

ДОДАТОК С – Лістинг програми для отримання зображень

```
clear;

%% Створення об'єкта для керування Arduino
a = arduino('COM5');

%% Налаштування параметрів під'єднання веб-камери
adaptorName = 'winvideo';
% Унікальний ідентифікатор веб-камери
deviceId = 1;
% Формат зображення
vidFormat = 'RGB24_1280x960';

%% Створення об'єкта для керування веб-камерою
vid = videoinput(adaptorName, deviceId, vidFormat);
set(vid, 'ErrorFcn', @imaqcallback);
% Кількість фотографій за тригер
set(vid, 'FramesPerTrigger', 1);
set(vid, 'ReturnedColorSpace', 'rgb');
% Тип триггеру
triggerconfig(vid, 'manual');

%% Виходи Arduino
% Вихід для лазера
laserPin = 12;
% Вихід для керування кроком мотора
stepPin = 5;
% Вихід для керування напрямом мотора
dirPin = 6;
```

```
% Виходи для керування мікрокроком
MS1Pin = 2;
MS2Pin = 3;
MS3Pin = 4;

%% Увімкнення лазера
a.pinMode(laserPin, 'output');
a.digitalWrite(laserPin, 1);

%% Встановлення повного кроку
a.pinMode(MS1Pin, 'output');
a.pinMode(MS2Pin, 'output');
a.pinMode(MS3Pin, 'output');
a.digitalWrite(MS1Pin, 0);
a.digitalWrite(MS2Pin, 0);
a.digitalWrite(MS3Pin, 0);

%% Встановлення напрямку руху проти годинникової стрілки
a.pinMode(dirPin, 'output');
a.digitalWrite(dirPin, 0);
pause(1);

%% Встановлення режиму роботи виходу для кроку мотора
a.pinMode(stepPin, 'output');

%% Початок роботи веб-камери
start(vid);
pause(1);

%% Створення папки для збереження зображень
```

```

if ~exist('photo', 'dir')
    mkdir('photo');
end

%% Збереження першого зображення
curFrame = getsnapshot(vid);
imwrite(curFrame, 'photo\0.png', 'png');
pause(0.3);

%% Головний цикл
for i=1:200
    % Подання зростаючого імпульсу для руху мотора
    a.digitalWrite(stepPin, 0);
    pause(0.2);
    a.digitalWrite(stepPin, 1);
    pause(0.3);

    % Отримання зображення
    curFrame = getsnapshot(vid);

    % Збереження зображення
    imwrite(curFrame, ['photo\' num2str(i) '.png'], 'png');
end

%% Зупинка роботи веб-камери
stop(vid);

%% Знищення об'єкта керування Arduino
delete(a);

```

ДОДАТОК Д – Лістинг програми для обробки зображень

```
clear;

%% Завантаження результатів калібрації камери
load('3d-scan\calib.mat')

%% Обчислення кількості зображень для тріангуляції
files = dir('photo/*.png');
fileCount = size(files, 1);

%% Отримання рівняння площини лазера
% Три точки через які проходить площина
p1 = [60; 0; 0];
p2 = [60; 60; 0];
p3 = [153; -88; 142];

% Базисні вектори площини
u_p = p3 - p1;
v_p = p3 - p2;

% Нормальний вектор площини
n = cross(u_p, v_p);
n_t = n';

% Точка через яку проходить площина
q_p = p3;

%% Центр проекції камери
q_l = -Rc_ext' * Tc_ext;
```

```

%% Координати для зсуву з глобальної системи координат до
осі обертання мотору
coord_t = [-109; 0; -83];

%% Обчислення кута повороту
angleInc = 2*pi/fileCount;

%% Тимчасова змінна для спрощення обчислень
calc1 = n_t * (q_p - q_l);

%% Лічильник
p_i = 0;

%% Головний цикл
for step = 1:1:fileCount
    disp(step);

    % Читання та обробка зображення
    image_RGB = imread(['photo\' files(step).name]);
    image_red=image_RGB(:,:,1);
    image_bw = im2bw(image_red, 0.99);
    image_without_noise = bwareaopen(image_bw, 50, 8);
    % Знаходження центрів лазерної лінії у кожному рядку
    зображення
    I = zeros(size(image_without_noise));
    for i = 1:size(image_without_noise, 1)
        I(i, :) = bwmorph(image_without_noise(i, :), 'shrink',
Inf);
    end;

```

```

% Триангуляція
for i = 1:size(image_without_noise, 1)
for j = 1:size(image_without_noise, 2)
if I(i, j) == 1
% Координати пікселя
u = [j; i; 1];

% Вектор напрямку променя з центру проекції камери
v = Rc_ext^-1 * KK^-1 * u;

% Обчислення параметру lambda
lambda = calc1 / (n_t * v);

% Обчислення координат точки в глобальній системі
координат
p = q_l + lambda * v;

% Зміна системи координат точки з глобальної на локальну
з центром в осі обертання
p_moved = p + coord_t;

% Видалення обертального стола
if p_moved(2) < 15.2
continue;
end
if p_moved(1) < 0 || p_moved(3) < 0
continue;
end

```

```

% Обертання точки на кут повороту, вздовж осі обертання
мотору
coord_r = [ cos(step * angleInc) 0 sin(step * angleInc);
0 1 0;
-sin(step * angleInc) 0 cos(step * angleInc)];
p_rotated = coord_r * p_moved;

% Збереження точок
p_i = p_i + 1;
X(p_i) = p_rotated(1);
Y(p_i) = p_rotated(2);
Z(p_i) = p_rotated(3);
end
end;
end;
end;

%% Побудова графіку
scatter3(X, Y, Z);
xlabel('X'), ylabel('Y'), zlabel('Z')

%% Запис точок у файл
s = [X; Y; Z]';
save('test.asc', 's', '-ASCII');

```