

ДОДАТОК А

Код реалізації збору даних та обчислень для ESP 32

```
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <Wire.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>

const char* ssid = "Wokwi-GUEST";
const char* password = "";

String TB_TOKEN = "*****";
String TB_URL = "https://eu.thingsboard.cloud/api/v1/" + TB_TOKEN + "/telemetry";

TinyGPSPlus gps;
HardwareSerial GPS_Serial(1);

#define GPS_RX_PIN 16
#define GPS_TX_PIN 17
#define GPS_BAUD 9600

Adafruit_MPU6050 mpu;

unsigned long lastUpload = 0;
unsigned long uploadInterval = 1000;

// Калібрування
float accel_bias_x = 0, accel_bias_y = 0, accel_bias_z = 0;
float gyro_bias_z = 0;
bool isCalibrated = false;

// GPS
double initialLat = 0, initialLon = 0;
bool hasInitialGPS = false;
float local_x = 0, local_y = 0;
```

```

// Швидкість
float velocity_x = 0, velocity_y = 0;
float totalDistance = 0;
float lastPosX = 0, lastPosY = 0;

// Орієнтація
float heading = 0;

// Лічильники
int gpsUpdateCount = 0;
int imuUpdateCount = 0;
int uploadCount = 0;

unsigned long lastUpdateTime = 0;

void calibrateIMU() {
  Serial.println("Calibrating IMU...");

  const int samples = 100;
  float sum_ax = 0, sum_ay = 0, sum_az = 0, sum_gz = 0;

  for (int i = 0; i < samples; i++) {
    sensors_event_t a, g, temp;
    mpu.getEvent(&a, &g, &temp);

    sum_ax += a.acceleration.x;
    sum_ay += a.acceleration.y;
    sum_az += a.acceleration.z;
    sum_gz += g.gyro.z;

    delay(10); // швидше
  }
}

```

```

accel_bias_x = sum_ax / samples;
accel_bias_y = sum_ay / samples;
accel_bias_z = (sum_az / samples) - 9.81;
gyro_bias_z = sum_gz / samples;

isCalibrated = true;
Serial.println("Calibrated OK");
}

void gpsToLocal(double lat, double lon, float &x, float &y) {
  if (!hasInitialGPS) {
    initialLat = lat;
    initialLon = lon;
    hasInitialGPS = true;
    x = 0;
    y = 0;
    Serial.printf("Initial GPS: %.6f, %.6f\n", lat, lon);
    return;
  }

  float dlat = lat - initialLat;
  float dlon = lon - initialLon;

  y = dlat * 110540.0;
  x = dlon * 111320.0 * cos(initialLat * 0.017453293);
}

void updateVelocityAndDistance(float dt) {
  if (dt > 0 && dt < 1.0) {
    float dx = local_x - lastPosX;
    float dy = local_y - lastPosY;

    velocity_x = dx / dt;
    velocity_y = dy / dt;
  }
}

```

```

float dist = sqrt(dx*dx + dy*dy);
if (dist < 100) {
    totalDistance += dist;
}

lastPosX = local_x;
lastPosY = local_y;
}
}

void sendToThingsBoard(float lat, float lon, float accuracy, float ax, float ay, float az, float gz) {
    uploadCount++;

    HTTPClient http;
    http.begin(TB_URL);
    http.addHeader("Content-Type", "application/json");
    http.setTimeout(5000); // короткий таймаут для Wokwi

    float speed = sqrt(velocity_x * velocity_x + velocity_y * velocity_y);

    unsigned long currentTime = millis();
    float dt = (currentTime - lastUpdateTime) / 1000.0;
    if (dt > 0 && dt < 1.0) {
        heading += gz * dt * 57.2958;
        while (heading > 360) heading -= 360;
        while (heading < 0) heading += 360;
    }
    lastUpdateTime = currentTime;

    // JSON
    String json = "{}";
    json += "\"gps_lat\": " + String(lat, 8) + ",";
    json += "\"gps_lon\": " + String(lon, 8) + ",";

```

```

json += "\"gps_accuracy\":" + String(accuracy, 2) + ",";
json += "\"local_x\":" + String(local_x, 4) + ",";
json += "\"local_y\":" + String(local_y, 4) + ",";
json += "\"velocity_x\":" + String(velocity_x, 4) + ",";
json += "\"velocity_y\":" + String(velocity_y, 4) + ",";
json += "\"speed\":" + String(speed, 4) + ",";
json += "\"heading\":" + String(heading, 2) + ",";
json += "\"angular_velocity\":" + String(gz * 57.2958, 4) + ",";
json += "\"accel_x\":" + String(ax, 4) + ",";
json += "\"accel_y\":" + String(ay, 4) + ",";
json += "\"accel_z\":" + String(az, 4) + ",";
json += "\"gyro_z\":" + String(gz, 4) + ",";
json += "\"distance_total\":" + String(totalDistance, 2) + ",";
json += "\"gps_updates\":" + String(gpsUpdateCount) + ",";
json += "\"imu_updates\":" + String(imuUpdateCount) + ",";
json += "\"timestamp\":" + String(millis());
json += "}";

```

```
// Мінімальний вивід
```

```
Serial.printf("Upload #%d: GPS(%.6f,%.6f) Speed=%.2f Dist=%.1fm\n",
            uploadCount, lat, lon, speed, totalDistance);
```

```
int httpCode = http.POST(json);
```

```
if (httpCode == 200) {
    Serial.println(" -> OK");
} else {
    Serial.printf(" -> FAIL %d\n", httpCode);
}

```

```
http.end();
```

```
}
```

```
void setup() {
```

```
Serial.begin(115200);
delay(500);

Serial.println("\n=== ESP32 Sensor Fusion ===");

// I2C
Wire.begin(21, 22);

// WiFi
Serial.print("WiFi...");
WiFi.begin(ssid, password);

int attempts = 0;
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && attempts < 20) {
  delay(500);
  Serial.print(".");
  attempts++;
}

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
  Serial.println(" OK");
} else {
  Serial.println(" FAIL");
}

// MPU
Serial.print("MPU6050...");
if (!mpu.begin()) {
  Serial.println(" FAIL");
  while (1) delay(1000);
}
Serial.println(" OK");

mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_4_G);
```

```

mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_21_HZ);

delay(1000);
calibrateIMU();

// GPS
Serial.println("GPS init...");
GPS_Serial.begin(GPS_BAUD, SERIAL_8N1, GPS_RX_PIN, GPS_TX_PIN);
Serial.println("Waiting for GPS fix...");

Serial.println("==== READY ====\\n");

lastUpdateTime = millis();
}

void loop() {
  // GPS
  while (GPS_Serial.available()) {
    gps.encode(GPS_Serial.read());
  }

  // MPU
  sensors_event_t a, g, t;
  mpu.getEvent(&a, &g, &t);

  float ax = a.acceleration.x - accel_bias_x;
  float ay = a.acceleration.y - accel_bias_y;
  float az = a.acceleration.z - accel_bias_z;
  float gz = g.gyro.z - gyro_bias_z;

  imuUpdateCount++;

  // GPS Update

```

```
if (gps.location.isUpdated()) {
  float lat = gps.location.lat();
  float lon = gps.location.lng();
  float accuracy = gps.hdop.hdop() * 5.0;

  gpsToLocal(lat, lon, local_x, local_y);

  unsigned long currentTime = millis();
  float dt = (currentTime - lastUpdateTime) / 1000.0;
  updateVelocityAndDistance(dt);

  gpsUpdateCount++;

  // UPLOAD
  if (millis() - lastUpload >= uploadInterval) {
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED && isCalibrated) {
      sendToThingsBoard(lat, lon, accuracy, ax, ay, az, gz);
      lastUpload = millis();
    }
  }
}

delay(50);
}
```

ДОДАТОК Б
Розмітка веб-додатку

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>Sensor Fusion Tracker - Enhanced</title>
  <script src="https://cdn.tailwindcss.com"></script>
  <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js@4.4.0/dist/chart.umd.min.js"></script>

  <!-- Leaflet CSS -->
  <link rel="stylesheet" href="https://unpkg.com/leaflet@1.9.4/dist/leaflet.css" />
  <script src="https://unpkg.com/leaflet@1.9.4/dist/leaflet.js"></script>

  <style>
    #osmMap {
      height: 500px;
      border-radius: 0.5rem;
    }
    .leaflet-control-attribution {
      font-size: 10px;
    }

    /* Мобільна адаптація */
    @media (max-width: 768px) {
      body {
        font-size: 14px;
      }

      h1 {
        font-size: 1.5rem !important;
      }

      h2 {
        font-size: 1.2rem !important;
      }
    }
  </style>
</head>
<body>
  <div class="flex flex-col items-center justify-center min-h-screen">
    <h1>Sensor Fusion Tracker - Enhanced</h1>
    <h2>Sensor Fusion Tracker - Enhanced</h2>
  </div>
</body>
</html>
```

```
}

#osmMap {
  height: 300px;
}

.grid {
  grid-template-columns: 1fr !important;
}

.flex {
  flex-direction: column;
}

button {
  width: 100%;
  margin-bottom: 0.5rem;
}

.space-y-1 > * {
  margin-top: 0.5rem;
}
}

/* SVG карта з можливістю зуму */
#mapContainer {
  position: relative;
  background: #0f172a;
  border-radius: 0.5rem;
}

#mapSvg {
  cursor: move;
  user-select: none;
}
```

```
}  
  
.zoom-controls {  
  position: absolute;  
  top: 10px;  
  right: 10px;  
  display: flex;  
  flex-direction: column;  
  gap: 5px;  
  z-index: 10;  
}  
  
.zoom-btn {  
  width: 40px;  
  height: 40px;  
  background: rgba(30, 41, 59, 0.9);  
  border: 2px solid #475569;  
  border-radius: 0.5rem;  
  color: white;  
  font-size: 20px;  
  font-weight: bold;  
  cursor: pointer;  
  display: flex;  
  align-items: center;  
  justify-content: center;  
  transition: all 0.2s;  
}  
  
.zoom-btn:hover {  
  background: rgba(51, 65, 85, 0.9);  
  border-color: #64748b;  
}  
  
.zoom-btn:active {
```

```
    transform: scale(0.95);
}

.zoom-info {
    position: absolute;
    bottom: 10px;
    right: 10px;
    background: rgba(30, 41, 59, 0.9);
    padding: 8px 12px;
    border-radius: 0.5rem;
    font-size: 12px;
    color: #94a3b8;
    z-index: 10;
}

.tab-button {
    padding: 0.75rem 1.5rem;
    border-radius: 0.5rem;
    font-weight: 600;
    transition: all 0.2s;
    cursor: pointer;
}

.tab-button.active {
    background: #3b82f6;
    color: white;
}

.tab-button:not(.active) {
    background: #334155;
    color: #94a3b8;
}

.tab-button:not(.active):hover {
```

```
        background: #475569;
    }

    .tab-content {
        display: none;
    }

    .tab-content.active {
        display: block;
    }

    .file-upload-area {
        border: 2px dashed #475569;
        border-radius: 0.5rem;
        padding: 2rem;
        text-align: center;
        cursor: pointer;
        transition: all 0.2s;
    }

    .file-upload-area:hover {
        border-color: #3b82f6;
        background: rgba(59, 130, 246, 0.05);
    }

    .file-upload-area.drag-over {
        border-color: #3b82f6;
        background: rgba(59, 130, 246, 0.1);
    }
</style>
</head>
<body class="bg-slate-900 text-white min-h-screen">
    <div class="max-w-7xl mx-auto p-4">
        <!-- Header -->
```

```

<div class="mb-6">
  <h1 class="text-3xl font-bold mb-4">&img alt="Sensor Fusion Tracker icon" data-bbox="548 112 572 132"/> Sensor Fusion Tracker - Enhanced</h1>

  <!-- Mode Tabs -->
  <div class="flex gap-2 mb-4">
    <button class="tab-button active" data-tab="live">
      &img alt="Live Tracking icon" data-bbox="282 242 306 262"/> Live Tracking
    </button>
    <button class="tab-button" data-tab="csv">
      &img alt="CSV Analysis icon" data-bbox="282 318 306 338"/> CSV Analysis
    </button>
  </div>

  <!-- Live Tracking Tab -->
  <div id="live-tab" class="tab-content active">
    <div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4 mb-4">
      <!-- Sync Mode Selector -->
      <div class="mb-4 bg-slate-700 rounded-lg p-3">
        <label class="block text-sm font-semibold mb-2">&img alt="Gear icon" data-bbox="718 542 742 562"/> Режим синхронізації
        сенсорів:</label>
        <select id="syncMode" class="w-full bg-slate-800 text-white border border-
        slate-600 rounded px-3 py-2">
          <option value="async">Асинхронний (IMU 50Hz, GPS ~1Hz)</option>
          <option value="gps-sync" selected>GPS-синхронізований (все на 1Hz)
          &img alt="Star icon" data-bbox="122 692 146 712"/</option>
          <option value="imu-sync">IMU-синхронізований (все на 10Hz)</option>
        </select>
        <div class="text-xs text-slate-400 mt-2" id="syncModeInfo">
          Всі сенсори синхронізовані з GPS (~1Hz). Найкраще для навчання та
          розуміння ЕКФ.
        </div>
      </div>
    </div>
  </div>

```

```


<div class="flex gap-3 mb-4 flex-wrap">
  <button id="calibrateBtn" class="flex-1 min-w-[150px] py-3 px-6 bg-orange-600 hover:bg-orange-700 rounded-lg font-semibold">
    ⚙ Калибрування
  </button>
  <button id="startBtn" class="flex-1 min-w-[150px] py-3 px-6 bg-green-600 hover:bg-green-700 rounded-lg font-semibold">
    ▶ Почати
  </button>
  <button id="stopBtn" class="py-3 px-6 bg-red-600 hover:bg-red-700 rounded-lg font-semibold" disabled>
    ■ Зупинити
  </button>
  <button id="resetBtn" class="py-3 px-6 bg-slate-700 hover:bg-slate-600 rounded-lg font-semibold">
    ↺ Скинути
  </button>
</div>

<!-- Export options -->
<div class="bg-slate-700 rounded-lg p-3 mb-4">
  <label class="text-sm text-slate-300 block mb-2">📊 Частота експорту
  CSV:</label>
  <div class="flex gap-2 flex-wrap">
    <label class="flex items-center gap-2 cursor-pointer">
      <input type="radio" name="exportFreq" value="original" checked
      class="w-4 h-4">
      <span class="text-sm">Оригінал (~50 Hz)</span>
    </label>
    <label class="flex items-center gap-2 cursor-pointer">
      <input type="radio" name="exportFreq" value="1" class="w-4 h-4">
      <span class="text-sm">1 Hz (GPS)</span>
    </label>
  </div>

```

```

<label class="flex items-center gap-2 cursor-pointer">
  <input type="radio" name="exportFreq" value="5" class="w-4 h-4">
  <span class="text-sm">5 Hz</span>
</label>
<label class="flex items-center gap-2 cursor-pointer">
  <input type="radio" name="exportFreq" value="10" class="w-4 h-4">
  <span class="text-sm">10 Hz</span>
</label>
</div>
</div>

<div class="flex gap-3 mb-4">
  <button id="exportBtn" class="flex-1 py-3 px-6 bg-blue-600 hover:bg-blue-
700 rounded-lg font-semibold">
     Експорт CSV
  </button>
</div>

<!-- Status -->
<div class="grid grid-cols-2 md:grid-cols-4 gap-4 text-sm">
  <div class="bg-slate-700 rounded p-3">
    <div class="text-slate-400 mb-1">Позиція</div>
    <div class="font-mono" id="posX">X: 0.00м</div>
    <div class="font-mono" id="posY">Y: 0.00м</div>
  </div>
  <div class="bg-slate-700 rounded p-3">
    <div class="text-slate-400 mb-1">Швидкість</div>
    <div class="font-mono" id="velX">Vx: 0.00</div>
    <div class="font-mono" id="velY">Vy: 0.00</div>
  </div>
  <div class="bg-slate-700 rounded p-3">
    <div class="text-slate-400 mb-1">Орієнтація</div>
    <div class="font-mono text-xl" id="heading">0.0°</div>
  </div>
</div>

```

```

</div>
<div class="bg-slate-700 rounded p-3">
  <div class="text-slate-400 mb-1">Метрики</div>
  <div class="font-mono text-xs" id="rmse">RMSE: 0.00м</div>
  <div class="font-mono text-xs" id="gpsCount">GPS: 0</div>
</div>
</div>
</div>
</div>

<!-- CSV Analysis Tab -->
<div id="csv-tab" class="tab-content">
  <div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4 mb-4">
    <h2 class="text-xl font-semibold mb-4">📁 Завантаження CSV файлу</h2>

    <div class="file-upload-area mb-4" id="fileUploadArea">
      <input type="file" id="csvFileInput" accept=".csv" class="hidden">
      <div class="text-4xl mb-2">📁 </div>
      <div class="text-lg font-semibold mb-2">Перетягніть CSV файл сюди</div>
      <div class="text-sm text-slate-400 mb-4">або натисніть щоб вибрати
файл</div>

      <button class="py-2 px-6 bg-blue-600 hover:bg-blue-700 rounded-lg font-
semibold">

        Вибрати файл
      </button>
    </div>

    <div id="csvInfo" class="bg-slate-700 rounded-lg p-4 hidden">
      <h3 class="font-semibold mb-2">📊 Інформація про файл:</h3>
      <div class="text-sm space-y-1">
        <div>Файл: <span id="fileName" class="font-mono text-blue-
400"></span></div>

```

```

        <div>Записів: <span id="recordCount" class="font-mono text-green-
400"></span></div>
        <div>Тривалість: <span id="duration" class="font-mono text-yellow-
400"></span></div>
        <div>Частота: <span id="frequency" class="font-mono text-purple-
400"></span></div>
        <div>Середня RMSE: <span id="avgRmse" class="font-mono text-red-
400"></span></div>
    </div>

    <div class="mt-4 flex gap-2">
        <button id="clearCsvBtn" class="py-2 px-4 bg-red-600 hover:bg-red-700
rounded-lg text-sm">
             Очистити
        </button>
    </div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>

<!-- OpenStreetMap -->
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4 mb-6 shadow-lg">
    <div class="flex justify-between items-center mb-4">
        <h2 class="text-xl font-semibold"> OpenStreetMap - Реальна карта</h2>
        <div class="flex gap-2">
            <button id="centerMapBtn" class="py-2 px-4 bg-blue-600 hover:bg-blue-700
rounded-lg text-sm">
                 Центрувати
            </button>
            <button id="toggleLayerBtn" class="py-2 px-4 bg-purple-600 hover:bg-purple-
700 rounded-lg text-sm">
                 Супутник
        </div>
    </div>

```

```

        </button>
    </div>
</div>
<div id="osmMap"></div>
<div class="text-xs text-slate-400 mt-2">
    Синя лінія - GPS | Червона лінія - ЕКФ | Червоний маркер - поточна позиція
</div>
</div>

<!-- Схематична карта -->
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4 mb-6 shadow-lg">
    <h2 class="text-xl font-semibold mb-4">🚧 Схематична траєкторія (вид
зверху)</h2>
    <div id="mapContainer" style="height: 400px; position: relative;">
        <div class="zoom-controls">
            <button class="zoom-btn" id="zoomInBtn" title="Збільшити">+</button>
            <button class="zoom-btn" id="zoomOutBtn" title="Зменшити">-</button>
            <button class="zoom-btn" id="zoomResetBtn" title="Скинути" style="font-size:
16px;">⊙</button>
        </div>

        <div class="zoom-info" id="zoomInfo">
            Масштаб: 100%
        </div>

        <svg id="mapSvg" class="w-full h-full viewBox="-50 -50 100 100">
            <defs>
                <pattern id="grid" width="10" height="10" patternUnits="userSpaceOnUse">
                    <path d="M 10 0 L 0 0 0 10" fill="none" stroke="#334155" stroke-
width="0.3"/>
                </pattern>
            </defs>
            <rect x="-50" y="-50" width="100" height="100" fill="url(#grid)" />

```

```

<line x1="-50" y1="0" x2="50" y2="0" stroke="#475569" stroke-width="0.5"/>
<line x1="0" y1="-50" x2="0" y2="50" stroke="#475569" stroke-width="0.5"/>

<polyline id="gpsPath" fill="none" stroke="#2196F3" stroke-width="0.5"/>
<polyline id="ekfPath" fill="none" stroke="#F44336" stroke-width="0.5" stroke-
dasharray="1,1"/>

<!-- Stop markers will be added here dynamically -->
<g id="stopMarkers"></g>


<g id="robot">
  <circle r="1.5" fill="#ef4444" />
  <line id="robotDirection" x1="0" y1="0" x2="3" y2="0" stroke="#ef4444"
stroke-width="0.8"/>
</g>
</svg>
</div>
<div class="text-xs text-slate-400 mt-2">
  Використовуйте кнопки + / - для зуму | Перетягуйте карту мишкою | Зелені
маркери - зупинки
</div>
</div>

<!-- Main Charts -->
<div class="grid grid-cols-1 lg:grid-cols-2 gap-6 mb-6">
  <!-- RMSE Chart -->
  <div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4">
    <h2 class="text-xl font-semibold mb-4"><img alt="RMSE Chart icon" data-bbox="595 752 618 768" style="vertical-align: middle;"/> Помилка ЕКФ (RMSE)</h2>
    <div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
      <canvas id="rmseChart"></canvas>
    </div>
  </div>
</div>

```

```
<!-- Uncertainty Chart -->
```

```
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4">
```

```
<h2 class="text-xl font-semibold mb-4"> Невизначеність (Р матриця)</h2>
```

```
<div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
```

```
<canvas id="uncertaintyChart"></canvas>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
<!-- Velocity Chart -->
```

```
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4">
```

```
<h2 class="text-xl font-semibold mb-4"> Швидкість</h2>
```

```
<div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
```


```
<canvas id="velocityChart"></canvas>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
<!-- Distance Chart -->
```

```
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4">
```

```
<h2 class="text-xl font-semibold mb-4"> Накопичена відстань</h2>
```

```
<div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
```

```
<canvas id="distanceChart"></canvas>
```


```
</div>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
<!-- Advanced Analysis Charts -->
```

```
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4 mb-6">
```

```
<h2 class="text-2xl font-semibold mb-4"> Розширений аналіз</h2>
```

```
<div class="grid grid-cols-1 lg:grid-cols-2 gap-6">
```

```
<!-- Sensor Noise Histograms -->
```

```
<div class="bg-slate-700 rounded-lg p-4">
```

X</h3>

```

    <h3 class="text-lg font-semibold mb-3"><img alt="Bar chart icon" data-bbox="635 88 658 105"/> Розподіл шуму акселерометра
  </div>
  <div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
    <canvas id="accelXHistChart"></canvas>
  </div>
</div>

```

Y</h3>

```

  <div class="bg-slate-700 rounded-lg p-4">
    <h3 class="text-lg font-semibold mb-3"><img alt="Bar chart icon" data-bbox="635 288 658 305"/> Розподіл шуму акселерометра
  </div>
  <div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
    <canvas id="accelYHistChart"></canvas>
  </div>
</div>

```

```

  <div class="bg-slate-700 rounded-lg p-4">
    <h3 class="text-lg font-semibold mb-3"><img alt="Bar chart icon" data-bbox="615 488 638 505"/> Розподіл шуму гіроскопа Z</h3>
    <div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
      <canvas id="gyroZHistChart"></canvas>
    </div>
  </div>
</div>

```

```

<!-- Sensor Time Series -->
  <div class="bg-slate-700 rounded-lg p-4">
    <h3 class="text-lg font-semibold mb-3"><img alt="Line chart icon" data-bbox="615 688 638 705"/> Дані сенсорів в часі</h3>
    <div class="bg-slate-900 rounded-lg p-2" style="height: 250px;">
      <canvas id="sensorTimeChart"></canvas>
    </div>
  </div>
</div>

```

```

<!-- Stops Analysis -->
  <div class="bg-slate-700 rounded-lg p-4">
    <h3 class="text-lg font-semibold mb-3"><img alt="List icon" data-bbox="615 888 638 905"/> Виявлені зупинки</h3>
  </div>
</div>

```

```

<div id="stopsInfo" class="text-sm text-slate-300">
  <div class="text-slate-400">Поки немає даних для аналізу зупинок</div>
</div>
</div>
</div>
</div>

```

```

<!-- Sensor Data -->

```

```

<div class="grid grid-cols-1 md:grid-cols-2 gap-6 mb-6">
  <div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4">
    <h2 class="text-xl font-semibold mb-4"><img alt="IMU icon" data-bbox="595 335 618 350"/> IMU Дані</h2>
    <div class="space-y-2 text-sm">
      <div class="flex justify-between">
        <span>Accel X:</span>
        <span class="font-mono" id="accelX">0.00 м/с²</span>
      </div>
      <div class="flex justify-between">
        <span>Accel Y:</span>
        <span class="font-mono" id="accelY">0.00 м/с²</span>
      </div>
      <div class="flex justify-between">
        <span>Accel Z:</span>
        <span class="font-mono" id="accelZ">0.00 м/с²</span>
      </div>
      <div class="flex justify-between">
        <span>Gyro Z:</span>
        <span class="font-mono" id="gyroZ">0.00 °/с</span>
      </div>
      <div class="flex justify-between">
        <span>IMU Updates:</span>
        <span class="font-mono" id="imuUpdates">0</span>
      </div>
    </div>
  </div>
</div>

```

```
</div>
```

```
<div class="bg-slate-800 rounded-lg p-4">
```

```
<h2 class="text-xl font-semibold mb-4">📶 GPS Дані</h2>
```

```
<div class="space-y-2 text-sm">
```

```
<div class="flex justify-between">
```

```
<span>Широта:</span>
```

```
<span class="font-mono" id="gpsLat">--</span>
```

```
</div>
```

```
<div class="flex justify-between">
```

```
<span>Довгота:</span>
```

```
<span class="font-mono" id="gpsLon">--</span>
```

```
</div>
```

```
<div class="flex justify-between">
```

```
<span>Точність:</span>
```

```
<span class="font-mono" id="gpsAcc">--</span>
```

```
</div>
```

```
<div class="flex justify-between">
```

```
<span>GPS Corrections:</span>
```

```
<span class="font-mono" id="gpsCorrections">0</span>
```

```
</div>
```

```
<div class="flex justify-between">
```

```
<span>Калібровано:</span>
```

```
<span class="font-mono" id="calibStatus">❌</span>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
<!-- Instructions -->
```

```
<div class="bg-blue-900/30 border border-blue-500/30 rounded-lg p-4 mb-4">
```

```
<h3 class="font-semibold mb-2">📖 Інструкції:</h3>
```

```
<ul class="text-sm space-y-1 text-slate-300">
```

Live Tracking: Використовуйте для реального відстеження з датчиками

CSV Analysis: Завантажте CSV файл для детального аналізу даних

• Нові графіки: теплова карта, гістограми шуму, виявлення зупинок

• Перетягніть CSV файл або натисніть "Вибрати файл"

• Всі графіки автоматично оновляться після завантаження

</div>

</div>

<script src="app.js"></script>

</body>

</html>

ДОДАТОК В
Апробація наукових результатів

Міністерство освіти і науки України



NURE

Харківський національний університет
радіоелектроніки

ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2025

(Випуск 2)

[електронне видання]



<http://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>



<http://itez.zntu.edu.ua/>



<http://kafea.kdu.edu.ua>

Харків 2025

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(КІТАР)



ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2025

(Випуск 2)

[електронне видання]

Харків 2025

- Головий редактор** **Невлюдов Ігор Шакирович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.
- Редакційна колегія:** **Филипенко Олександр Іванович**, доктор технічних наук, професор, декан факультету Автоматики та комп'ютеризованих технологій, Харківського національного університету радіоелектроніки.
Цимбал Олександр Михайлович, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.
Андрусевич Анатолій Олександрович, доктор технічних наук, професор, начальник Криворізького коледжу національного авіаційного університету
Косенко Віктор Васильович, доктор технічних наук, професор, зам. директора Державного підприємства «Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості».
Замірець Микола Васильович, доктор технічних наук, професор, директор Державного підприємства Науково-дослідного технологічного інституту приладобудування.
Свищ Володимир Митрофанович, доктор технічних наук, професор, радник директора Державне науково-виробниче підприємство «Об'єднання Комунар».
Фомовська Олена Владиславівна, кандидат технічних наук, доцент завідувач кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.
Кухаренко Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електронних апаратів» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського
Демська Наталія Павлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.
Фурманова Наталія Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, декан факультета Радіоелектроніки і телекомунікацій, Національного університету «Запорізька політехніка».
- Відповідальний редактор:** **Євсєєв Владислав В'ячеславович**, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківського національного університету радіоелектроніки.

УДК 519.6

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ БЕЗПЛОТНОГО НАЗЕМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА НА КАРТІ МІСЦЕВОСТІ

О. Шевченко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14

Email: oleksandr.shevchenko2@nure.ua

Анотація: Робота присвячена аналізу сучасних методів визначення положення безпілотних наземних мобільних роботів на карті місцевості. Розглянуто основні підходи до локалізації: одометрія, GPS/GNSS-навігація, системи технічного зору, лазерне сканування та методи SLAM. Проаналізовано переваги та недоліки кожного методу, а також можливості їх комбінування для підвищення точності позиціонування. Як напрямок для подальших досліджень запропоновано розробку гібридної системи локалізації з використанням сенсорного злиття даних.

Ключові слова: безпілотний наземний мобільний робот, локалізація, навігація, одометрія, GPS, SLAM, комп'ютерний зір, лазерне сканування, сенсорне злиття.

ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE POSITION OF AN UNMANNED GROUND MOBILE ROBOT ON A LOCAL MAP

O. Shevchenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, pr. Nauky, 14

Email: oleksandr.shevchenko2@nure.ua

Abstract: The paper is devoted to the analysis of modern methods for determining the position of unmanned ground mobile robots on a terrain map. The main approaches to localization are considered: odometry, GPS/GNSS navigation, computer vision systems, laser scanning and SLAM methods. The advantages and disadvantages of each method are analyzed, as well as the possibilities of their combination to improve positioning accuracy. As a direction for further research, the development of a hybrid localization system using sensor fusion is proposed.

Keywords: unmanned ground mobile robot, localization, navigation, odometry, GPS, SLAM, computer vision, laser scanning, sensor fusion.

У сучасних умовах розвитку робототехніки та автономних систем безпілотні наземні мобільні роботи (БНМР) знаходять все ширше застосування у різних галузях: від військових операцій та логістики до сільського господарства та дослідження небезпечних територій. Одним з ключових завдань, які необхідно вирішити для забезпечення ефективної роботи БНМР, є точне визначення їх положення на карті місцевості.

Локалізація робота – це процес визначення його позиції та орієнтації в просторі відносно заздалегідь визначеної системи координат або карти. Від точності локалізації залежить можливість планування траєкторії руху, уникнення перешкод, виконання поставлених завдань та безпечне функціонування робота в цілому.

Традиційні методи локалізації, такі як використання GPS або простої одометрії, часто не забезпечують потрібної точності у складних умовах: у приміщеннях, у густій забудові, під кронами дерев або у гірській місцевості. Це призводить до помилок у визначенні положення, що може спричинити збої у роботі системи навігації та виконанні завдань.

Сучасні методи локалізації використовують комбінацію різних сенсорів і алгоритмів обробки даних для досягнення високої точності у різноманітних умовах експлуатації. Автоматизація процесів визначення положення робота дає змогу значно підвищити надійність і ефективність функціонування автономних систем.

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ. Одометрія – це метод визначення положення робота на основі вимірювання параметрів його руху, таких як кількість обертів

коліс, швидкість переміщення та напрямок руху [1]. Даний метод базується на інтегруванні інформації про переміщення робота з плином часу для обчислення його поточних координат відносно початкової точки.

Основна перевага одометрії полягає у її простоті реалізації та невисокій вартості обладнання. Енкодери, які встановлюються на колеса або двигуни робота, надають інформацію про пройдену відстань, що дає змогу обчислювати координати без залежності від зовнішніх систем навігації.

Однак одометрія має суттєвий недолік – накопичення помилок з часом [2]. Ці помилки виникають через проковзування коліс, нерівності поверхні, знос механічних частин та інші чинники. Чим довше робот рухається, тим більшою стає похибка у визначенні його положення, що може призвести до значних відхилень від реальної траєкторії.

Для зменшення накопичених помилок одометрію часто комбінують з іншими методами локалізації або використовують додаткові сенсори, такі як гіроскопи та акселерометри, які дають змогу точніше відстежувати рух робота [3].

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), такі як GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou, широко використовуються для визначення положення об'єктів на відкритій місцевості [2]. Ці системи дають змогу отримати координати робота з точністю від декількох метрів до декількох сантиметрів при використанні диференціальних методів корекції.

Основна перевага GPS/GNSS-навігації полягає у здатності визначати абсолютні координати робота у глобальній системі координат, що робить цей метод особливо корисним для навігації на великих відстанях у відкритих просторах.

Проте GPS/GNSS має суттєві обмеження у приміщеннях, під кронами дерев, у міській забудові з високими будівлями та у важкодоступних місцях, де сигнал від супутників може бути ослабленим або повністю відсутнім [2]. Крім того, точність стандартного GPS може бути недостатньою для деяких завдань, що вимагають сантиметрової точності позиціонування.

Для підвищення точності використовуються системи RTK (Real-Time Kinematic) та PPP (Precise Point Positioning), які забезпечують сантиметрову точність завдяки використанню базових станцій або додаткових корекційних даних. Однак такі системи потребують додаткового обладнання та інфраструктури.

Комп'ютерний зір дає змогу роботу сприймати навколишнє середовище за допомогою камер і аналізувати отримані зображення для визначення свого положення [5]. Системи технічного зору можуть використовувати різні підходи: розпізнавання характерних об'єктів на місцевості, аналіз текстур, виявлення орієнтирів або порівняння поточного зображення з базою даних відомих зображень.

Використання камер дає можливість отримувати багату інформацію про навколишнє середовище, включаючи кольори, форми об'єктів та їх розташування. Сучасні алгоритми комп'ютерного зору, зокрема нейронні мережі, дозволяють ефективно обробляти візуальну інформацію та визначати положення робота з високою точністю [6].

Однак системи технічного зору чутливі до умов освітлення, погодних умов та змін у навколишньому середовищі. Наприклад, при поганій видимості, в умовах туману або дощу якість розпізнавання може значно погіршуватися. Крім того, обробка зображень потребує значних обчислювальних ресурсів, особливо при використанні складних алгоритмів машинного навчання.

Стереокамери та системи глибокого зору дозволяють створювати тривимірні моделі навколишнього середовища, що підвищує точність локалізації та дає змогу краще планувати траєкторію руху [5].

Лазерні сканери (LiDAR – Light Detection and Ranging) використовують лазерні промені для вимірювання відстаней до об'єктів навколишнього середовища [4]. LiDAR створює тривимірну карту оточення з високою точністю, що дає змогу роботу точно визначати своє положення відносно навколишніх об'єктів.

Основна перевага LiDAR полягає у високій точності вимірювань та можливості працювати у різних умовах освітлення, включаючи повну темряву. Лазерні сканери можуть вимірювати відстані до об'єктів на значній відстані з міліметровою точністю, що робить їх надзвичайно корисними для навігації у складному середовищі.

LiDAR може бути використаний як для 2D, так і для 3D сканування [4]. 2D LiDAR сканує навколишнє середовище у одній площині, що достатньо для багатьох завдань наземної навігації, тоді

як 3D LiDAR створює повну тривимірну модель оточення, що дає змогу виявляти перешкоди на різних висотах.

До недоліків LiDAR можна віднести високу вартість обладнання, особливо для 3D сканерів, а також чутливість до погодних умов, таких як сильний дощ, туман або сніг, які можуть погіршувати якість вимірювань.

SLAM – це метод, який дозволяє роботу одночасно будувати карту навколишнього середовища та визначати своє положення на цій карті [4]. Цей підхід є особливо корисним у невідомому середовищі, де попередньо створена карта відсутня.

SLAM використовує дані з різних сенсорів – камер, лазерних сканерів, інерціальних датчиків, для створення карти та відстеження положення робота. Існують різні реалізації SLAM: візуальний SLAM (v-SLAM), який використовує камери; лазерний SLAM (LiDAR-SLAM), що базується на даних лазерного сканування; та гібридні варіанти, які комбінують різні типи сенсорів.

Основна перевага SLAM полягає у можливості автономної роботи робота без необхідності у попередньо створеній карті місцевості. Робот може досліджувати нові території, будуючи карту в реальному часі та використовуючи її для навігації.

Однак SLAM є обчислювально складним методом, що потребує значних обчислювальних ресурсів для обробки даних сенсорів та оновлення карти [4]. Крім того, точність SLAM може погіршуватися у динамічному середовищі, де об'єкти постійно переміщуються, або у місцях з низькою кількістю характерних орієнтирів.

Сучасні реалізації SLAM, такі як ORB-SLAM, Cartographer або LOAM, використовують оптимізовані алгоритми, які дозволяють працювати в реальному часі навіть на обмежених обчислювальних ресурсах.

Для досягнення максимальної точності та надійності визначення положення БНМР часто використовують гібридні методи (sensor fusion), які комбінують дані з різних сенсорів [3]. Такий підхід називається сенсорним злиттям (sensor fusion) і дозволяє компенсувати недоліки окремих методів.

Наприклад, комбінування одометрії з GPS дає змогу зменшити накопичені похибки одометрії за рахунок періодичної корекції координат від супутникової системи. У свою чергу, одометрія забезпечує безперервне відстеження положення робота у місцях, де сигнал GPS недоступний.

Інтеграція даних від інерціальних датчиків (IMU – Inertial Measurement Unit) з візуальними системами або LiDAR підвищує точність визначення орієнтації робота та дозволяє компенсувати динамічні похибки, що виникають при різких поворотах або рухах по нерівній поверхні [3].

Використання фільтрів Калмана або частинкових фільтрів (particle filters) дає змогу ефективно об'єднувати дані з різних джерел, враховуючи невизначеність та шуми вимірювань. Ці алгоритми дозволяють отримати оптимальну оцінку положення робота на основі всієї доступної інформації.

Гібридні системи також можуть адаптуватися до умов навколишнього середовища, автоматично вибираючи найбільш надійні джерела даних у кожний момент часу [3]. Наприклад, у відкритих просторах система може покладатися переважно на GPS, тоді як у приміщеннях автоматично перемикається на візуальну локалізацію або SLAM.

Алгоритм роботи системи локалізації на основі sensor fusion складається з паралельної обробки даних з GPS та IMU з наступним їх об'єднанням через комплементарний фільтр.

Комплементарний фільтр об'єднує дані з GPS та IMU шляхом зваженого усереднення, де GPS забезпечує довгострокову стабільність (низькі частоти), а IMU – високочастотну динаміку руху.

У разі тимчасової втрати GPS система продовжує визначати положення на основі IMU з прийнятною точністю. При відновленні GPS відбувається автоматична корекція позиції.

Час затримки передачі даних залежить від швидкості бездротового з'єднання та завантаженості хмарного сервісу. У типових умовах система забезпечує моніторинг у режимі реального часу.

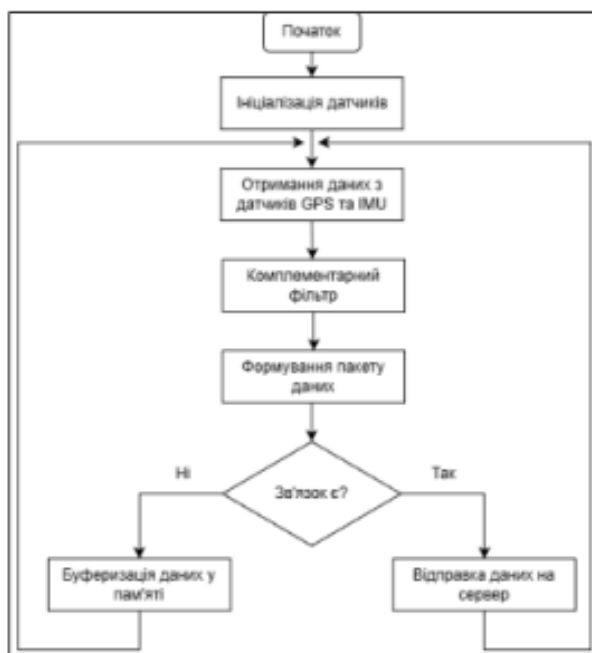


Рисунок 1 – Алгоритм роботи системи локалізації на основі sensor fusion

ВИСНОВКИ. Визначення положення безпілотного наземного мобільного робота на карті місцевості є критично важливим завданням для забезпечення його автономної роботи. Кожен з розглянутих методів локалізації має свої переваги та обмеження: одометрія проста у реалізації, але накопичує помилки; GPS забезпечує глобальне позиціонування, але неефективна у приміщеннях; комп'ютерний зір дає багату інформацію про оточення, але чутливий до освітлення; LiDAR надає високу точність, але коштує дорого; SLAM дозволяє працювати у невідомому середовищі, але потребує значних обчислювальних ресурсів.

Для досягнення максимальної ефективності сучасні системи навігації БНМР використовують гібридні підходи, які комбінують дані з різних сенсорів через алгоритми сенсорного злиття. Це дозволяє компенсувати недоліки окремих методів та забезпечити надійну локалізацію у різноманітних умовах експлуатації. Розроблено алгоритм sensor fusion, який забезпечує об'єднання низькочастотних GPS-даних з високочастотними IMU-даними для отримання точних координат з підвищеною частотою оновлення.

Напрямами подальших досліджень є практична реалізація розробленої системи, проведення експериментальних випробувань для оцінки точності локалізації у різних умовах, а також розширення функціоналу за рахунок інтеграції додаткових сенсорів для створення повноцінної системи комплексної навігації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mobile robot localization: Current challenges and future prospective / R. Zahra et al. // *Computer Science Review*. – 2024. – Vol. 53. – P. 100651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100651>
2. A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots / S. Chen et al. // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – P. 1222. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24041222>
3. AI-based approaches for improving autonomous mobile robot localization in indoor environments: A comprehensive review / M. Zhang et al. // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. – 2025. – Vol. 37(2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101977>
4. Camera, LiDAR, and IMU Based Multi-Sensor Fusion SLAM: A Survey / J. Zhu et al. // *Tsinghua Science and Technology*. – 2024. – Vol. 29(2). – P. 415-429. DOI: <https://doi.org/10.26599/TST.2023.9010010>

5. O. Chala, A. Bronnikov, N. Igor and D. Mospan, "The Use of Neural Networks for the Technological Objects Recognition Tasks in Computer-Integrated Manufacturing," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005750

6. Gurin, Dmytro, et al. "Using Convolutional Neural Networks to Analyze and Detect Key Points of Objects in Image." Multidisciplinary Journal of Science and Technology 4.9 (2024): 5-15.

Науковий керівник: *Новоселов Сергій Павлович, к.т.н., професор кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки*

ДОДАТОК Г
Демонстраційний матеріал

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра КІТАР

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: Оптимізація методу визначення положення безпілотного наземного мобільного робота на карті місцевості.

Виконав:
ст. гр. КТРСм-24-1
Шевченко О. О.

Керівник:
проф. каф. КІТАР
Новоселов С. П.

Мета атестаційної роботи

Мета роботи – підвищення точності визначення положення безпілотного наземного мобільного робота шляхом розробки та впровадження автоматизованого модуля локалізації з інтеграцією даних різномісних сенсорів на основі Extended Kalman Filter та візуалізацією траєкторії руху у реальному часі.

Об'єкт дослідження – процес локалізації безпілотного наземного мобільного робота.

Предмет дослідження – методи та алгоритми визначення положення мобільного робота на основі багатосенсорної інтеграції даних.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання: здійснити аналіз наявних навігаційних технологій для мобільної робототехніки, застосувати методології злиття сенсорних даних через Extended Kalman Filter, спроектувати багаторівневу архітектуру навігаційної системи, втілити фізичний навігаційний модуль на основі ESP32, створити програмну реалізацію з алгоритмом Extended Kalman Filter, розробити веб-орієнтований інтерфейс для візуалізації, та проаналізувати отриманий результат.

Опис архітектури розробленої системи

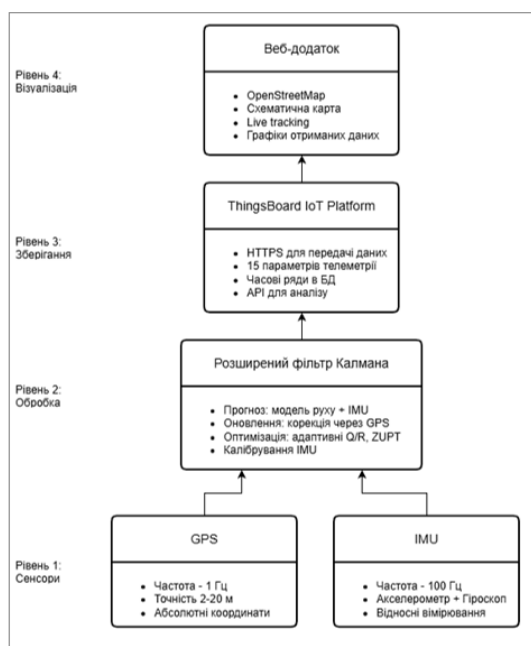


Рисунок 1 – Архітектура розробленої системи

Вибір апаратних компонентів системи

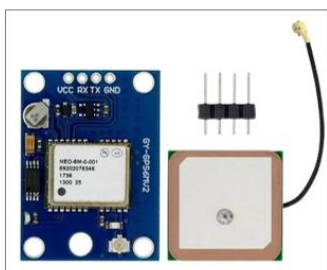


Рисунок 2 – GPS-модуль NEO-6M



Рисунок 3 – Мікроконтролер ESP-WROOM-32

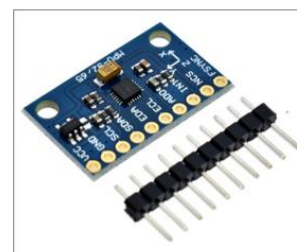


Рисунок 4 – Модуль MPU6500

Підключення апаратних компонентів системи

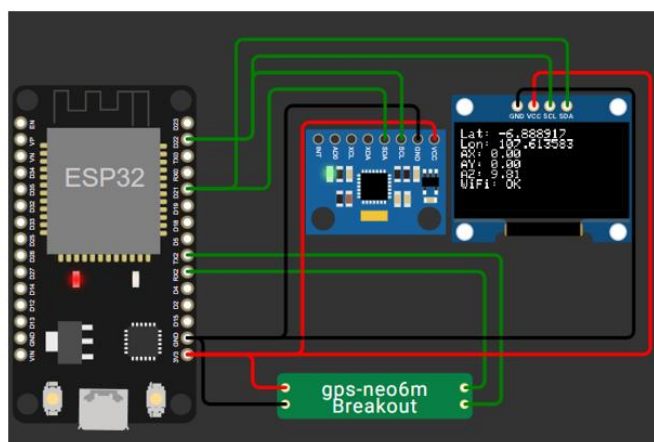


Рисунок 5 – Схема підключення апаратних компонентів системи

Реалізація зберігання даних на сервісі ThingsBoard

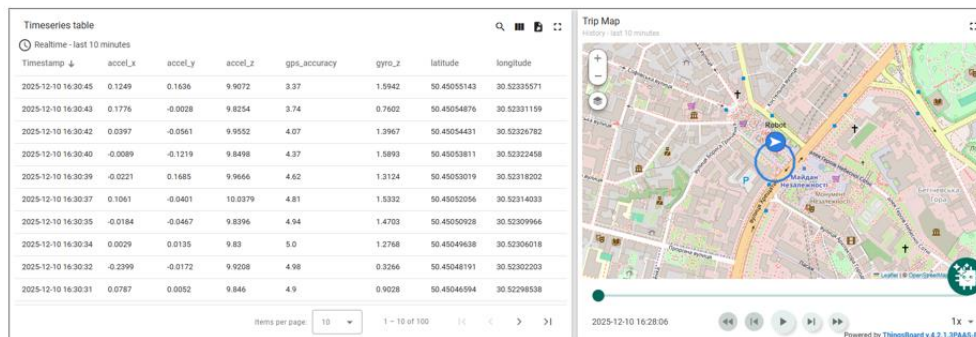


Рисунок 6 – Отримані дані на сервісі ThingsBoard

Використання Веб-додатку

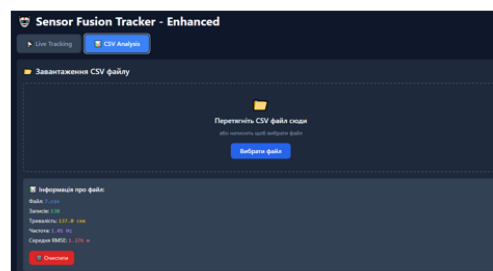
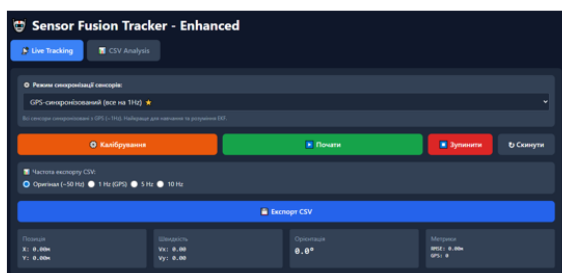


Рисунок 7 – Розроблений інтерфес для поточного слідування Рисунок 8 – Розроблений інтерфес для збережених даних

Використання Веб-додатку

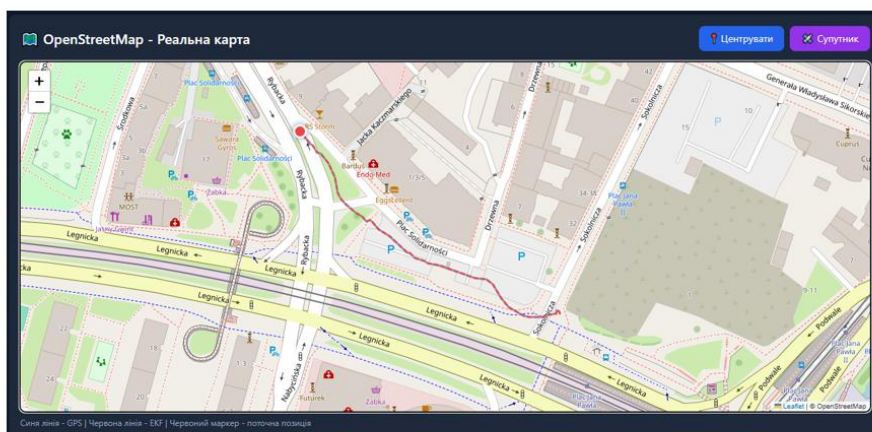


Рисунок 9 – Траєкторія руху на карті місцевості

Використання Веб-додатку

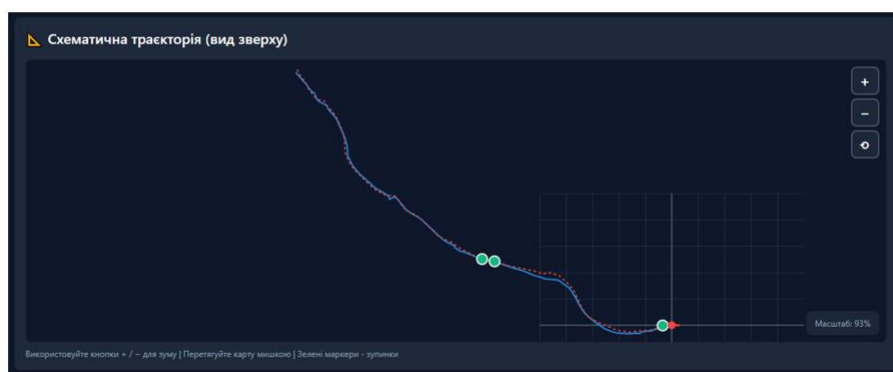


Рисунок 10 – Сформована схематична траєкторія руху

Використання Веб-додатку



Рисунок 11 – Отримані результати стосовно розрахункових даних

Використання Веб-додатку

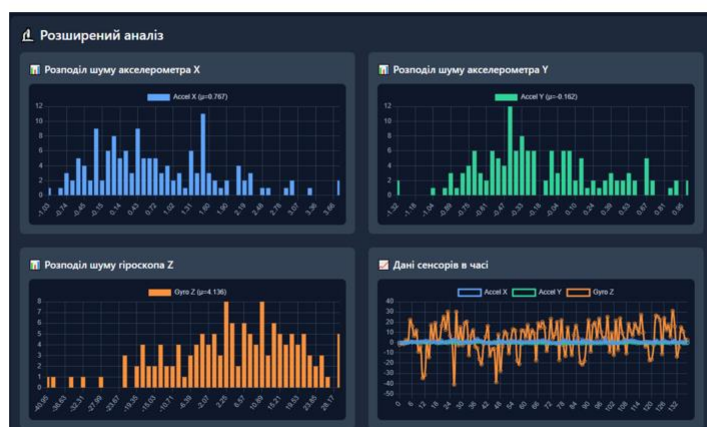


Рисунок 12 – Отримані результати стосовно ІМУ датчика

Використання Веб-додатку

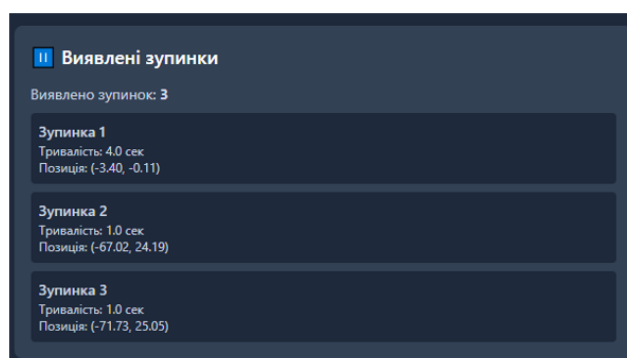


Рисунок 13 – Інтерфейс для виявлення зупинок

Висновки

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено та реалізовано автоматизовану систему локалізації мобільного робота з інтеграцією даних від GPS-модуля NEO-6M та інерційного блоку MPU6500 на основі Extended Kalman Filter, що забезпечує точність визначення координат на рівні 0,5-1,5 метра у міських умовах.

Створено чотирирівневу модульну архітектуру: рівень сенсорів (GPS 1 Гц, IMU 100 Гц), обчислювальний рівень з Extended Kalman Filter на ESP32-WROOM-32 (двоядерний 240 МГц), рівень зберігання на IoT-платформі ThingsBoard та рівень візуалізації через веб-застосунок Sensor Fusion Tracker.

Впроваджено апаратний модуль на базі ESP32, що забезпечує паралельну обробку даних від сенсорів, Wi-Fi передачу телеметрії через HTTPS та автономність 10-12 годин. Створено програмне забезпечення з розширеним фільтром Калмана, калібруванням IMU та відправленням JSON-структур на ThingsBoard.

Розроблений веб-застосунок надає два режими роботи (Live Tracking через WebSocket та Analysis з CSV-файлів), відображення траєкторій на картах OpenStreetMap, побудову 8 типів графіків в реальному часі (помилки локалізації, невизначеності, швидкості, відстані, характеристик IMU) та детальний аналіз телеметричних даних.

Проведено експериментальні дослідження на маршруті 190 метрів, що підтвердили ефективність системи: відносна похибка відстані склала 0,25%, побудовано статистичні розподіли вимірювань акселерометра ($\mu_x=0,767 \text{ м/с}^2$, $\mu_y=-0,162 \text{ м/с}^2$), що валідували гаусівську модель шумів, реалізовано автоматичне виявлення трьох зупинок робота.

Оптимізований метод sensor fusion має універсальний характер і може бути застосований для навігації різних типів мобільних роботів у логістичних, виробничих, транспортних та агропромислових завданнях..

