

# Documento Técnico

## Sistema de Detección y Seguimiento de Caballos

### 1. Modelado del Filtro de Kalman

El sistema implementado utiliza un filtro de Kalman para el seguimiento de caballos en secuencias de video. Este filtro probabilístico es ideal para esta aplicación debido a su capacidad de estimar estados en entornos con ruido e incertidumbre.

#### Modelo Matemático

El filtro de Kalman implementado modela el movimiento de los caballos utilizando un vector de estado que incluye la posición y velocidad en coordenadas x-y:

$$\mathbf{x} = [x, y, v_x, v_y]^T$$

Donde:

- $(x, y)$  representa la posición del centro de la caja delimitadora
- $(v_x, v_y)$  representa la velocidad en ambos ejes

#### Ecuaciones del Filtro

El proceso consta de dos fases principales:

##### 1. Predicción:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}\end{aligned}$$

##### 2. Actualización:

$$\begin{aligned}\mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k|k-1}\end{aligned}$$

#### Implementación en el Código

Aunque el filtro de Kalman no está explícitamente implementado en el código proporcionado, está implícitamente integrado dentro del módulo de tracking de YOLOv8.

Este módulo combina:

1. El detector YOLOv8 para proporcionar mediciones (detecciones)
2. Un algoritmo de asociación para relacionar detecciones con tracks existentes
3. El filtro de Kalman para predecir la posición futura y suavizar las trayectorias

La implementación se refleja en la función `process_frame_with_tracking()` donde la línea:

```
Python
results = model.track(frame, persist=True,
conf=confidence_threshold)
```

invoca el rastreador integrado de YOLOv8 que utiliza el filtro de Kalman para mantener la coherencia temporal de las trayectorias.

## 2. Justificación del Detector de Objetos Elegido

El sistema utiliza YOLOv8 (específicamente el modelo "yolov8m.pt") como detector de objetos por las siguientes razones:

### Ventajas de YOLOv8

1. **Equilibrio entre velocidad y precisión:** El modelo "m" (medio) de YOLOv8 ofrece un excelente compromiso entre velocidad de procesamiento y precisión de detección, crucial para el seguimiento en tiempo real.
2. **Detección en un solo paso:** A diferencia de los detectores de dos fases (R-CNN), YOLO procesa la imagen completa en un solo paso, lo que mejora la coherencia espacial de las detecciones.
3. **Capacidad de detección multi-clase:** Aunque el sistema se enfoca en caballos (clase 13 en COCO), YOLOv8 puede detectar 80 clases diferentes, lo que permite ampliar el sistema fácilmente.
4. **Funcionalidad de tracking integrada:** YOLOv8 incorpora capacidades de tracking que se pueden invocar con el método `.track()`, simplificando la implementación.
5. **Alto rendimiento en detección de animales:** YOLOv8 ha demostrado un rendimiento superior en la detección de animales, incluyendo caballos, en diversos entornos y condiciones.

## Parámetros de Configuración

El detector se configuró con un umbral de confianza de 0.25, lo que permite capturar detecciones con una certeza moderada, balanceando entre reducir falsos positivos y mantener la sensibilidad necesaria para no perder el seguimiento de los caballos.

## 3. Resultados Obtenidos y Análisis

### Capacidades del Sistema

El sistema implementado demuestra las siguientes capacidades:

1. **Detección precisa:** Identifica correctamente caballos en diversos escenarios, posiciones y perspectivas.
2. **Seguimiento robusto:** Mantiene la identidad de cada caballo a lo largo del tiempo mediante IDs únicos.
3. **Visualización de trayectorias:** Muestra la ruta seguida por cada caballo mediante líneas de colores, permitiendo analizar patrones de movimiento.
4. **Estadísticas en tiempo real:** Muestra el número de caballos detectados en cada fotograma y calcula promedios.

### Análisis de Rendimiento

El sistema muestra un rendimiento notable en el seguimiento de caballos, con las siguientes características:

1. **Robustez ante oclusiones parciales:** El filtro de Kalman permite mantener el seguimiento incluso cuando hay oclusiones temporales entre caballos.
2. **Estabilidad de trayectorias:** Las trayectorias dibujadas muestran un suavizado característico del filtro de Kalman, eliminando ruido en las detecciones.
3. **Manejo de múltiples objetivos:** El sistema mantiene correctamente las identidades de varios caballos simultáneamente, incluso cuando sus trayectorias se cruzan.
4. **Limitaciones identificadas:**
  - Posible confusión de identidades en casos de oclusión prolongada
  - Dependencia de la calidad del video y condiciones de iluminación
  - Limitación a 50 puntos en el historial de trayectorias para equilibrar rendimiento y memoria

## Métricas de Desempeño

El sistema calcula y reporta:

- Número total de fotogramas procesados
- Promedio de caballos detectados por fotograma
- Número de caballos únicos identificados durante toda la secuencia

Estas métricas permiten evaluar tanto la eficacia del detector como la precisión del seguimiento a lo largo del tiempo.

La combinación del detector YOLOv8 con el filtro de Kalman implícito en su módulo de tracking demuestra ser una solución eficaz para el seguimiento de caballos en video, logrando mantener trayectorias coherentes y estables incluso en escenarios complejos.

## Video del funcionamiento

[https://youtu.be/roj4\\_3Ko-BI](https://youtu.be/roj4_3Ko-BI)

### Referencias:

- Ultralytics YOLOv8 Documentation: <https://docs.ultralytics.com/>
- OpenCV Documentation: <https://docs.opencv.org/>