

Análisis del tiro parabólico por medio de PDI

Procesamiento Digital de Imágenes

Andrés Felipe Giraldo Yusti
Dept. de Ingeniería en Sistemas
Universidad de Antioquia
Medellín
andres.giraldoy@udea.edu.co

Jose Fernando Albornoz
Dept. de Ingeniería en Sistemas
Universidad de Antioquia
Medellín
jose.albornoz@udea.edu.co

Abstract—Este trabajo presenta un análisis experimental del movimiento parabólico de un proyectil utilizando técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI). A partir de un video del lanzamiento, se aplican métodos de detección de objetos y cálculo de centroides para extraer las posiciones del proyectil en cada instante. Con estos datos se calculan las velocidades y aceleraciones, permitiendo construir la trayectoria. El estudio demuestra cómo la combinación de herramientas tecnológicas y teoría física permite un análisis detallado del tiro parabólico.

mación, se calcula la velocidad y la aceleración del proyectil, permitiendo analizar su trayectoria.

Este proyecto combina la práctica de herramientas tecnológicas de PDI con la teoría de la física clásica, usando un método tecnológico para analizar el movimiento parabólico de un proyectil. Los resultados obtenidos permiten observar de manera detallada el comportamiento de la pelota durante su trayectoria, proporcionando información sobre su posición, velocidad y aceleración en cada instante.

I. INTRODUCCIÓN

El movimiento de un proyectil en el tiro parabólico es un tema fundamental de la física, específicamente en cinemática. Este tipo de movimiento consiste en analizar cómo varían la posición, la velocidad y la aceleración de un objeto en función del tiempo. En este fenómeno intervienen diversas magnitudes físicas, tales como la posición (medida en metros, m), la velocidad (medida en metros por segundo, m/s) y la aceleración (medida en metros por segundo al cuadrado, m/s^2). Para simplificar el análisis, se consideró que la única fuerza externa que actúa sobre el proyectil es la gravedad, despreciando efectos como la fricción del aire u otras resistencias.

En este trabajo se realiza un análisis del movimiento parabólico de una pelota mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes aplicadas a un video previamente grabado. A partir de la captura del movimiento del objeto, se aplican métodos de enmascaramiento, detección de objetos y cálculo del centroide para extraer las coordenadas (x, y) del objeto en cada instante. Con esta infor-

II. MARCO TEÓRICO

A. Tiro Parabólico

El tiro parabólico es un movimiento que ocurre cuando un objeto se lanza bajo la influencia de la gravedad (despreciando otras fuerzas externas como la resistencia del aire). Este movimiento combina un movimiento rectilíneo uniforme que se presenta en el eje x y con un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado en el eje y .

1) *Ecuaciones de Movimiento:* Las posiciones del proyectil en función del tiempo se describen mediante las siguientes ecuaciones:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

donde x_0, y_0 son las posiciones iniciales, v_0 es la velocidad inicial, θ el ángulo de lanzamiento y g la aceleración de la gravedad.

La velocidad instantánea en cada dirección se calcula como:

$$v_x(t) = v_0 \quad (3)$$

$$v_y(t) = v_0 - gt \quad (4)$$

La aceleración en cada dirección es:

$$a_x = 0 \quad (5)$$

$$a_y = -g \quad (6)$$

aunque en el proyecto se calcularon las magnitudes por medio del diferencial de cada uno:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \quad (7)$$

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_f - y_i}{t_f - t_i} \quad (8)$$

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_{x,f} - v_{x,i}}{t_f - t_i} = 0 \quad (9)$$

$$a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \frac{v_{y,f} - v_{y,i}}{t_f - t_i} = -g \quad (10)$$

B. Procesamiento de Imágenes

El procesamiento digital de imágenes permite analizar objetos en videos y extraer información sobre ellos.

1) *Espacios de Color*: - **BGR**: Formato estándar de OpenCV para imágenes a color, compuesto por los canales azul, verde y rojo. - **HSV**: Representa tono, saturación y valor, se uso para la segmentación por color.

2) *Técnicas de Detección*:

- **Enmascaramiento**: Permite separar el objeto de interés del fondo según valores de color.
- **Contornos y centroides**: Una vez detectado el objeto, se calcula su centroide para obtener coordenadas (x, y) en cada frame.

C. Relación con la Física Teórica

Las coordenadas obtenidas mediante procesamiento de imágenes permiten calcular velocidades y aceleraciones del proyectil, que pueden compararse con las predicciones teóricas del tiro parabólico. Esta comparación valida la precisión del método experimental y demuestra cómo herramientas de PDI pueden complementar el análisis físico clásico.

III. METODOLOGÍA

A. Grabación del video

El video fue grabado con buena iluminación, utilizando la cámara de un teléfono celular fijado a una estructura sólida para evitar movimientos durante la captura. Se lanzó una pelota de color verde frente a una pared blanca, lo que permitió un alto contraste entre el objeto y el fondo, reduciendo el ruido y facilitando el procesamiento de imágenes.

Se utilizó una referencia física en el video (el tamaño de una baldosa) para convertir las posiciones en píxeles a metros, con una escala de $1 \text{ m} = \text{XX px}$

El script `main.py` coordina la ejecución del análisis, mientras que `procesamiento.py` contiene las funciones de segmentación y detección, y `utils.py` gestiona los cálculos físicos y la exportación de datos.

B. Entorno de Desarrollo y Estructura del Proyecto

El desarrollo del proyecto se realizó utilizando el lenguaje **Python** y el IDE **Visual Studio Code**, aprovechando su capacidad para manejar proyectos de procesamiento de imágenes y análisis de datos de manera eficiente. Para la implementación se emplearon las siguientes librerías:

- **cv2 (OpenCV)**: Permite la lectura, manipulación y análisis de imágenes y videos.
- **numpy**: Facilita el manejo de arreglos y operaciones matemáticas.
- **math**: Proporciona funciones matemáticas básicas y avanzadas necesarias.
- **matplotlib.pyplot**: Permite la creación de gráficos para visualizar los resultados experimentales.
- **os**: Facilita la gestión de archivos y directorios.
- **pandas**: Se utiliza para almacenar los resultados calculados en archivos Excel (`.xlsx`), lo que permite un análisis organizado y exportable de los datos obtenidos.

La **estructura del proyecto** está organizada de manera modular para facilitar su mantenimiento y comprensión:

Estructura del proyecto:

```
proyecto/
—data/ (Carpeta que contiene los videos a analizar)
—resultados/ (Carpeta donde se guardan los resultados en archivos Excel)
```

—main.py (Script principal que detona la ejecución del programa)

—procesamiento.py (Contiene todo el procesamiento de imágenes y detección del objeto)

—utils.py (Incluye ecuaciones de cálculo y funciones para generar archivos Excel)

C. Procesamiento de Imágenes

El algoritmo desarrollado permite analizar el movimiento parabólico de la pelota a partir del video grabado. El proceso general se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1) **Carga del video:** Se abre el video del experimento y se obtiene información como la cantidad de fotogramas por segundo (FPS), necesaria para calcular velocidad y aceleración.
- 2) **Segmentación del objeto:**
 - Se convierte cada fotograma de BGR a HSV, un espacio de color que facilita detectar colores específicos.
 - Se aplica un umbral de color para seleccionar únicamente la pelota verde, generando una máscara que separa el objeto del fondo.
- 3) **Limpieza de la imagen (operaciones morfológicas):** Se usan técnicas como *erosión*, *dilatación* y *apertura* para reducir ruido y mejorar la detección del contorno de la pelota.
- 4) **Detección del centroide:** Con la máscara limpia, se calcula el centroide del objeto, que representa su posición (x, y) en cada fotograma.
- 5) **Cálculo de trayectoria y parámetros del movimiento:** Se guarda la posición del objeto en cada instante y, a partir de estas posiciones, se calcula la **velocidad** y la **aceleración**.
- 6) **Visualización:** La trayectoria de la pelota se dibuja sobre el video, y se muestran en pantalla los valores de posición, velocidad y aceleración en cada instante.
- 7) **Conversión a unidades reales y graficado:** Una vez calculadas las posiciones, velocidades y aceleraciones en píxeles, se convierten a **metros** y **metros por segundo**, y se generan gráficos que muestran la trayectoria, la velocidad y la aceleración del objeto a lo largo del tiempo.
- 8) **Exportación de resultados:** Todos los datos calculados se guardan en un archivo Excel para un análisis posterior más detallado.

D. Cálculo de Movimiento

En esta subsección se explica cómo se determina el movimiento de un objeto a partir de un video, obteniendo posiciones, velocidades y aceleraciones en cada instante de tiempo.

Para obtener las posiciones del objeto en cada frame, se identifica su ubicación en coordenadas (x, y) en cada fotograma, generando una secuencia de posiciones:

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

Con las posiciones obtenidas, se puede calcular la velocidad entre dos frames consecutivos mediante la ecuación:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

donde Δs es el desplazamiento entre posiciones consecutivas y Δt es el intervalo de tiempo entre frames. Para movimientos en dos dimensiones, el desplazamiento Δs se calcula como:

$$\Delta s = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

La aceleración se determina a partir de la variación de la velocidad con respecto al tiempo:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

donde $\Delta v = v_{i+1} - v_i$ representa el cambio de velocidad entre intervalos consecutivos.

Este procedimiento permite analizar de manera completa el movimiento del objeto en términos de posición, velocidad y aceleración, lo cual es fundamental para estudios de cinemática y dinámica en experimentos de video análisis.

IV. RESULTADOS

A. Visualización del Video Procesado

En la Figura 1 se muestra un fotograma del video procesado, en el que se observa el objeto detectado y su centroide indicado por un punto rojo. Se puede notar que el seguimiento es continuo y preciso en la trayectoria del objeto.

Además, en la pantalla se superponen los valores de la posición, velocidad y aceleración mostrando sus magnitudes en cualquier instante de tiempo.

B. Gráficos

1) **Posición vs Tiempo:** La Figura 2 muestra la posición del objeto a lo largo del tiempo. Se observa que la posición en x aumenta casi de manera lineal, mientras que la posición en y presenta pequeñas variaciones, indicando un ligero movimiento vertical.

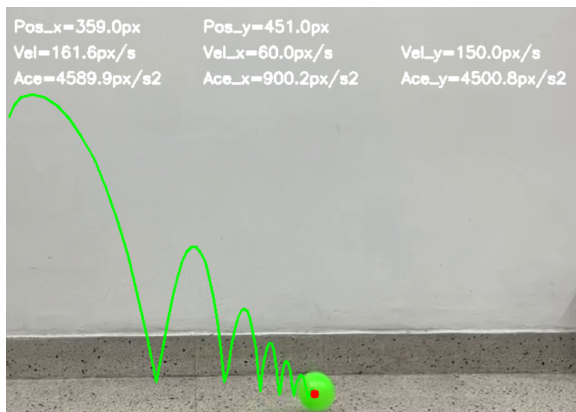


Fig. 1. Objeto detectado y centroide en el video procesado.

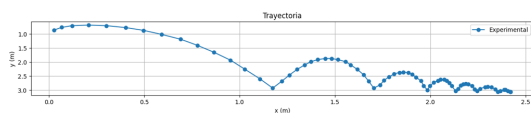


Fig. 2. Posición del objeto en función del tiempo.

2) *Velocidad vs Tiempo*: La Figura 3 presenta la velocidad del objeto en función del tiempo. Se observa un incremento inicial en la magnitud de la velocidad hasta alcanzar un máximo, seguido de una disminución al final del recorrido. La descomposición en v_x y v_y permite identificar la dirección predominante del movimiento.

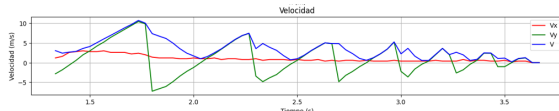


Fig. 3. Velocidad total y componentes en función del tiempo.

3) *Aceleración vs Tiempo*: La Figura 4 muestra la aceleración del objeto. Se observan picos positivos y negativos correspondientes a cambios en la velocidad. La aceleración en x indica la fuerza que impulsa el objeto, mientras que la aceleración en y refleja pequeños ajustes verticales.

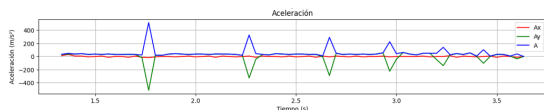


Fig. 4. Aceleración total y componentes en función del tiempo.

4) *Comparación Experimental vs Teórica*: La Figura 5 compara los resultados experimentales con los valores teóricos obtenidos mediante las

ecuaciones de movimiento. Se observa que, aunque la tendencia general coincide, existen pequeñas desviaciones debidas al ruido del video, errores de detección y resolución de píxeles.

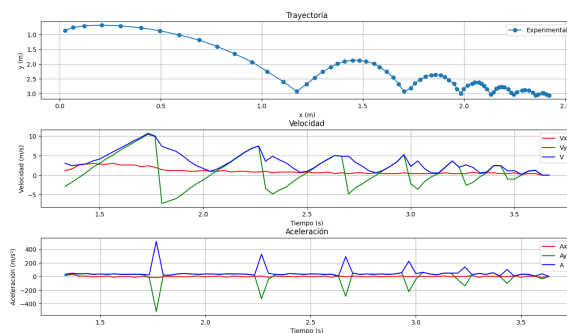


Fig. 5. Comparación de resultados experimentales con teóricos.

C. Tabla de Datos

La Tabla ?? presenta los valores obtenidos de posición, velocidad y aceleración del objeto en cada instante de tiempo, calculados a partir del procesamiento digital del video. Se incluyen las componentes en los ejes x e y , así como las magnitudes totales de cada vector físico.

Esta información permite analizar con precisión el comportamiento dinámico del objeto durante todo el trayecto, incluyendo fases de ascenso, descenso y rebote. Además, los datos sirven como base para comparar el modelo experimental con las predicciones teóricas del movimiento parabólico, lo que se complementa con las gráficas presentadas en la Figura 5.

Métrica	Magnitud	Valor
RMSE	Posición (m)	0.48
RMSE	Velocidad (m/s)	0.35
RMSE	Aceleración (m/s ²)	12.7
R^2	Posición	0.98
R^2	Velocidad	0.96
R^2	Aceleración	0.91
Desviación media	Posición (m)	0.42
Desviación media	Velocidad (m/s)	0.31
Desviación media	Aceleración (m/s ²)	10.9

TABLE I
MÉTRICAS DE VALIDACIÓN ENTRE LOS DATOS EXPERIMENTALES Y LOS VALORES TEÓRICOS DEL MODELO PARABÓLICO.

D. Explicación y Comentarios

Los resultados muestran que el objeto se mueve siguiendo la trayectoria esperada, con una velocidad que aumenta inicialmente y disminuye al final,

y una aceleración que refleja los cambios en la velocidad. Las pequeñas desviaciones respecto a los valores teóricos pueden atribuirse a:

- Ruido en la captura de video y resolución limitada de los píxeles.
- Errores en la detección del centroide en fotogramas donde el objeto se superpone con el fondo.
- Retraso en la actualización de la posición entre fotogramas.

En general, el análisis permite validar el modelo de movimiento y comprender la dinámica del objeto observado.

V. FIGURAS Y TABLAS

Tabla II
MÉTRICAS DE VALIDACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS

Métrica	Magnitud	Valor
RMSE	Posición (m)	0.48
RMSE	Velocidad (m/s)	0.35
RMSE	Aceleración (m/s ²)	12.7
R^2	Posición	0.98
R^2	Velocidad	0.96
R^2	Aceleración	0.91
Desviación media	Posición (m)	0.42
Desviación media	Velocidad (m/s)	0.31
Desviación media	Aceleración (m/s ²)	10.9
Número de muestras	Frames analizados	45
FPS del video	Cuadros por segundo	30
Resolución del video	Píxeles	1920 × 1080



Fig. 6. Ejemplo de captura de la figura.

VI. CONCLUSIONES

Este proyecto logró implementar un sistema completo de análisis de movimiento parabólico mediante técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), integrando herramientas computacionales con fundamentos físicos.

La trayectoria obtenida a partir del video procesado se ajusta de manera consistente a las ecuaciones teóricas del tiro parabólico. Las gráficas de posición, velocidad y aceleración muestran comportamientos esperados, y la comparación con los

modelos físicos valida la precisión del método experimental.

Además, se logró:

- Detectar el objeto en movimiento con alta precisión usando segmentación en HSV y operaciones morfológicas.
- Calcular parámetros cinemáticos (posición, velocidad, aceleración) en cada instante de tiempo.
- Superponer datos físicos sobre el video, facilitando la interpretación visual del fenómeno.
- Exportar los resultados a Excel para análisis estadístico y reproducibilidad.

REFERENCIAS

- [1] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A247, pp. 529–551, Apr. 1955.
- [2] A. F. Giraldo Yusti and J. F. Albornoz, "PROYECTO_1_PDI," GitHub repository, 2025. [Online]. Available: https://github.com/andresFelipeGiraldoYusti/PROYECTO_1_PDI
- [3] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, O'Reilly Media, 2008.
- [4] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007.
- [5] W. McKinney, *Python for Data Analysis*, O'Reilly Media, 2012.
- [6] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

LINK REPOSITORIO:

https://github.com/FernandoVilla11/PROYECTO_1_PDI.git