

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Implementación de algoritmos de física granular con agentes
robóticos móviles en la plataforma Robotat**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Valerie Lorraine
Sofía Valdez Trujillo, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

Resumen

La siguiente propuesta de trabajo se enfoca en los algoritmos de física granular, que son métodos numéricos utilizados para simular el comportamiento de sistemas granulares como materiales en polvo o granos. Estos permiten modelar la interacción entre partículas individuales y simular la dinámica del sistema a nivel microscópico para predecir su comportamiento. Por lo que, con el fin de evaluar e implementar algoritmos de física granular con agentes robóticos móviles en la plataforma Robotat y explorar diferentes escenarios en sistemas físicos y ambientes reales, se investigarán modelos y algoritmos de física granular, se realizarán simulaciones computarizadas para evaluar los algoritmos, se validarán los resultados mediante experimentación con los agentes robóticos en la plataforma Robotat, y se compararán los resultados obtenidos en las pruebas de ejecución con las simulaciones realizadas. Al lograr todos los objetivos, se espera que esta implementación y validación de los algoritmos en los agentes robóticos brinde conocimientos en el campo del problema de la cola fantasma y permita explorar diferentes escenarios y aplicaciones de los algoritmos.

Antecedentes

Algoritmos de física granular

Los algoritmos de física granular son métodos numéricos utilizados para simular el comportamiento de sistemas granulares como materiales en polvo o granos. En general, modelan la interacción entre partículas individuales permitiendo simular la dinámica del sistema a nivel microscópico con el fin de predecir el comportamiento del sistema granular [1]. Esto puede ser útil para optimizar el diseño y operación de sistemas industriales o para comprender procesos que involucren materiales granulares. Adicionalmente, estos algoritmos suelen ser utilizados en la simulación de sistemas granulares en estado estacionario, en el que las partículas del sistema han alcanzado un estado de equilibrio dinámico ya que pueden simular el comportamiento de partículas individuales en respuesta a fuerzas internas y externas, como gravedad, fricción, cohesión y elasticidad. Existen diferentes tipos de algoritmos de física granular, que utilizan diferentes modelos matemáticos para representar la interacción entre partículas. Algunos incluyen el método de elementos discretos, el método de partículas suaves y el método de redes de resortes. [2]

El problema de la cola fantasma se produce cuando los objetos, robots o seres vivos que interactúan con materiales granulares dejan una “huella” o “cola” detrás de ellos, lo que puede alterar el comportamiento del material en el futuro. Un ejemplo de esto es un atasco de tráfico fantasma, el cual describe el resultado de una fila de vehículos que surge sin la presencia de un accidente u obstáculo en la carretera [3]. En teoría, si todos los conductores en la carretera mantuvieran el mismo espacio y una velocidad constante, el tránsito fluiría sin problemas y sin interrupciones. No obstante, debido a errores humanos y reacciones tardías, con una pequeña perturbación, se puede desencadenar una reacción en cadena de una carretera congestionada.

Robotat

En las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala se cuenta con un laboratorio que dispone de un sistema de experimentación en robótica denominado Robotat, que se muestra en la Figura 1. Está basado en el Robotarium del Instituto de Tecnología de Georgia [4], en Estados Unidos y está constituido por una plataforma de acero destinada a realizar pruebas, que se encuentra rodeada del sistema OptiTrack, conformada de cámaras de captura de movimiento de alta precisión y baja latencia administrados por una computadora central. Dicho sistema utiliza piezas de plástico llamados “marcadores” que presentan características especiales para ser detectadas por el sistema de cámaras. Este conjunto se integra a una red inalámbrica WiFi a través de la cual se comunican los robots, y dentro del equipo de cómputo que administra el sistema de cámaras se dispone de un código fuente para ejecutar un servidor que responda a solicitudes de la ubicación y características de los marcadores de prueba. [5]



Figura 1: Ecosistema Robotat con cámaras de detección de movimiento Optitrack.

Algoritmos de enjambre

Previamente, en la Universidad del Valle de Guatemala, se ha trabajado con diferentes agentes robóticos móviles, con el fin de implementar algoritmos de inteligencia computacional y robótica de enjambre con comportamientos emergentes que se basan en la interacción local entre los robots y no requieren un sistema centralizado para tomar decisiones. Algunos algoritmos implementados han sido el *Ant Colony Optimization* (ACO) que está basado en el comportamiento de las hormigas y es utilizado como una técnica probabilística para encontrar caminos óptimos entre dos puntos [6]. También se utilizó el algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) que está basado en el comportamiento de un enjambre de partículas que se mueven hacia una solución óptima en un espacio de búsqueda. [7]

Asimismo, Aldo Aguilar diseñó el Algoritmo modificado de optimización de enjambre de

partículas (MPSO) [8] el cual debía tomar en cuenta las restricciones derivadas de las ecuaciones cinemáticas de robots diferenciales y dimensiones limitadas del espacio de búsqueda. Este incluye un planeador de trayectorias utilizando el PSO clásico ajustado con múltiples parámetros optimizados para robots diferenciales, que fueron configurados por medio de simulaciones de enjambres de 200 partículas en MATLAB evaluadas en diversas funciones de costo. Las modificaciones realizadas al algoritmo clásico de PSO surgieron a causa de la necesidad de implementar dicho algoritmo de búsqueda a robots que no se comportaban como partículas, sino que se veían limitados por sus características físicas (dimensiones y limitaciones de movimiento).

En 2022, se realizó un proyecto de cooperación entre la Universidad del Valle de Guatemala y la Universidad de Navarra, España, en donde se deseaba utilizar robots *Alphabot 2* para realizar pruebas de ejecución y validación de algoritmos de física granular estudiados por el Licenciado Juan Diego Robles. Por lo tanto, se construyó un sistema robótico que incluía una vídeo cámara con brazo móvil articulado con el objetivo de verificar la funcionalidad de la plataforma robótica *Alphabot 2* así como su capacidad de ejecutar tareas relacionadas al seguimiento de líneas pintadas en el suelo. En consecuencia, como se evidencia en la Figura 2, se construyó un circuito de prueba en donde se probaron 3 agentes que llevaban consigo un código identificador ArUco que permitieron utilizar herramientas de software para marcar el movimiento relativo de objetos y extraer datos relacionados a velocidades, orientaciones relativas entre otros. [9]

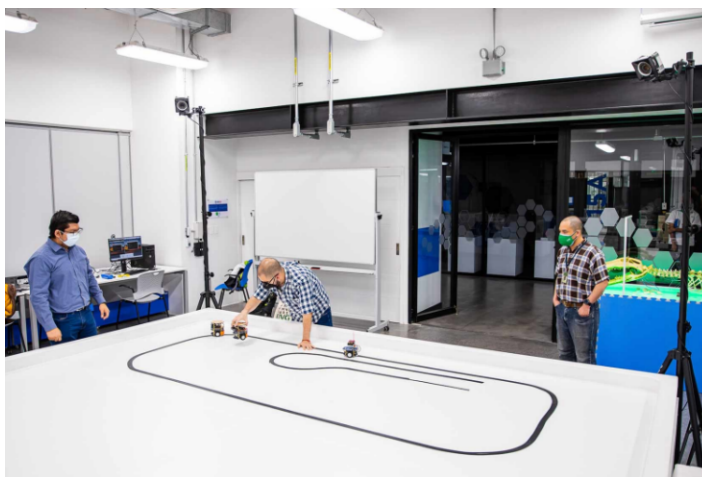


Figura 2: Circuito de prueba para la implementación de marcadores para reconocimiento de movimiento ArUco. [5]

Justificación

Como se mencionó anteriormente, se han realizado pruebas con plataformas y se han implementado diversos algoritmos de inteligencia computacional y robótica de enjambre con comportamientos emergentes. No obstante, las pruebas de ejecución y validación de algoritmos de física granular realizadas en 2022 fueron limitadas. Por lo tanto, se desea realizar más pruebas utilizando los agentes robóticos *Alphabot 2* y *Pololu 3Pi+ 32u4 OLED* para validar algoritmos y explorar diferentes escenarios en sistemas físicos y ambientes reales

tales como el tránsito fantasma y la forma de evacuación de las personas de una habitación en una emergencia.

Esta implementación y validación de los algoritmos en los agentes robóticos permitiría incursionar en problemas como el de cola fantasma y abriría campo para la comprensión del comportamiento de agentes y seres al momento de evacuar una habitación. Asimismo, expandirá las aplicaciones y usos que se le pueden dar al Robotat.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar e implementar algoritmos de física granular con agentes robóticos móviles en la plataforma Robotat.

Objetivos Específicos

- Investigar modelos y algoritmos de física granular y sus aplicaciones.
- Evaluar los algoritmos de física granular por medio de simulaciones computarizadas.
- Validar los algoritmos desarrollados mediante experimentación con agentes robóticos móviles físicos en la plataforma Robotat.
- Evaluar el rendimiento obtenido en las pruebas de ejecución contra el esperado según las simulaciones realizadas.

Marco teórico

Dinámica granular computacional

Las simulaciones por computadora pertenecen a los métodos más importantes de investigación teórica de materiales granulares, debido a que no existe una teoría completa sobre los materiales granulares que prediga de forma fiable el comportamiento estos al ser colocados en dispositivos técnicos. Por lo tanto, la dinámica molecular juega un rol significativo entre la simulación de métodos para sistemas granulares, y es la solución numérica dependiente del tiempo de la ecuación de movimiento de Newton para todas las partículas de las cuales consiste el material granular.

Bajo ciertas condiciones iniciales, la dinámica molecular se puede simplificar si en cada instante de tiempo ninguna de las partículas está en contacto mecánico con más de una otra partícula (aproximación de esfera dura), lo que reduce el sistema de muchas partículas a una de dos partículas. Esta suposición es justificada si el tiempo transcurrido entre dos colisiones sucesivas de una partícula es en promedio mucho mayor que la duración de una colisión [10].

Dinámica molecular

Los materiales granulares consisten de un gran número de partículas cuyo tamaño varía desde micrómetros a centímetros. Estas partículas interactúan a través de fuerzas de corto alcance (contacto mecánico). La dinámica de un material granular, se fundamenta en la ecuación de movimiento de Newton para las coordenadas del centro de masa y los ángulos de Euler de sus partículas i , donde $i = 1, \dots, N$.

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} \vec{F}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{\varphi}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{\vec{J}_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (2)$$

Donde:

\vec{F} = Fuerza

\vec{M} = Torque

m = Masa

\vec{J} = Tensor de inercia

\vec{r} = Posición de la partícula

$\vec{\varphi}$ = Orientación angular

\vec{v} = Velocidad tangencial

$\vec{\omega}$ = Velocidad angular

En donde el cálculo de las fuerzas y torques es la parte central de cada simulación de dinámica molecular. En general, el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales acopladas (1) y (2) no puede solucionarse de forma analítica, y la solución numérica aproximada de estas se llama dinámica molecular ya que realizan el cálculo de las trayectorias de todas las partículas del sistema.

Las condiciones iniciales en este método definen el valor de las coordenadas, velocidades, ángulos de Euler y velocidades angulares. Para el caso de partículas esféricas las fuerzas de interacción son independientes de la orientación espacial de las partículas, de modo que, no se necesitan condiciones iniciales para $\vec{\varphi}$. Cabe mencionar que este modelo de partículas esféricas presenta la gran ventaja de la eficiencia numérica debido a que detecta si dos partículas presentan un contacto mecánico, y por ende, ejercen fuerzas entre sí. Para esto, es suficiente comparar la distancia de sus centros con la suma de sus radios. Esta comparación puede realizarse en dos y tres dimensiones a bajos costos computacionales así que es posible realizar simulaciones de miles de partículas, permitiendo la investigación numérica detallada de los sistemas granulares.

Al inicio, la dinámica molecular fue desarrollada con el fin de realizar simulaciones numéricas de gases moleculares y líquidos. No obstante, su uso fue evolucionando hasta el día de hoy, en donde se puede simular en cortos períodos de tiempo, un sistema de billones de partículas. La interacción de estas partículas es considerada peculiar, en consecuencia a que estas ejercen fuerzas entre sí solo cuando están en contacto mecánico. Sin embargo, dado que las partículas granulares son rígidas, su fuerza de interacción repulsiva incrementa con la compresión una vez que las partículas se encuentran en contacto. Para obtener

resultados fiables, la dureza de las partículas granulares requiere un tiempo de integración pequeño para el cálculo de trayectorias, por lo que se obtiene un método de simulación computacionalmente costoso [10].

Según [10], la simulación de la dinámica molecular se realiza de la siguiente manera:

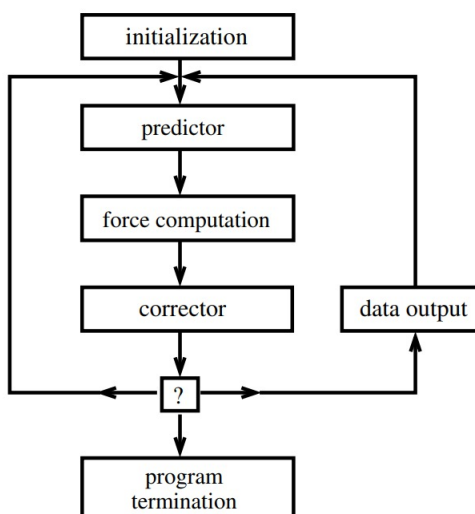


Figura 3: Diagrama del funcionamiento del algoritmo de dinámica molecular [10].

1. Initialization: De este paso se obtienen las coordenadas $(\vec{r}_i, \vec{\varphi}_i)$ de la partícula, sus derivados del tiempo y el tipo de partícula a utilizar (partícula de material granular o de pared)
2. Predictor: Se calculan las coordenadas y los derivados del tiempo de las partículas en $t + \Delta t$ como una expansión de Taylor de los valores en el tiempo presente t
3. Forces: Se seleccionan los pares de interacción y se realizan cálculos de las fuerzas de interacción por pares entre las partículas y entre las partículas y las paredes basadas en las predicciones de las coordenadas y las velocidades.
4. Corrector: Se corrige las coordenadas predichas y los derivados del tiempo utilizando las fuerzas computadas en el paso 3.
5. Data extraction: Los datos de interés se registran en un intervalo de tiempo predefinido o en ocurrencia de eventos. Aquí existen dos procedimientos fundamentales: los valores son computados por la simulación de dinámica molecular o las coordenadas y las velocidades de todas las partículas se registran en un archivo en ciertos intervalos de tiempo y los datos se procesan posteriormente.
6. Program termination: El programa finaliza en un momento predefinido o al ocurrir un evento específico, de lo contrario la simulación continúa al paso numero 2 y así sucesivamente.

Algoritmo de Verlet

El algoritmo de Verlet está basado en una propiedad dinámica de partículas en donde la relación de vecindad entre partículas cambia únicamente de forma lenta, en otras palabras, dos partículas que se encuentren cercanas una a la otra en un tiempo dado, permanecerán como vecinos cercanos al menos en los siguientes pasos de tiempo. Por lo tanto, al inicializar el algoritmo, las relaciones de vecindad se determinan (se calculan las distancias de todos los pares de partículas cercanos). Dos partículas se llaman vecinas si la distancia de sus superficies es menor que una constante predefinida: *verletdistance*. Para partículas esféricas, el criterio se ve de la siguiente forma $(|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - R_i - R_j) < \text{verletdistance}$. Para inicializar las listas eficientemente, se define una cuadrícula que cubre el área de simulación y su tamaño es más grande que la partícula más grande. Para la construcción de las listas, se consideran únicamente las partículas que se encuentren en la misma celda o en cuadrículas adyacentes, lo que garantiza la detección de todos los pares cercanos [10].

Partículas de bordes afilados compuestas por triángulos

La simulación de ciertos casos requiere modelos de partículas más realistas que una simple esfera, por lo que, la dinámica de cuerpo rígido es un método que permite la simulación realista de sistemas granulares con partículas de bordes afilados y el caso de contacto de múltiples partículas [10]. Estas partículas están compuestas por triángulos elásticos que están conectados por resortes de viga deformables. Las vigas se encuentran fijas a los centros de masa de los triángulos. Debido a este tipo de conexión, el modelo de partículas es bastante flexible, en consecuencia, se puede modelar una amplia variedad de formas de partículas, incluyendo las cóncavas.



Figura 4: Partículas de bordes afilados compuestas por diferentes cantidades de triángulos [10].

Control bilateral

Una forma de congestión es el flujo de tránsito común de paradas y arranques, y la formación de un embotellamiento fantasma es una propiedad emergente de un sistema compuesto por una cadena acoplada de automóviles con conductores. A partir de esto, se ha demostrado que la inestabilidad del tráfico intermitente se puede evitar mediante el control bilateral, que se diferencia del seguimiento de automóviles y el control de crucero adaptativo. En este tipo de control se utiliza la distancia y la velocidad relativa tanto del vehículo principal, como sobre el vehículo siguiente, y la estabilidad se puede probar matemáticamente mediante simulación [11].

En el artículo científico consultado [12], se visualiza el control bilateral de forma ma-

croscópica, por lo que se utilizan densidades y tasas de flujo. Lo que conlleva a la ecuación amortiguada en la cuál está basado el tráfico bajo control bilateral. Esta ecuación permite determinar la velocidad de propagación de las perturbaciones y la tasa de decaimiento. También es útil para ajustar los parámetros de los sistemas de control bilateral. En general, al utilizar control bilateral, cada vehículo intenta tener la mitad de la distancia entre el primer y siguiente, y estos se pueden modelar como masas conectadas por resortes y amortiguadores.

Agentes robóticos móviles

Agentes Pololu 3Pi+ 32u4 OLED

El agente Pololu 3Pi+ 32u4 OLED es un robot versátil, de alto rendimiento con un microcontrolador ATmega32U4 AVR de Microchip que mide solo 9.7 cm de diámetro. Cuenta con una interfaz USB y viene precargado con un gestor de arranque compatible con Arduino. Este dispositivo incluye codificadores de cuadratura dobles para control de posición o velocidad de circuito cerrado, sensores de línea, sensores de golpes frontales, una unidad de medición inercial completa (acelerómetro, magnetómetro y giroscopio de 3 ejes). Asimismo, cuenta con dos controladores de motor de puente H, cinco sensores de reflectancia orientados hacia abajo para seguimiento de línea o detección de bordes, sensores de impacto izquierdo y derecho a lo largo de la cara frontal del robot, una pantalla OLED gráfica de 128×64 cm, un zumbador e indicadores LED que permiten obtener retroalimentación por parte del robot [13].



Figura 5: Agente Pololu 3Pi+ 32u4 [13].

Robot AlphaBot2

AlphaBot2 es una plataforma robótica desarrollada por la empresa China Waveshare Electronics. Como se observa en la Figura No. 1, el kit comercial posee una placa de circuito impreso como base del chasis y sobre ella, una segunda placa que funciona como adaptador que es compatible con Arduino, Raspberry Pi 3 Model B y Raspberry Pi Zero W. Cabe mencionar que incluye funciones como el seguimiento de línea, evitación de obstáculos, control remoto vía Bluetooth, e incluye diferentes sensores como infrarrojo, WIFI, entre otros [14].



Figura 6: Robot Alfabot2 [14].

OptiTrack

OptiTrack es una empresa que se especializa en sistemas de captura de movimiento para diferentes aplicaciones como: animación, investigación, entre otros. Ofrecen una variedad de productos, en donde se puede encontrar un sistema de captura de movimiento completo diseñado para realizar seguimiento preciso y registro de movimiento en tiempo real en un espacio determinado. Este incluye marcadores para realizar el seguimiento de objetos o personas. Estos pueden ser activos (emisores de luz) o pasivos (retroreflectores) y son útiles en donde se requiere un seguimiento preciso en condiciones de iluminación desafiante. También incluye un conjunto de cámaras (Figura) que utilizan tecnología de seguimiento óptico, por lo que capturan imágenes de alta velocidad y resolución para rastrear marcadores, que pueden ser colocados en objetos o personas en movimiento. Con estas cámaras se obtiene la posición y orientación de estos marcadores de modo que deben colocarse de forma estratégica alrededor del área de captura [15].



Figura 7: Cámaras de alta resolución utilizadas en el sistema de seguimiento completo OptiTrack [15].

Este sistema de seguimiento completo tiene un software de captura y análisis de movimiento que permite calibrar el sistema de cámaras, configurar los marcadores, capturar los datos de movimiento en tiempo real y realizar análisis detallados. De modo que este software se utiliza para configurar y calibrar el sistema de cámaras asegurando que estas estén alineadas y que los marcadores se reconozcan con precisión en el espacio de captura. Cabe mencionar que este sistema es altamente escalable, por lo que se puede adaptar a diferentes

necesidades y tamaños de espacio [15].

Metodología

- Investigar sobre algoritmos de física granular, tomando en cuenta sus posibles aplicaciones, ventajas y desventajas de sus usos. Posteriormente, se establecerá el algoritmo a utilizar y se realizarán simulaciones en Matlab para verificar su funcionamiento en partículas y luego su funcionamiento en objetos dimensionados. De estas pruebas se obtendrán datos que indicarán cuál debería ser el comportamiento de estos objetos.
- Comprender el funcionamiento de los robots AlphaBot2 y Pololu 3Pi+ 32u4 OLED utilizando los manuales de uso y fichas de datos de los componentes que los componen, y realizar pruebas de programación para calibrar la orientación y movimiento de los robots. Asimismo, se desea probar el sistema de captura de movimiento OptiTrack implementado en el Robotat.
- Realizar pruebas de seguimiento de línea con los Agentes Alphabot2, para replicar las pruebas realizadas en 2022 por el Licenciado Juan Diego Robles y Luis Nij.
- Implementar el algoritmo de física granular seleccionado y simulado en ambos agentes robóticos en sistemas físicos. Para obtener los mismos datos que en la simulación pero ahora, tomando en cuenta un sistema físico, en donde las condiciones del entorno y de los agentes a utilizar no son ideales. Posterior, se evaluará el rendimiento físico obtenido y se comparará con el esperado por las simulaciones.
- Utilizar el Robotat, que cuenta con una plataforma de pruebas y sistema de captura de movimiento para experimentar con diferentes escenarios, tales como el tránsito fantasma y una evacuación de emergencia.

Cronograma de actividades

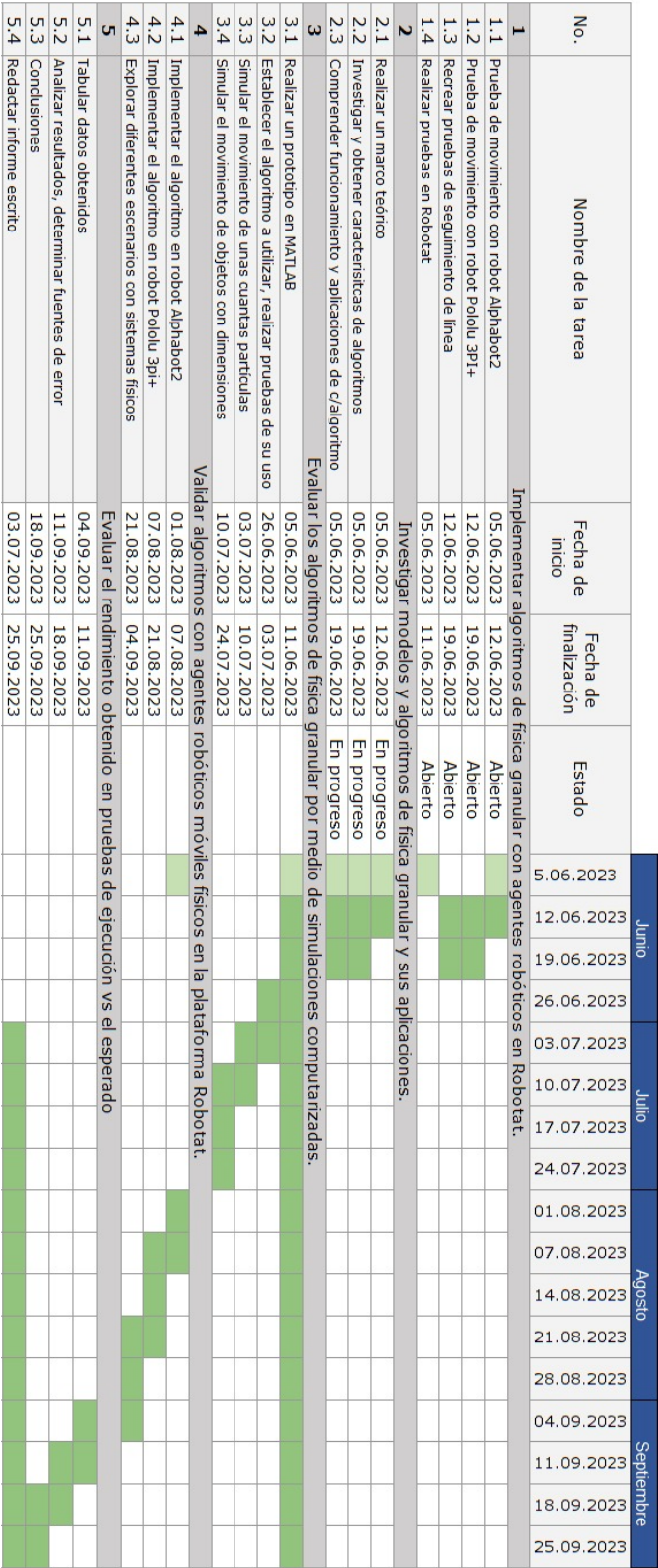


Figura 8: Cronograma de actividades para la realización del trabajo de graduación.

Índice preliminar

1. Prefacio
2. Resumen
3. Abstract
4. Introducción
5. Antecedentes
 - a)* Algoritmos de física granular
 - b)* Robotarium Georgia Tech
 - c)* Robotat
 - d)* Algoritmos de enjambre
6. Justificación
7. Objetivos
 - a)* Objetivo general
 - b)* Objetivos específicos
8. Alcance
9. Marco teórico
 - a)* Dinámica granular impulsada por eventos
 - b)* Dinámica molecular
 - c)* Dinámica del cuerpo rígido [contacto dinámico]
 - d)* Simulación de medios granulares densos
 - e)* Agentes robóticos
 - 1) Agentes Pololu 3PI+ 32u4 OLED
 - 2) Robot Alhabot2
 - f)* OptiTrack
10. Resultados
 - a)* Validación de los algoritmos de física granular
 - b)* Pruebas con los Robots Alhabots2
 - c)* Pruebas con los robots Pololu 3+pi
11. Conclusiones
12. Recomendaciones
13. Referencias
14. Anexos

Referencias

- [1] N. Sidney, "Physics of Granular state," 1992. dirección: <https://pdodds.w3.uvm.edu/teaching/courses/2009-08UVM-300/docs/others/everything/jaeger1992a.pdf>.
- [2] L. Wang y B. Horn, *On the stability analysis of mixed traffic with vehicles under car-following and bilateral control*, oct. de 2019. dirección: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/ieeeshutpages/xplore/xplore-shut-page.html>.
- [3] T. Metcalfe, 'Phantom' Traffic Jams Are Real and Scientists Know How to Stop Them, feb. de 2018. dirección: <https://www.livescience.com/61862-why-phantom-traffic-jams-happen.html>.
- [4] J. Maderer, *Robotarium: A Robotics Lab Accessible to All*, ago. de 2017. dirección: <https://news.gatech.edu/archive/features/robotarium-robotics-lab-accessible-all.shtml>.
- [5] P. Barrera, *El Robotat, el hábitat donde interactúan los robots en el CIT*, ago. de 2022. dirección: <https://noticias.uvg.edu.gt/el-robotat-el-habitat-donde-interactuan-los-robots-en-el-cit/>.
- [6] A. Tam, "Aplicaciones prácticas para algoritmos de inteligencia y robótica de enjambre," 2022. dirección: <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4256>.
- [7] D. Baldizón, "A gentle introduction to particle Swarm Optimization," 2021. dirección: <https://machinelearningmastery.com/a-gentle-introduction-to-particle-swarm-optimization/>.
- [8] A. Aguilar, "Algoritmo modificado de optimización de enjambre de partículas (MPSO)," 2019. dirección: <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3443>.
- [9] L. Nij, "Evaluación y validación de plataformas móviles para aplicaciones prácticas de robótica," 2022. dirección: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1Iluqcd77KztsevXLYBS1m8kBzAv0Sk9I>.
- [10] T. Schwager, "Computational Granular Dynamics," vol. 221, n.º 1-2, pág. 13, 2005.
- [11] B. Horn, *Driver-friendly bilateral control for suppressing traffic instabilities*, 2020. dirección: <https://toyota.csail.mit.edu/node/26>.
- [12] B. Horn, *Wave equation of suppressed traffic flow instabilities*, 2018. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8166801>.
- [13] Anónimo, *Pololu 3Pi+ 32u4 OLED robot*, 2021. dirección: <https://www.pololu.com/product/4975>.
- [14] W. Electronics, *Alphabot Robot*. dirección: <https://www.waveshare.com/product/raspberry-pi/robots/mobile-robots/alphabot-robot.htm>.
- [15] D. OptiTrack, *OptiTrack for robotics*, 2023. dirección: <https://optitrack.com/applications/robotics/>.