

Planeación de acciones usando un sistema
basado en reglas para robots de servicio
doméstico

Luis Sergio Cano Olguin

Tutor: Dr. Jesús Savage Carmona

Agradecimientos

Resumen

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Contexto y Motivación	2
1.2. Problemática: Sistemas Puramente Basados en Reglas en Entornos Dinámicos	2
1.3. Hipótesis: La Complementariedad entre Sistemas Simbólicos (CLIPS) y Subsimbólicos (ChatGPT/Qwen)	2
1.4. Objetivos	2
2. Antecedentes y Estado del Arte	5
2.1. Sistemas Basados en Reglas en Robótica: Historia y Aplicaciones	6
2.2. El Lenguaje CLIPS: Características, Ventajas y Limitaciones .	6
2.3. Enfoques Modernos: Aprendizaje Automático (ML) y Redes Neuronales en Robótica	6
2.4. Sistemas Híbridos: Combinando la Predictibilidad de las Reglas con la Flexibilidad del ML	6
3. Marco Teórico y Conceptual	7
3.1. Arquitectura de un Sistema de Planeación de Acciones Jerárquico	10
3.2. Fundamentos de los Sistemas de Producción (Rule-Based Systems)	10

3.3.	Introducción a los Modelos de Lenguaje Grande (LLMs) y ChatGPT	10
3.4.	Integración de Traductores de Lenguaje Natural con Sistemas Basados en Reglas	10
3.4.1.	Utilidad y Función de la Integración	10
3.4.2.	Funcionamiento de la Integración CLIPS-Lenguaje Natural	10
3.4.3.	Descripción de Tecnologías: CLIPS, ChatGPT y Qwen2.5-0.5B	10
3.5.	ChatGPT como Agente de Planificación Autónomo	10
3.5.1.	Capacidades de Planificación de LLMs vs. Sistemas Basados en Reglas	10
3.5.2.	Arquitectura de Planificación Dual: CLIPS y ChatGPT como Motores Complementarios	10
3.5.3.	Mecanismos de Selección y Validación de Planes	10
3.5.4.	Ventajas y Riesgos de la Planificación con LLMs en Robótica	10
4.	Metodología: Diseño del Sistema Híbrido CLIPS-ChatGPT/Qwen	11
4.1.	Diseño del Sistema Basado en Reglas con CLIPS	12
4.1.1.	Definición del Conjunto de Reglas Jerárquicas	12
4.1.2.	Priorización de Acciones Críticas y Gestión de Emergencias	12
4.1.3.	Representación del Conocimiento y Hechos en la Base de Datos de CLIPS	12
4.2.	Integración de ChatGPT/Qwen como Sistema Complementario	12
4.2.1.	Funciones Asignadas al Módulo de Lenguaje Natural .	12
4.2.2.	Protocolo de Comunicación entre CLIPS y los Modelos de Lenguaje	12

4.2.3. Mecanismos de Seguridad y Validación para las Res- puestas del LLM	12
4.3. Implementación de Planificación Dual	12
4.3.1. Diseño del Módulo de Planificación con ChatGPT . . .	12
4.3.2. Protocolos de Prompting para Generación de Planes Robóticos	12
4.3.3. Mecanismo de Selección entre Planes CLIPS vs. ChatGPT	12
4.3.4. Validación y Simulación de Planes Antes de Ejecución .	12
5. Implementación	13
5.1. Entornos de Desarrollo: Simulación y Plataforma Física	13
5.2. Implementación del Motor de Reglas en CLIPS	13
5.3. Desarrollo del Módulo de Integración	13
5.4. Configuración de la Interfaz con API de OpenAI para ChatGPT o Modelo Qwen Local	13
5.5. Casos de Prueba para Validar la Interacción entre los Módulos	13
6. Escenarios de Validación y Experimentación	15
6.1. Diseño de Experimentos en Entornos Controlados	15
6.1.1. Escenario 1: Ejecución de Tareas Predefinidas (solo CLIPS)	15
6.1.2. Escenario 2: Gestión de Órdenes Imprecisas o Novedo- sas (CLIPS + ChatGPT/Qwen)	15
6.1.3. Escenario 3: Respuesta a Eventos Inesperados o Fallos	15
6.1.4. Escenario 4: Planificación Dual para Tareas Complejas (CLIPS vs. ChatGPT)	15
6.2. Métricas de Evaluación	16
6.2.1. Métricas Cuantitativas: Tiempo de Ejecución, Tasa de Éxito, Uso de Recursos Computacionales	16
6.2.2. Métricas Cualitativas: Robustez, Interpretabilidad y Fluidez en la Interacción Humano-Robot	16

7. Análisis de Resultados	17
7.1. Comparativa del Rendimiento del Sistema Solo-CLIPS vs. el Sistema Híbrido	17
7.2. Evaluación de la Efectividad de ChatGPT/Qwen en las Diferentes Funciones Asignadas	17
7.3. Discusión de Limitaciones y Errores	17
7.4. Análisis de la Escalabilidad y el Coste Computacional de la Integración	17
8. Discusión	19
8.1. Interpretación de los Resultados en el Contexto de los Objetivos	19
8.2. Ventajas y Desventajas del Enfoque Híbrido Propuesto	19
8.3. Implicaciones para la Seguridad y Certificación en Entornos Regulados	19
8.4. Límites Éticos y Prácticos del Uso de ChatGPT/Qwen en Robótica	19
9. Contribuciones y Relevancia	21
9.1. Contribución Técnica: Marco Híbrido Escalable y Documentado	21
9.2. Relevancia Práctica: Aplicaciones en Salud, Industria y Logística	21
9.3. Relevancia Académica: Benchmark para Sistemas Rule-Based vs. Híbridos	21
10. Conclusiones y Trabajo Futuro	23
10.1. Conclusiones Principales	23
10.2. Propuestas de Trabajo Futuro	23

Índice de figuras

3.1. Arquitectura ViRoot.	8
-----------------------------------	---

Capítulo 1

Introducción

La robótica de servicio doméstico representa uno de los campos de mayor proyección en la inteligencia artificial y la automatización, con aplicaciones que van desde la asistencia a personas mayores hasta la gestión autónoma de entornos residenciales. En este contexto, la planificación de acciones —es decir, la capacidad de un robot para descomponer objetivos de alto nivel en secuencias ejecutables— es un desafío central, particularmente en entornos dinámicos y no estructurados donde interactúan humanos, objetos móviles y tareas imprevistas.

Los sistemas basados en reglas, como los implementados en motores de inferencia del tipo CLIPS, han demostrado ser robustos y predecibles en escenarios estructurados, como líneas de producción o laboratorios controlados. Su fortaleza radica en la transparencia del razonamiento simbólico y la capacidad de priorizar acciones críticas, como la evitación de colisiones o la gestión de emergencias. Sin embargo, su rigidez los hace poco adaptables ante variaciones no previstas en el entorno o ante comandos expresados en lenguaje natural con alto grado de ambigüedad o complejidad.

Recientemente, los modelos de lenguaje grande (LLMs), como ChatGPT o Qwen, han emergido como herramientas capaces de interpretar y generar lenguaje natural, e incluso de actuar como agentes de planificación autónoma.

mos. Su flexibilidad contextual permite traducir instrucciones verbales en secuencias de acciones, complementando así la solidez de los sistemas basados en reglas. No obstante, su naturaleza probabilística y la falta de garantías formales de seguridad limitan su uso directo en aplicaciones robóticas donde la integridad física y la predictibilidad son prioritarias.

Esta tesis propone un sistema híbrido de planificación de acciones que integra un motor de reglas CLIPS con modelos de lenguaje natural (ChatGPT/Qwen), aprovechando las ventajas de ambos enfoques: la previsibilidad y seguridad de CLIPS, y la adaptabilidad y capacidad de comprensión lingüística de los LLMs. El sistema se implementa y valida en el robot de servicio doméstico Justina, desarrollado en el Laboratorio de Bio-Robótica de la UNAM, utilizando ROS 2 como marco de integración.

1.1. Contexto y Motivación

1.2. Problemática: Sistemas Puramente Basados en Reglas en Entornos Dinámicos

1.3. Hipótesis: La Complementariedad entre Sistemas Simbólicos (CLIPS) y Subsimbólicos (ChatGPT/Qwen)

1.4. Objetivos

- **Diseño del Sistema Híbrido:**

- Definir un conjunto jerárquico de reglas en CLIPS para priorizar acciones críticas.

- Especificar la arquitectura de integración entre CLIPS y modelos de lenguaje natural.
- Diseñar un marco de planificación dual que permita tanto a CLIPS como a ChatGPT generar y ejecutar planes.
- Establecer protocolos de comunicación y validación entre los módulos.

■ **Implementación Técnica:**

- Integrar el motor de reglas CLIPS con ROS (Robot Operating System).
- Desarrollar el módulo de interfaz con APIs de ChatGPT o implementación local de Qwen2.5-0.5B.
- Implementar capacidades de planificación autónoma en ChatGPT mediante prompting estructurado.
- Desarrollar un mecanismo de selección y validación entre planes generados por diferentes motores.

■ **Capacidades de Interacción Natural:**

- Implementar traducción de comandos en lenguaje natural a hechos estructurados de CLIPS.
- Desarrollar mecanismos de diálogo para resolución de ambigüedades.
- Crear protocolos de retroalimentación para aprendizaje incremental.

■ **Validación Experimental:**

- Validar el sistema en escenarios realistas con el robot físico y simulaciones.

- Evaluar el rendimiento mediante métricas comparativas:
 - Tiempo de ejecución de tareas y tasa de éxito.
 - Precisión en interpretación de comandos complejos.
 - Robustez ante instrucciones ambiguas o novedosas.
- Comparar el sistema híbrido vs. abordajes puramente basados en reglas.
- Evaluar la calidad de planes generados por CLIPS vs. ChatGPT en diferentes escenarios.

Capítulo 2

Antecedentes y Estado del Arte

Se realiza una revisión comprensiva de la evolución histórica de los sistemas basados en reglas en robótica, analizando aplicaciones tradicionales y limitaciones actuales. Se examinan las características técnicas de CLIPS y se contrastan con enfoques modernos de aprendizaje automático, culminando con el estudio de sistemas híbridos que combinan la predictibilidad de las reglas con la flexibilidad del ML para entornos dinámicos.

- 2.1. Sistemas Basados en Reglas en Robótica:
Historia y Aplicaciones**
- 2.2. El Lenguaje CLIPS: Características, Ven-
tajas y Limitaciones**
- 2.3. Enfoques Modernos: Aprendizaje Automáti-
co (ML) y Redes Neuronales en Robóti-
ca**
- 2.4. Sistemas Híbridos: Combinando la Pre-
dictibilidad de las Reglas con la Flexibi-
lidad del ML**

Capítulo 3

Marco Teórico y Conceptual

Se presenta el fundamento teórico del sistema propuesto, describiendo arquitecturas de planeación jerárquica y los principios de los sistemas de producción. Se introduce el funcionamiento de los modelos de lenguaje grande y se detalla la integración de traductores de lenguaje natural con sistemas basados en reglas, estableciendo las bases tecnológicas para la implementación del sistema híbrido CLIPS-ChatGPT/Qwen y su uso en la arquitectura ViRoot descrita a continuación (ver Figura 3.1).

Arquitectura del Sistema

La arquitectura VIRBOT de Justina se organiza en cuatro capas principales:

- **Capa de Entradas**

- Procesamiento de datos de sensores internos y externos.
- Aplicación de técnicas de reconocimiento de patrones.
- Generación del estado del entorno.

- **Capa de Planificación**

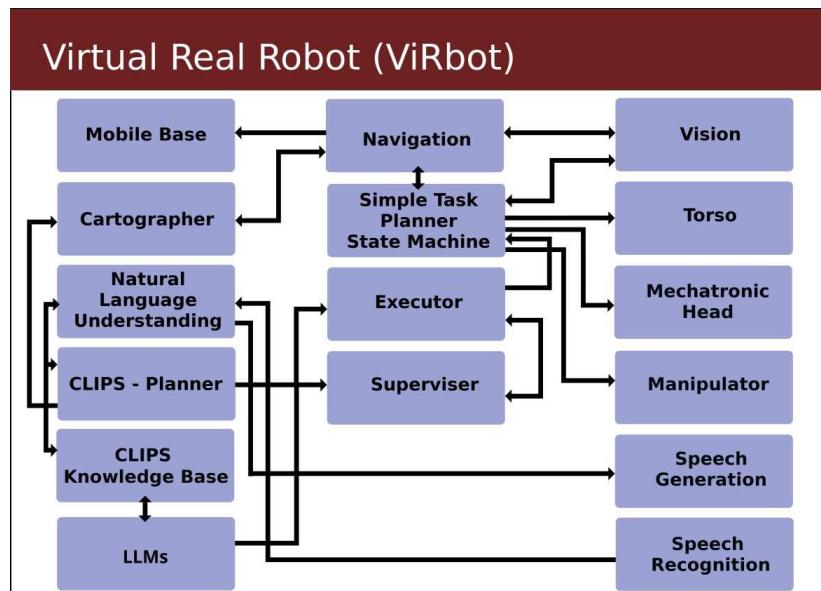


Figura 3.1: Arquitectura ViRoot.

- Validación mediante gestión del conocimiento.
- Reconocimiento de situaciones y activación de objetivos.
- Planificación de secuencias de operaciones físicas.

■ Capa de Gestión del Conocimiento

- Mapas del entorno creados con técnicas SLAM.
- Sistema de localización basado en filtro de Kalman.
- Sistema basado en reglas CLIPS para representación del conocimiento.

■ Capa de Ejecución

- Ejecución y verificación de planes de movimiento.
- Procedimientos predefinidos representados como máquinas de estado.
- Integración de procedimientos para generar planes complejos.

3.1. ARQUITECTURA DE UN SISTEMA DE PLANEACIÓN DE ACCIONES JERÁRQUICO

3.1. Arquitectura de un Sistema de Planeación de Acciones Jerárquico

Descripción del diseño escalonado del sistema de planificación, donde las decisiones de alto nivel (estrategias) se descomponen en acciones ejecutables de bajo nivel, por ejemplo ("servir la cena") se descomponen en tareas intermedias ("ir a la cocina", "tomar platos", "colocar en mesa") y finalmente en acciones primitivas ejecutables por el robot.

3.2. Fundamentos de los Sistemas de Producción (Rule-Based Systems)

Análisis teórico de los sistemas basados en reglas, centrándose en el ciclo de inferencia reconocer-actuar, el algoritmo RETE para emparejamiento eficiente de patrones. Se detalla cómo CLIPS implementa estos conceptos mediante su motor de inferencia y memoria de trabajo.

3.3. Introducción a los Modelos de Lenguaje Grande (LLMs) y ChatGPT/Qwen

Exposición de los principios arquitectónicos de los transformadores y el mecanismo de atención que fundamenta los LLMs. Se contrastan las capacidades de ChatGPT (modelo propietario) frente a Qwen2.5-0.5B (modelo open-source), destacando ventajas computacionales y de personalización para entornos robóticos.

3.4. Integración de Traductores de Lenguaje Natural con Sistemas Basados en Reglas

3.4.1. Utilidad y Función de la Integración

3.4.2. Funcionamiento de la Integración CLIPS-Lenguaje Natural

3.4.3. Descripción de Tecnologías: CLIPS, ChatGPT y Qwen2.5-0.5B

3.5. ChatGPT como Agente de Planificación Autónomo

3.5.1. Capacidades de Planificación de LLMs vs. Sistemas Basados en Reglas

Análisis comparativo de los enfoques de planificación, destacando la rigidez predecible de CLIPS frente a la adaptabilidad contextual de los LLMs.

3.5.2. Arquitectura de Planificación Dual: CLIPS y ChatGPT como Motores Complementarios

3.5.3. Mecanismos de Selección y Validación de Planes

3.5.4. Ventajas y Riesgos de la Planificación con LLMs en Robótica

Capítulo 4

Metodología: Diseño del Sistema Híbrido CLIPS-ChatGPT/Qwen

4.1. Diseño del Sistema Basado en Reglas con CLIPS

4.1.1. Definición del Conjunto de Reglas Jerárquicas

Especificación de las reglas organizadas por niveles de prioridad, donde las reglas de seguridad (evitación de colisiones, gestión de emergencias) tienen máxima prioridad sobre las operativas.

4.1.2. Priorización de Acciones Críticas y Gestión de Emergencias

Diseño de reglas específicas para escenarios de fallo y situaciones críticas, asegurando respuestas predecibles y seguras.

4.1.3. Representación del Conocimiento y Hechos en la Base de Datos de CLIPS

Estructuración del conocimiento del entorno doméstico en hechos CLIPS iniciales que sirven como base para el razonamiento.

Descripción de la base de conocimiento inicial incluye:

- *Topología del entorno:* habitaciones, conexiones, zonas navegables.
- *Taxonomía de objetos:* categorías, subcategorías, propiedades heredables.
- *Relaciones espaciales:* contención, adyacencia, orientación.
- *Capacidades del robot:* acciones posibles, restricciones físicas.

4.2. Integración de ChatGPT/Qwen como Sistema Complementario

4.2.1. Funciones Asignadas al Módulo de Lenguaje Natural

4.2.2. Protocolo de Comunicación entre CLIPS y los Modelos de Lenguaje

4.2.3. Mecanismos de Seguridad y Validación para las Respuestas del LLM

Implementación de verificaciones para asegurar que los planes generados por LLMs cumplen con constraints de seguridad y factibilidad robótica.

4.3. Implementación de Planificación Dual

- 4.3.1. Diseño del Módulo de Planificación con ChatGPT
- 4.3.2. Protocolos de Prompting para Generación de Planes Robóticos
- 4.3.3. Mecanismo de Selección entre Planes CLIPS vs. ChatGPT
- 4.3.4. Validación y Simulación de Planes Antes de Ejecución

Integración con el Robot Justina

- *Procesamiento de Entrada de Voz.*
- *Ejecución de Planes en el Entorno Físico:*
 - Mecanismos para transformar los planes publicados en los tópicos de resultados en comandos ejecutables por los actuadores del robot (navegación, manipulación de objetos, etc.)
- *Retroalimentación y Aprendizaje Incremental.*

Capítulo 5

Implementación

- 5.1. Entornos de Desarrollo: Simulación y Plataforma Física
- 5.2. Implementación del Motor de Reglas en CLIPS
- 5.3. Desarrollo del Módulo de Integración
- 5.4. Configuración de la Interfaz con API de OpenAI para ChatGPT o Modelo Qwen Local
- 5.5. Casos de Prueba para Validar la Interacción entre los Módulos

Capítulo 6

Escenarios de Validación y Experimentación

6.1. Diseño de Experimentos en Entornos Controlados

6.1.1. Escenario 1: Ejecución de Tareas Predefinidas (solo CLIPS)

6.1.2. Escenario 2: Gestión de Órdenes Imprecisas o Novedosas (CLIPS + ChatGPT/Qwen)

6.1.3. Escenario 3: Respuesta a Eventos Inesperados o Fallos

6.1.4. Escenario 4: Planificación Dual para Tareas Complejas (CLIPS vs. ChatGPT)

- Comparativa de eficiencia en generación de planes

- Evaluación de robustez ante escenarios novedosos
- Análisis de seguridad en planes generados por LLMs

6.2. Métricas de Evaluación

6.2.1. Métricas Cuantitativas: Tiempo de Ejecución, Tasa de Éxito, Uso de Recursos Computacionales

6.2.2. Métricas Cualitativas: Robustez, Interpretabilidad y Fluidez en la Interacción Humano-Robot

Capítulo 7

Análisis de Resultados

- 7.1. Comparativa del Rendimiento del Sistema Solo-CLIPS vs. el Sistema Híbrido
- 7.2. Evaluación de la Efectividad de ChatGPT/Qwen en las Diferentes Funciones Asignadas
- 7.3. Discusión de Limitaciones y Errores
- 7.4. Análisis de la Escalabilidad y el Coste Computacional de la Integración

Capítulo 8

Discusión

- 8.1. Interpretación de los Resultados en el Contexto de los Objetivos
- 8.2. Ventajas y Desventajas del Enfoque Híbrido Propuesto
- 8.3. Implicaciones para la Seguridad y Certificación en Entornos Regulados
- 8.4. Límites Éticos y Prácticos del Uso de ChatGPT/Qwen en Robótica

Capítulo 9

Contribuciones y Relevancia

- 9.1. Contribución Técnica: Marco Híbrido Escalable y Documentado**
- 9.2. Relevancia Práctica: Aplicaciones en Salud, Industria y Logística**
- 9.3. Relevancia Académica: Benchmark para Sistemas Rule-Based vs. Híbridos**

Capítulo 10

Conclusiones y Trabajo Futuro

10.1. Conclusiones Principales

10.2. Propuestas de Trabajo Futuro

- Fine-tuning de un LLM de código abierto para dominio específico
- Mejora de los mecanismos de seguridad y verificación
- Exploración de arquitecturas de integración más profundas