

Informe de Validación de la Marcha Trípode del Hexápodo

Desplazamiento de 800 mm en 2 segundos

El robot hexápodo estaba programado para avanzar **800 mm en 2 segundos** con una velocidad de 400 mm/s. Matemáticamente, esa distancia es consistente ($400 \text{ mm/s} \times 2 \text{ s} = 800 \text{ mm}$). La **simulación confirma** este desplazamiento: el resumen final indica “Distance: 800.0 mm / 800 mm (100%)”, es decir, se alcanzó el 100% de la distancia objetivo ¹. Esto demuestra que el robot efectivamente recorrió ~0.8 m en ~2 s según lo previsto, cumpliendo con la velocidad promedio estipulada. No se observan desviaciones en la distancia recorrida: el hexápodo completó exitosamente los 800 mm de traslación planificados ¹.

Diferencias entre posiciones FK e IK (Errores de Cinemática)

En la fase inicial se compararon las posiciones objetivo dadas a la cinemática inversa (IK) con las posiciones reales calculadas por la cinemática directa (FK) para varias patas, registrando el **error IK-FK** resultante. Estos errores fueron **significativos**, especialmente para las patas cuyos objetivos estaban muy alejados de la base del robot. Por ejemplo, con la **altura del cuerpo de 100 mm**, la pata 1 mostró un error de ~133.9 mm, mientras que las patas 2 y 3 tuvieron errores mucho mayores (~377.1 mm y 385.6 mm respectivamente) ². Al aumentar la **altura a 200 mm**, el error de la pata 1 subió a ~235.6 mm y los de las patas 2 y 3 alcanzaron ~429–436 mm ³. Estos valores representan diferencias de 0.13 m hasta **0.43 m**, lo cual es muy elevado.

Los **errores tan grandes no son razonables** para un sistema cinemático bien calibrado si las posiciones objetivo fueran alcanzables. En este caso, magnitudes de error de ~0.4 m sugieren que las posiciones objetivo de patas 2 y 3 estaban **fuera del espacio de trabajo alcanzable** del robot (por ejemplo, se pidieron coordenadas muy lejanas en $y=657 \text{ mm}$) ⁴ ⁵. En consecuencia, la cinemática inversa llevó a ángulos que, al aplicarlos en la cinemática directa, no llegan al objetivo deseado, evidenciando la **imposibilidad física** de alcanzar esos puntos. Un error aceptable típicamente sería del orden de milímetros; aquí el desfase de cientos de milímetros indica que las posturas objetivo de esas patas eran extremadamente exigentes (probablemente estiradas más allá de la longitud de las patas). En resumen, los errores reportados **no son despreciables ni “razonables” en magnitud**, sino indicativos de objetivos mal planteados o de la necesidad de refinar el modelo cinemático para reducir estas discrepancias.

Secuencia de marcha trípode (Patrón SWSWSW vs WSWWS)

Se verificó la implementación correcta de la **marcha trípode**, que alterna dos grupos de tres patas de forma coordinada. En el registro de simulación, la columna de “Status” muestra el patrón de apoyo **SWSWSW** (Support-Whip-Support repetido) alternando con **WSWSWS** en el transcurso del tiempo. Esto significa que inicialmente las patas en posición **S** (stance) – tres de ellas – están en contacto con el suelo, mientras las marcadas **W** (swing) – las otras tres – se encuentran en el aire avanzando. Luego intercambian roles. En efecto, desde el paso 0 se observa **SWSWSW**, y en el **paso 7** aún sigue ese patrón, mientras que en el **paso 8** el estado cambia a **WSWSWS** ⁶, indicando la conmutación de fase:

las patas que estaban en apoyo pasan a fase de transferencia y viceversa. Posteriormente, el código de fase continúa **alternándose regularmente** entre ambos patrones a lo largo de la simulación (aproximadamente cada 9–10 iteraciones, correspondiente a ~0,18–0,20 s por media fase). Esto concuerda con una marcha trípode periódica: cada medio ciclo (medio paso de la marcha) el robot cambia el trípode de apoyo. No se encontraron secuencias inválidas (por ejemplo, dos fases iguales consecutivas); **siempre se alterna** estrictamente de **SWSWSW** a **WSWSWS** y de vuelta al siguiente ciclo. En total, el robot completó unas ~5 ciclos de marcha en 2 segundos, lo cual es consistente con la distancia recorrida y la longitud de paso configurada (Paso = 80 mm, por 10 medias-fases \approx 800 mm) ⁷. En resumen, la **alternancia de apoyos típica de la marcha trípode está correctamente implementada**, logrando el patrón de movimientos sincronizados esperado entre las patas.

Evolución de ángulos articulares de las 6 patas

Al analizar los ángulos de coxa, fémur y tibia de cada pata a lo largo del tiempo, se espera ver **variaciones coherentes y físicamente plausibles** acorde con el ciclo de marcha. Idealmente, cada pata debe mover sus articulaciones de forma **suave y periódica**: levantando y avanzando durante la fase de swing, y apoyándose y retrocediendo ligeramente durante la fase de soporte. Sin embargo, del registro de ángulos se desprenden algunas **inconsistencias notables** en ciertas patas:

- **Patas 1 y 4:** Estas dos patas (una de cada trípode alterno) muestran las mayores variaciones articulares, lo cual es esperable ya que cada una lidera el movimiento en su trípode. Por ejemplo, la pata 1 (que inicia en apoyo) mantiene la coxa en $\sim 0^\circ$ pero su fémur pasa de -45° a $\sim 75^\circ$ y de regreso, y su tibia de 45° hacia $\sim 27^\circ$ ⁸, evidenciando que levantó la pierna y luego la volvió a apoyar. De manera similar, la pata 4 (del otro trípode) cambia su coxa de -65° (hacia afuera) hasta $\sim 0^\circ$, con el fémur subiendo de -45° hasta $\sim 64^\circ$ y tibia bajando de 45° a $\sim -1.6^\circ$ en el ciclo ⁸. Estas amplias variaciones son **coherentes** con un movimiento de paso completo (elevar y adelantar la pierna en swing, luego apoyarla).
- **Patas 2 y 6:** Presentan variaciones **muy reducidas**. Sus ángulos de coxa cambian levemente (p.ej., de $\sim 63^\circ$ a $\sim 55^\circ$ en la pata 2, y de -63° a -55° en la pata 6), pero sus ángulos de fémur y tibia permanecen prácticamente **constantes** en -45° y 45° respectivamente durante toda la simulación. Es decir, las patas 2 y 6 casi no flexionan ni extienden sus rodillas ni caderas en el registro, limitándose a un pequeño ajuste horizontal. Esto resulta **poco realista**, ya que en una marcha trípode esas patas deberían levantar el pie del suelo durante su fase de swing (lo que implicaría cambios notables en el ángulo del fémur/tibia). La ausencia de variación sugiere que quizá estas piernas no llegaron a ejecutar correctamente su movimiento de paso, quedando sus juntas “bloqueadas” en la posición inicial (fémur -45° , tibia 45°) mientras solo la coxa corrige ligeramente la dirección.
- **Patas 3 y 5:** Llamativamente, las patas 3 y 5 **no muestran cambio alguno** en sus tres articulaciones a lo largo de toda la simulación. Desde el inicio hasta el final, la pata 3 permanece en Coxa $\approx 65^\circ$, Fémur -45° , Tibia 45° , y la pata 5 en Coxa $\approx -65^\circ$, Fémur -45° , Tibia 45° ⁸. Estas son exactamente sus posturas iniciales de soporte, y no varían ni siquiera cuando, según el patrón de marcha, deberían haber pasado a fase de swing (por ejemplo, la pata 3 formaba parte del trípode de apoyo inicial SWSWSW y debió moverse cuando el patrón cambió a WSWSWS). El hecho de que mantengan ángulos fijos implica una **inconsistencia grave**: en términos físicos, estas patas o bien permanecieron pegadas al suelo sin avanzar (arrastrándose cuando el cuerpo se movió) o no contribuyeron al avance en absoluto. En una marcha real esto no ocurriría; cada pata eventualmente debe ejecutar la fase de transferencia.

Estas observaciones sugieren un posible **problema en la simulación o en la activación de servomotores** de ciertas patas. De hecho, el resumen final señala “Active Servos: 9/18” ¹, lo que indica que solo la mitad de los 18 servos estuvieron activos durante la marcha en un momento dado (consistente con 3 patas moviéndose mientras 3 están en apoyo). Sin embargo, esperaríamos que la activación se fuera alternando entre todos los servos conforme cambiaban las fases. El hecho de que las patas 3 y 5 nunca cambien sus ángulos sugiere que **esas juntas nunca se activaron en su turno de movimiento**, permaneciendo estáticas. Esto no es físicamente plausible para una marcha trípode completa y apunta a una posible simplificación o error en la simulación (por ejemplo, mantener patas traseras fijas, o no recalcular la cinemática de ciertas patas durante el cambio de fase).

En **conclusión**, los ángulos articulares de varias patas **no evolucionan de forma totalmente coherente** con lo esperado: si bien patas 1 y 4 muestran movimientos realistas, otras patas permanecen inactivas o con movimientos mínimos cuando deberían moverse. Este es un comportamiento atípico que rompe la simetría de la marcha trípode y sugeriría revisar la lógica de control de esas patas en la simulación. Pese a estas inconsistencias, no se observaron oscilaciones bruscas ni cambios discontinuos en las articulaciones que *sí* se movieron (sus transiciones parecen suaves temporalmente), pero la falta de movimiento en ciertas patas constituye un **punto crítico a corregir** para que la marcha trípode simulada sea físicamente verosímil en las 6 patas por igual.

1 2 3 4 5 6 7 8 log.txt
file:///file-GtXBZEbvC8JKQB25NKDAas