



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

EXTENSIÓN DE UN MOTOR DE JUEGOS CON CINEMÁTICA INVERSA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN COMPUTACIÓN

AGUSTÍN MATTHEY RAMÍREZ

PROFESOR GUÍA:
DANIEL CALDERÓN SAAVEDRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CLAUDIO GUTIÉRREZ GALLARDO
ELÍAS ZELADA BAEZA

SANTIAGO DE CHILE

2022

Resumen

La industria de los videojuegos y su comunidad, se amplían constantemente a nivel global, produciendo una alta demanda de experiencias interactivas de las que se espera cada vez más atractivo y realismo. Tradicionalmente (,y en oposición a esa expectativa), cada animación usada para dar vida a algún personaje de un juego, contiene un único movimiento o acción, que se repite inalteradamente en distintas situaciones. Por ejemplo, es usual que un personaje solo sea capaz de recorrer terrenos planos (sin elevación) de manera creíble, porque la animación utilizada fue diseñada de esa manera. No es posible crear manualmente animaciones que se adapten a todos los contextos, por lo que sistemas que modifiquen las animaciones en tiempo real para volverlas más dinámicas son muy requeridos.

Considerando este problema, se agrega un nuevo sistema al *MonaEngine* (motor de juegos simple implementado para asistir la docencia en el ramo CC-5512 Arquitectura de Motores de Juegos), llamado *Sistema de Navegación IK*, que permite adaptar animaciones estáticas y de caminar a terrenos irregulares generados mediante funciones de elevación. Las animaciones son modificadas mediante cálculos de cinemática inversa basados en el método de descenso de gradiente.

Se logra generar animaciones que se adaptan al terreno de manera básica, modificando las rotaciones de las articulaciones de las piernas del modelo articulado objetivo. Las modificaciones realizadas se basan en la información de movimiento original de la animación, extraída en un paso previo del sistema. El uso de descenso de gradiente, y la consideración del movimiento original de la animación permiten, en conjunto, lograr que las animaciones modificadas preserven la esencia de las animaciones originales.

El sistema consigue un muy buen rendimiento en cuanto a frames por segundo, pudiendo cumplir el importante requisito de ser ejecutado en tiempo real.

Las animaciones generadas tienen una calidad que se encuentra dentro de lo esperado, en cuanto a que representan de manera simple la adaptación del movimiento de caminata a un terreno irregular, pero no llegan tan lejos como para tener una “personalidad” dinámica. Es decir, no pueden por ejemplo, denotar cansancio cuando la superficie es más empinada, y presentar un balance apropiado del cuerpo.

El sistema se encarga únicamente de que los tobillos de cada personaje utilizado sean llevados a una altura adecuada en conjunto con sus caderas, para ajustar el movimiento al terreno, pero la corrección de la orientación de los pies no es considerada. Esto es repetidamente notado por los usuarios de prueba del sistema, y queda marcado como trabajo futuro.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Contexto | 1 |
| 1.2. Problema | 2 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.4. Descripción general de la solución | 4 |
| 2. Marco teórico | 6 |
| 2.1. Transformaciones espaciales | 6 |
| 2.2. Modelos articulados | 9 |
| 2.3. Mapas de altura | 9 |
| 2.4. Cinemática | 9 |
| 2.4.1. Cadenas articuladas | 9 |
| 2.4.2. Cinemática directa | 10 |
| 2.4.3. Cinemática inversa | 11 |
| 2.5. Curvas linealmente interpoladas | 12 |
| 2.6. Descenso de gradiente | 13 |
| 2.7. La caminata humana | 13 |
| 2.8. El MonaEngine | 14 |
| 2.8.1. Modelo de game objects | 14 |
| 2.8.2. Mallas geométricas | 15 |
| 2.8.3. Manejo del tiempo | 15 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8.4. Sistema de animación | 15 |
| 3. Estado del arte | 18 |
| 3.1. Métodos para resolver el problema de IK | 18 |
| 3.1.1. Métodos analíticos | 18 |
| 3.1.2. Métodos numéricos | 19 |
| 3.1.3. Métodos basados en datos | 21 |
| 3.1.4. Métodos híbridos | 22 |
| 3.2. Uso de IK para generar movimientos de locomoción bípeda | 23 |
| 4. Solución | 26 |
| 4.1. Arquitectura de la solución | 26 |
| 4.2. Clases nucleares del sistema | 26 |
| 4.2.1. IKRig | 26 |
| 4.2.2. IKAnimation | 29 |
| 4.2.3. IKChain | 30 |
| 4.3. Orientación global y sistema de referencia | 30 |
| 4.4. Tiempos del sistema | 30 |
| 4.4.1. Tiempo de animación | 31 |
| 4.4.2. Tiempo de animación extendido | 32 |
| 4.4.3. Tiempo de reproducción | 32 |
| 4.4.4. Reproducción de frames | 33 |
| 4.5. Descenso de gradiente | 33 |
| 4.6. Cinemática | 35 |
| 4.6.1. Cinemática directa | 35 |
| 4.6.2. Cinemática inversa | 35 |
| 4.7. Información del entorno | 41 |
| 4.7.1. Mapas de altura | 41 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.7.2. | EnvironmentData | 42 |
| 4.7.3. | Terrenos | 42 |
| 4.8. | Generación de trayectorias | 42 |
| 4.8.1. | Curvas linealmente interpoladas | 42 |
| 4.8.2. | Extracción de trayectorias base | 44 |
| 4.8.3. | TrajectoryGenerator | 45 |
| 4.8.4. | Trayectorias para end effectors | 46 |
| 4.8.5. | Corrección de trayectorias dinámicas | 48 |
| 4.8.6. | Trayectorias para la cadera | 50 |
| 4.8.7. | Trayectorias fijas y validación de trayectorias dinámicas | 51 |
| 4.9. | Control del sistema e interfaz de usuario | 51 |
| 4.9.1. | IKNavigationComponent | 51 |
| 4.9.2. | IKRigController | 53 |
| 4.9.3. | IKNavigationSystem | 55 |
| 4.10. | Preprocesamiento de las animaciones | 56 |
| 4.10.1. | Validación | 56 |
| 4.10.2. | Descompresión de las rotaciones | 58 |
| 5. | Validación | 59 |
| 5.1. | Rendimiento de la solución | 61 |
| 5.2. | Percepción de los usuarios | 63 |
| 6. | Conclusiones | 66 |
| 6.1. | Valoración de los resultados | 67 |
| 6.2. | Reflexiones | 69 |
| 6.3. | Trabajo futuro | 70 |
| | Bibliografía | 73 |
| | Anexo A. | 75 |

| | |
|---|-----------|
| A.1. Diagrama UML | 75 |
| A.2. Diagrama de flujo | 76 |
| Anexo B. | 77 |
| B.1. Matriz de rotación en función de un ángulo y eje arbitrarios | 77 |
| B.2. Enlace al repositorio de la solución | 77 |

Índice de Tablas

| | | |
|------|--|----|
| 4.1. | <i>Valores de referencia recolectados a lo largo de múltiples ejecuciones completas del descenso de gradiente para IK. Con $rigHeight = 189,83$.</i> | 40 |
| 4.2. | <i>Valores de referencia recolectados a lo largo de múltiples ejecuciones completas del descenso de gradiente para IK. Con $rigHeight = 28474,5$.</i> | 41 |
| 5.1. | <i>Resumen del rendimiento promedio de la solución. Milisegundos por frame para cada ejemplo de prueba.</i> | 63 |
| 5.2. | <i>Percepción de los usuarios sobre la preservación de la esencia de la animación original.</i> | 64 |
| 5.3. | <i>Percepción de los usuarios sobre la calidad de la adaptación al terreno conseguida.</i> | 64 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|------|---|----|
| 1.1. | <i>Dos poses de un modelo articulado generadas con distintas configuraciones de las articulaciones.</i> | 2 |
| 1.2. | <i>Clip de animación simplificado de un personaje corriendo. El clip tiene 5 segundos de duración y cuenta con 5 poses o muestras. Fuente: www.mixamo.com.</i> | 3 |
| 2.1. | <i>Subdivisión gráfica de una transformación espacial tridimensional en subtransformaciones, y su efecto en los distintos ejes cartesianos. Fuente: www.developer.unigine.com.</i> | 7 |
| 2.2. | <i>Rotación generada por un cuaternión, de un punto \vec{p} en un ángulo θ en torno a un eje. Fuente: https://danceswithcode.net/engineeringnotes/quaternions/quaternions.html.</i> | 8 |
| 2.3. | <i>Ejemplo de cadena articulada. Imagen basada en figura extraída de [12].</i> | 10 |
| 2.4. | <i>Ejemplos de cadenas articuladas y sus soluciones posibles. (a) No es posible alcanzar el objetivo. (b) Existe una única solución. (c) Existen múltiples soluciones (es así en la mayoría de los casos). Fuente: [1]</i> | 11 |
| 2.5. | <i>Figura humana como un conjunto de cadenas articuladas. Fuente: www.3dkingdoms.com</i> | 12 |
| 2.6. | <i>Movimiento de péndulo invertido en la caminata humana. Fuente [19]</i> | 14 |
| 3.1. | <i>Caso de cadena articulada en el que únicamente hay dos soluciones posibles para alcanzar el objetivo (x,y). Puede alcanzarse por arriba o por abajo del eje x. Se usa una solución analítica. Fuente [2]</i> | 19 |
| 3.2. | <i>Ejemplo de una iteración de CCD sobre una cadena articulada. Fuente: [1]</i> | 21 |
| 3.3. | <i>Ejemplo de una iteración de FABRIK sobre una cadena articulada. Fuente: [1]</i> | 22 |
| 4.1. | <i>Arquitectura externa en la que se inserta la solución. Diagrama basado en el presentado en la memoria original del MonaEngine [6].</i> | 27 |
| 4.2. | <i>Arquitectura interna del sistema de navegación IK.</i> | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3. | <i>Orientación en el espacio del modelo del IKRig. Fuente: https://musculoskeletalkey.com/biomechanics-of-the-spinal-motion-segment/</i> | 31 |
| 4.4. | <i>Diagrama simplificado de una animación y su animationTime, dividida en subtrayectorias como se explica en la sección 4.8.2.</i> | 31 |
| 4.5. | <i>Diagrama simplificado de una animación y su extendedAnimationTime, dividida en subtrayectorias como se explica en la sección 4.8.2.</i> | 32 |
| 4.6. | <i>Diagrama simplificado de las trayectorias generadas por TrajectoryGenerator (4.8), distribuidas a lo largo del reproductionTime. Notar el paralelismo temporal con las curvas de las figuras 4.4 y 4.5.</i> | 33 |
| 4.7. | <i>Valores por iteración de F y sus subfunciones (considerando coeficientes), para una ejecución completa de descenso de gradiente aplicado a cinemática inversa. El número de iteraciones es 23, con $rigHeight = 189,83$.</i> | 40 |
| 4.8. | <i>Valores por iteración de F y sus subfunciones (considerando coeficientes), para una ejecución completa de descenso de gradiente aplicado a cinemática inversa. El número de iteraciones es 20, con $rigHeight = 28474,5$.</i> | 41 |
| 4.9. | <i>Trayectoria dinámica (paso de la caminata), que atraviesa una porción del terreno.</i> | 48 |
| 4.10. | <i>Trayectoria dinámica corregida con descenso de gradiente.</i> | 50 |
| 4.11. | <i>Plano de rotación generado al rotar un punto \vec{P}_1 mediante un cuaternión. Fuente: https://ece.montana.edu/seniordesign/archive/SP14/UnderwaterNavigationQuaternions.html.</i> | 57 |
| 4.12. | <i>Caminata en el espacio local del IKRig, con ángulos de rotación para las articulaciones j_1 y j_2, de la cadena asociada a la pierna derecha. Fuente: https://www.dimensions.com/collection/people-walking</i> | 57 |
| 5.1. | <i>Ejemplo con un único personaje y un único terreno.</i> | 60 |
| 5.2. | <i>Ejemplo con múltiples terrenos.</i> | 60 |
| 5.3. | <i>Ejemplo con más de un personaje.</i> | 61 |
| 6.1. | <i>Ejemplo en que no se logra seguir la trayectoria objetivo (curva roja). La curva amarilla es el movimiento real del end-effector.</i> | 68 |
| 6.2. | <i>Ejemplo en que los pies del personaje se entierran en el suelo.</i> | 68 |
| A.1. | <i>Diagrama UML básico de la solución.</i> | 75 |
| A.2. | <i>Diagrama de flujo básico de la solución.</i> | 76 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

El mundo de los videojuegos es uno en constante expansión y crecimiento, que permite dar rienda suelta a la creatividad un gran número de artistas y desarrolladores en todo el planeta, y que se nutre de los avances en computación y tecnologías relacionadas con el entretenimiento. Con el pasar del los años, los videojuegos han podido evolucionar en calidad y complejidad, apoyándose en la experiencias acumuladas de obras anteriores, y en herramientas que alivianan la carga técnica que supone desarrollarlos. Una herramienta fundamental en este contexto son los *Game Engines* o Motores de Juegos, que reúnen elementos preconstruidos y reutilizables, que pueden ser usados por el desarrollador para construir su producto sin tener que partir desde cero, ahorrando una cantidad enorme de tiempo y recursos. Uno de los módulos importantes que puede proveer un Game Engine es el de animación, que da la posibilidad de imbuir de movimiento a los objetos y personajes del juego. Las animaciones de un juego pueden ser generadas de muchas maneras, cada una de las cuales tiene ventajas y desventajas. En general nos enfrentamos a trade-offs que involucran realismo, tiempo de ejecución y dificultad de implementación y/o puesta en práctica.

Actualmente, el ramo CC-5512 Arquitectura de Motores de Juegos dictado por el profesor Daniel Calderón, utiliza como apoyo a la docencia el *MonaEngine* [7], motor de renderizado 3D desarrollado por Byron Cornejo para su trabajo de título, con el profesor Calderón también como guía. Motores de nivel profesional utilizados ampliamente en la industria, como Unity y Unreal Engine dejan en claro cuánto puede llegar a crecer un motor, y la cantidad de opciones que puede llegar a proveer a los usuarios. El *MonaEngine*, al haber sido desarrollado por una sola persona a lo largo de un semestre, tiene mucho espacio para ampliarse. En particular, para este trabajo de título, se plantea extender el módulo de animaciones para permitir modificarlas en tiempo real con cinemática inversa o IK (abreviatura del inglés).

El uso de cinemática inversa para animar, como será detallado más adelante, permite dejar de lado el uso de animaciones prehechas y generar animaciones de manera versátil ajustándose al contexto. El *MonaEngine* actualmente permite animar usando un sistema de interpolación de poses, que deben se configuradas previamente, ajustando las partes móviles

de los modelos. El sistema extendido permitiría ahorrarse el trabajo tedioso de configurar poses a mano y animaría los modelos de manera automática en tiempo real, dando además una sensación de mayor de realismo a los movimientos. Se espera que la ampliación del motor sea un aporte al desarrollo de CC-5512, permitiendo ilustrar de mejor manera los contenidos relacionados con animaciones.

1.2. Problema

Como se mencionó, el MonaEngine permite generar animaciones mediante la interpolación de poses, utilizando animación basada en esqueletos. Un modelo usado en este sistema, por ejemplo una figura humanoide, se estructura mediante nodos ordenados jerárquicamente, conceptualmente interconectados por segmentos. Estos nodos, llamados articulaciones, conforman el esqueleto, y a cada uno se le puede asignar transformaciones de rotación, traslación y escalamiento. Cuando fijamos las transformaciones para cada nodo del modelo, podemos lograr una pose general determinada (Figura 1.1).

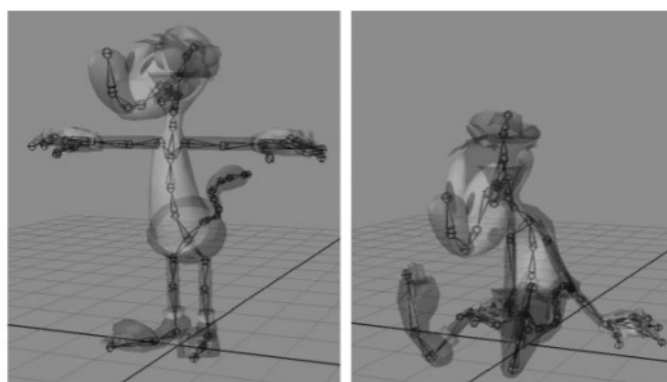


Figura 1.1: *Dos poses de un modelo articulado generadas con distintas configuraciones de las articulaciones.*

El siguiente paso, es agrupar una serie de poses que sirvan de guía para un movimiento dado. Podemos tener por ejemplo, 5 poses que marquen los puntos importantes de la acción de correr (Figura 1.2). Cada pose se asocia a un momento en el tiempo t dentro de la animación “correr“. Esta serie de poses asociadas a valores de tiempo forman un “Clip de Animación“. Si queremos obtener una pose del clip de animación en un tiempo intermedio (no asignado a una de las poses creadas), el motor se encarga de interpolar las poses adyacentes para entregar la pose adecuada.

Cada animación es, según un sistema de animación estático como el del MonaEngine, un recurso fijo, que contiene movimientos que han de usarse de manera inalterada aunque los contextos en que se usan puedan ser infinitamente variados.

El mundo de los videojuegos es uno de emociones, y de conexión con la experiencia que el creador quiere entregar a los jugadores. Es por esto que es importante contar con animaciones dinámicas, atractivas y creíbles. Esto último no es fácil de lograr si se depende únicamente de interpolación de poses prehechas, o de secuencias de imágenes importadas (sprites) para

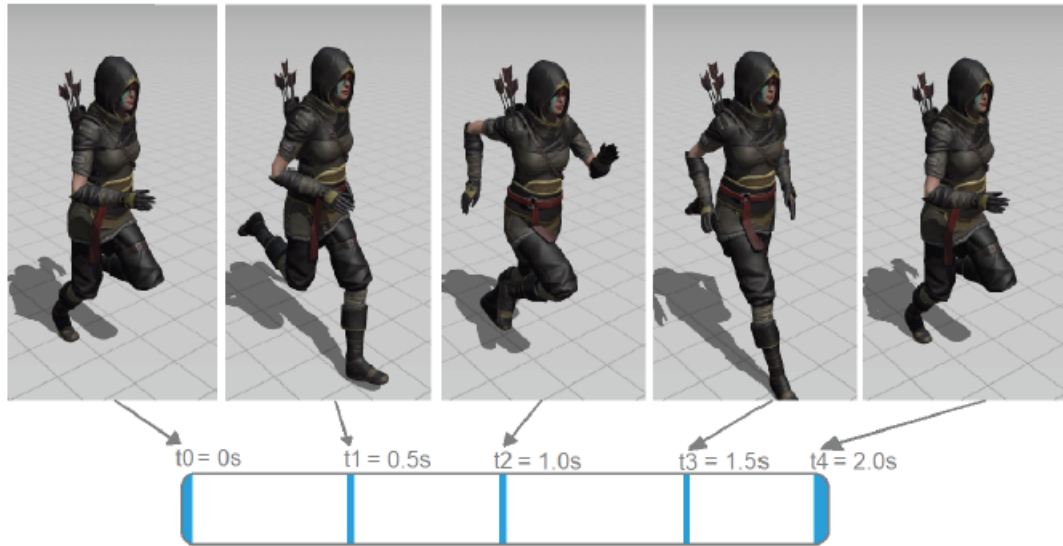


Figura 1.2: *Clip de animación simplificado de un personaje corriendo. El clip tiene 5 segundos de duración y cuenta con 5 poses o muestras. Fuente: www.mizamo.com.*

simular el movimiento de los personajes. Los recursos prehechos funcionan, pero su uso directo permite generar una cantidad muy limitada de movimientos, que no pueden ajustarse dinámicamente a distintos contextos. Los límites de lo que se puede lograr con este tipo de recursos, están dados por el tiempo que requiere generar una animación de esta manera, teniendo que ajustarse cada pose o sprite manualmente para lograr el resultado deseado. Si bien el ajuste manual da buen control, es imposible generar animaciones que se ajusten, por ejemplo, a todas las elevaciones en un terreno complejo cuando el personaje camina. Lo usual es generar una única animación más amplia, que de a entender lo que está haciendo el personaje, pero que no se comprometa con los detalles. Es así como se pierde el realismo y se desaprovecha la oportunidad de crear movimientos más atractivos para el jugador.

1.3. Objetivos

Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de título es añadir al MonaEngine la posibilidad de utilizar animaciones dinámicas que se adapten al entorno, modificadas procedimentalmente mediante cinemática inversa. Es decir, se quiere que las animaciones varíen en tiempo real, y se adecúen a las variaciones de terreno en el juego creado. Con esto se obtendrían animaciones más naturales y libres, reduciendo al mismo tiempo la carga de los desarrolladores. Se plantea trabajar sobre una animación base ingresada por el usuario, y modificarla momento a momento. Esto en oposición a generar la animación desde cero mediante IK. De esta forma, las animaciones finales generadas por el sistema serán más controladas, ya que estarán basadas en la animación input escogida. La animación base deberá ser una animación de caminar relativamente simple.

Objetivos Específicos

1. Dado un terreno (malla geométrica a la que se da forma con una función de elevación), una figura articulada humanoide, y una dirección global de movimiento, se debe poder ajustar una animación de “caminar” simple, de tal forma que las piernas de la figura articulada se adapten a las irregularidades del terreno.
2. Escoger un algoritmo de cinemática inversa adecuado, que permita ajustar la animación base en tiempo real.
3. La animación generada debe presentar un nivel de realismo y atractivo suficiente. No se espera generar un movimiento de caminata perfecto, pero se debe mantener la esencia de la animación base, y lograr transmitir la sensación de caminar en un terreno irregular. Si se mantiene la esencia de la animación base, el usuario puede tener una buena noción de como se verá la animación final generada, permitiéndole controlar mejor los resultados. Además, la idiosincrasia de la caminata en sí, está contenida en la animación original, por lo que es importante no alejarse demasiado de ella.
4. El sistema creado debe insertarse adecuadamente dentro del MonaEngine, sintiéndose como un componente más, y proveyendo una interfaz de usuario similar a los sistemas ya existentes.

Evaluación

Para medir el éxito del trabajo, lo central es evaluar la sensación que generan los resultados. Se plantea recolectar información de la percepción que tengan de las animaciones generadas, personas cercanas al mundo de los videojuegos, que los jueguen y/o desarrollen. También se debe comprobar que las animaciones puedan ser generadas en tiempo real. Si esto no se logra, no puede cumplirse el propósito de usar las animaciones en videojuegos.

1.4. Descripción general de la solución

La solución obtenida se integra en el MonaEngine en forma de un nuevo sistema, llamado *Sistema de Navegación IK*. Un game object que represente un personaje animado dentro del mundo del juego, puede utilizar el *IKNavigationComponent* para adaptar una o más animaciones a uno o más terrenos creados con funciones de elevación. Las animaciones pueden ser de tipo idle, o contener movimientos de caminata, lo que permite usar la capacidad de transición entre animaciones del MonaEngine, al mismo tiempo que las animaciones son adaptadas al terreno. El concepto para las clases base del sistema, IKRig e IKChain, está basado en las ideas presentadas por Alexander Berezhnyak, en su charla sobre animaciones procedimentales en la GDC 2016 [4].

El sistema preprocesa las animaciones, y extrae de ellas las trayectorias originales seguidas por los pies/tobillos del modelo animado. En cada iteración, esas trayectorias son ajustadas

según el terreno, y luego se utilizan para indicar posiciones objetivo a las clases encargadas de hacer los cálculos de cinemática inversa, cuyos valores resultantes son usados para modificar el clip de animación original. El usar las trayectorias originales para generar nuevas trayectorias, permite que los movimientos de los tobillos, aunque distintos, se asemejen a los de la animación base. La idea de realizar un preanálisis de la animación, y de extraer valores base, tiene similitud con el trabajo de Rune Skovbo Johansen, titulado *Automated Semi-Procedural Animation for Character Locomotion* [20]. En [4], también se describe un proceso de adaptación de las trayectorias de los tobillos al terreno, lo que da a entender que de alguna manera se toman en cuenta las trayectorias originales, pero al no haber una publicación oficial para complementar la charla, no se tiene acceso a los detalles.

Los cálculos de cinemática inversa son realizados en base a descenso de gradiente. El método de descenso de gradiente es escogido porque permite ajustar las rotaciones de las articulaciones del clip de animación, siguiendo varios criterios simultáneamente. Otros métodos se centran únicamente en llevar a las articulaciones objetivo a ciertas posiciones deseadas, pero con el descenso de gradiente es posible, por ejemplo, hacer que los valores de rotación generados tengan al mismo tiempo un parecido con los de la animación original.

Capítulo 2

Marco teórico

En las siguientes subsecciones se introducen los conceptos que dan forma a la solución presentada en este informe. Las explicaciones se dan considerando el contexto de la animación por computador y los videojuegos.

2.1. Transformaciones espaciales

Una transformación espacial [14], es una matriz que cambia la posición de un punto en el espacio. Las transformaciones pueden ser acumuladas a través de multiplicación en cadena, para finalmente transformar al punto también mediante multiplicación. En la animación computacional y los videojuegos, las transformaciones son clave, ya que se trabaja con múltiples espacios que interactúan entre si, y es necesario pasar de un espacio a otro constantemente. Una matriz de transformación espacial puede pensarse en términos de sus subtransformaciones. En este contexto, se considera que una matriz de transformación esta compuesta por una matriz de escalamiento, una de traslación y una de rotación (figura 2.1). Para entender como una transformación afectará a un punto, es importante notar que las subtransformaciones se aplican conceptualmente en orden: primero el escalamiento, luego la rotación, y finalmente la traslación.

En el presente trabajo, se trabaja principalmente con transformaciones tridimensionales, ya que el MonaEngine es un motor de juegos de renderizado 3D.

Para definir cómo se aplicará una cadena de transformaciones a un vector, debe conocerse el sistema usado para ordenar e interpretar las matrices en memoria. Existen dos sistemas principales [22]: *row-major* y *column-major*.

1. Row-major: Este es el sistema más intuitivo, en que los elementos contiguos de una matriz en la memoria pertenecen a una misma fila. Los vectores en un sistema row-major son vectores fila, y por lo tanto, son post-multiplicados por matrices. Considérense el vector fila \vec{v} de dimensiones 1×4 , y una matriz M de dimensiones 4×4 , en un sistema row-major. El vector transformado $\vec{v'}$, de dimensiones 1×4 se obtiene de la ecuación $\vec{v'} = \vec{v}M$. Para mantener el orden de aplicación de subtransformaciones planteado, si

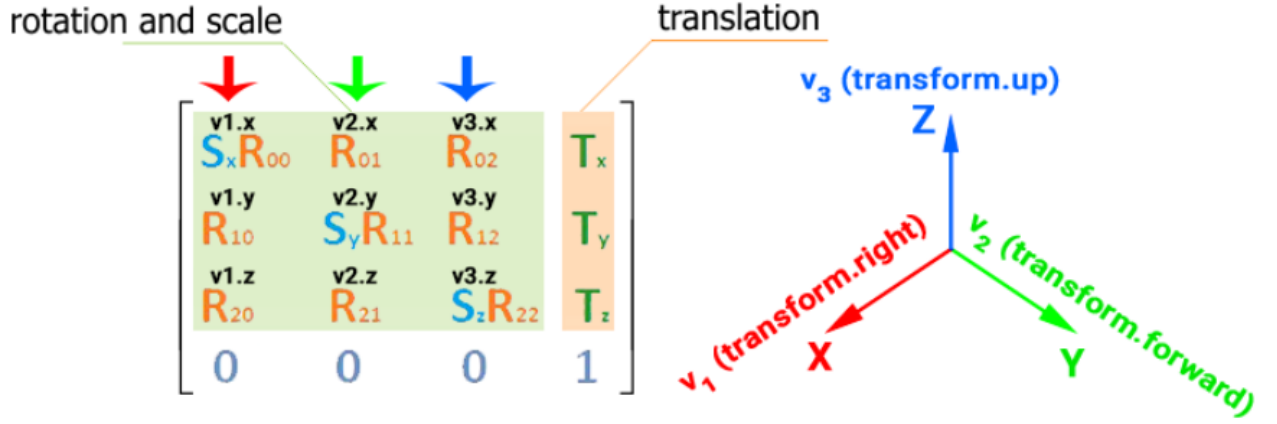


Figura 2.1: Subdivisión gráfica de una transformación espacial tridimensional en subtransformaciones, y su efecto en los distintos ejes cartesianos. Fuente: www.developer.unigine.com.

dividimos M , la ecuación queda:

$$\vec{v}' = \vec{v}SRT \quad (2.1)$$

2. Column-major: Al contrario que en row-major, los elementos contiguos en memoria se leen como columnas, y los vectores son vectores columna. Considérese ahora un vector columna \vec{v}_c de dimensiones 4×1 , y una matriz M_c de dimensiones 4×4 . M_c y \vec{v}_c son la matriz M y el vector \vec{v} respectivamente, pero interpretados según un sistema column-major. Notar que esto implica que los valores de las columnas y las filas se intercambian, por lo que se está realizando una operación de transposición. Entonces se cumple que $M_c = M^T$ y $\vec{v}_c = \vec{v}^T$. Para traspasar la ecuación 2.1 al sistema column-major, se debe transponer:

$$\vec{v}'^T = (\vec{v}SRT)^T$$

Aplicando la propiedad de la multiplicación de matrices, que indica que la transpuesta del producto es el producto de las transpuestas con los factores invertidos $(AB)^T = B^T A^T$, se obtiene:

$$\vec{v}'^T = T^T R^T S^T \vec{v}^T$$

Que equivale a:

$$\vec{v}_c' = T_c R_c S_c \vec{v}_c$$

En este informe se aplican las transformaciones espaciales según un sistema column-major. Las matrices se indexan como es usual: por filas y luego columnas.

En el caso del espacio tridimensional, las transformaciones de traslación y escalamiento se construyen a partir de vectores de tres dimensiones, $\vec{t} = \{t_1, t_2, t_3\}$ y $\vec{s} = \{s_1, s_2, s_3\}$ respectivamente. Las matrices de rotación son construidas en base a *cuaterniones* [15], particularmente cuaterniones unitarios.

Un cuaternión $q = \{q_x, q_y, q_z, q_w\}$, tiene la apariencia de un vector de 4 dimensiones, pero se comporta de forma bastante distinta. Los cuaterniones son en realidad una extensión de los números complejos. Que sea unitario, significa que q cumple que sus componentes se ajustan a la ecuación $q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 + q_w^2 = 1$. Sin entrar en mayor detalle, q puede descomponerse en

un eje de rotación \vec{a} y un ángulo de rotación θ , que juntos forman una rotación en el espacio 3D. Si se multiplica un punto \vec{p} por el cuaternión q , se le está aplicando una rotación en un ángulo θ en torno al eje \vec{a} , como se muestra en la figura 2.2.

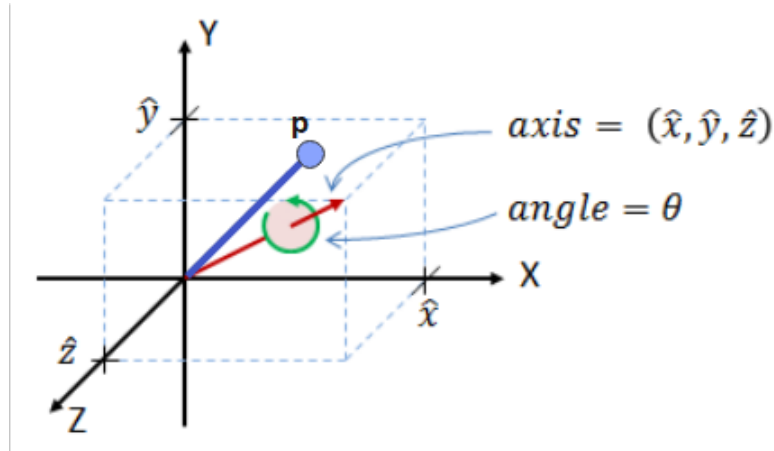


Figura 2.2: Rotación generada por un cuaternión, de un punto \vec{p} en un ángulo θ en torno a un eje. Fuente: <https://danceswithcode.net/engineeringnotes/quaternions/quaternions.html>.

Los tres espacios más importantes a considerar son:

1. Espacio local: Dado un punto p posicionado en el espacio, decimos que otro punto está en su espacio local, si su posición se especifica en relación al sistema de coordenadas generado por la transformación de p .
2. Espacio del modelo: Si tenemos un objeto o modelo m en el espacio, el espacio del modelo es el espacio más global asociado a éste, tomando en cuenta que m puede tener muchos subespacios, por ejemplo en el caso de que fuera un objeto compuesto de otros objetos, donde cada uno de ellos tiene su espacio local. Si un punto p está posicionado en relación a m , podemos decir que está en el espacio local de m y a su vez que está en el espacio del modelo de m .
3. Espacio global: El espacio global es el espacio vinculado al sistema de referencia basal. No existen otros sistemas de referencia más arriba en la jerarquía.

La aplicación de una transformación espacial, conceptualmente modifica el sistema de referencia cartesiano al que un punto está asociado. Lo que hace entonces, es transformar todo el espacio local. Si se tiene la transformación que relaciona a un sistema de referencia S con otro sistema P , es posible mover un punto del espacio local de S al espacio local de P aplicando esta transformación.

Las matrices y los vectores utilizados pertenecen a un sistema de coordenadas homogéneas, lo que explica que tengan dimensiones 4×4 y 4×1 , en lugar de 3×3 y 3×1 respectivamente. El sistema de coordenadas homogéneas permite aplicar transformaciones de traslación mediante multiplicación matricial, en conjunto con las transformaciones de escalamiento y rotación. Más información sobre este tema puede explorarse en [14].

2.2. Modelos articulados

Un modelo articulado [16], esqueleto, o *rig*, es una estructura tipo árbol, en la que cada nodo, o articulación, contiene la transformación espacial que define la relación de su propio espacio local, con el espacio local de su nodo padre. Al ser un árbol, los nodos del esqueleto pueden tener múltiples nodos hijos, pero sólo un nodo padre. Al aplicar la transformación de un nodo a un punto p que está en su espacio local, p es llevado al espacio local de su padre. Al concatenar las transformaciones en orden jerárquico, desde el nodo actual hasta la raíz del esqueleto, obtenemos la posición del nodo en el espacio del modelo, que también es el espacio local del nodo raíz. Entonces, el espacio del modelo es el espacio más cercano al espacio global. Típicamente, cada articulación es identificada con un nombre.

2.3. Mapas de altura

Un mapa de altura [13] puede definirse como una superficie de *2.5 dimensiones*. Esta definición hace referencia que el mapa de altura tiene como base un conjunto de puntos $\vec{p} = (x, y)$ que existen en un plano bidimensional, y a cada punto se le asigna un valor z , que puede ser visualizado como la altura del punto en el espacio tridimensional. Esto implica que por cada valor en el plano, existe un único punto en el espacio tridimensional. En otras palabras un mapa de altura es una función $h(x, y) = z$, donde las coordenadas x, y conforman los puntos que pertenecen al dominio bidimensional de h . Los mapas de altura tienen variadas aplicaciones, pero en este informe se utilizan para la generación de terrenos.

2.4. Cinemática

Se define la cinemática como el estudio del movimiento, sin considerar las fuerzas que lo originan. En los campos de la robótica y de la animación, donde se trabaja constantemente con modelos articulados y sus movimientos, los cálculos de posición, velocidad y aceleración de las articulaciones caen en el ámbito de la cinemática.

2.4.1. Cadenas articuladas

Una cadena articulada [3] se define como un subgrupo de articulaciones pertenecientes a un modelo articulado, que están conectadas en serie mediante segmentos. Una cadena posee una *base*, que es la denominación que se le da en este informe a la articulación que se encuentra más arriba en su jerarquía, y un *end-effector*, abreviado usualmente como *ee*, que se encuentra en el extremo opuesto (figura 2.3).

En el contexto de querer controlar los movimientos de una cadena articulada, el end-effector es la articulación que quiere llevarse a una posición objetivo, para posiblemente ejecutar alguna acción. Si consideramos un brazo humano como una cadena articulada, la mano sería

el end-effector mas obvio. De todas maneras, una subcadena puede escogerse de forma arbitraria dentro de un modelo articulado, por lo que cualquier articulación que esté al final de la cadena definida, se considera un end-effector.

Las distancias entre las articulaciones se mantienen fijas, por lo que solo se permite que la posición relativa entre ellas sea modificada mediante rotaciones.

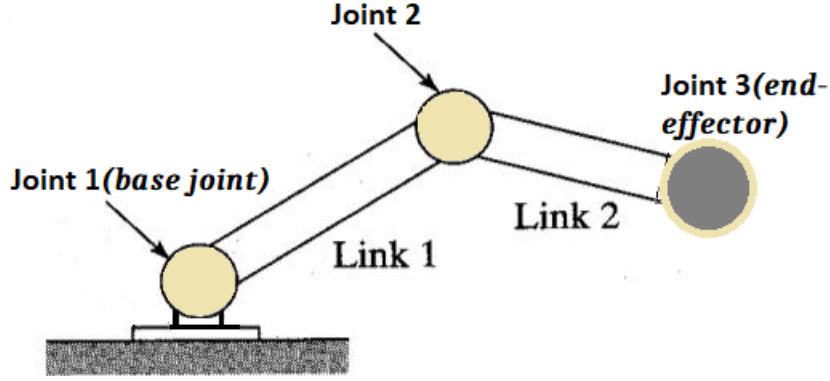


Figura 2.3: Ejemplo de cadena articulada. Imagen basada en figura extraída de [12].

2.4.2. Cinemática directa

La cinemática directa [3], o *FK* por sus siglas en inglés, es el cálculo de la posición del end-effector conociéndose los valores de rotación, traslación y escalamiento de las demás articulaciones de la cadena. Como se mencionó en 2.4.1, las posiciones relativas de las articulaciones de una cadena articulada solo pueden ser modificadas alterando sus rotaciones, por lo que conociéndose las distancias de una articulación a otra, basta con saber los ejes y ángulos de rotación momento a momento, para poder calcular la posición del end-effector.

Considérese una cadena articulada con articulaciones $j_1, \dots, j_i, \dots, j_n$, cada una con una transformación M_i asociada, donde la articulación j_1 es la base de la cadena y j_n es el end-effector. Para cada transformación M_i , variable en el tiempo, se cumple que $M_i(t) = T_i(t)R_i(t)S_i(t)$, donde T_i, R_i, S_i son las subtransformaciones de traslación, rotación y escalamiento respectivamente. T_i y S_i se mantienen fijas para mantener las distancias relativas, y R_i es variable en el tiempo, por lo que $M_i(t) = T_i R_i(t) S_i$. La posición del end-effector en el espacio padre de la base de la cadena se calcula como:

$$Pos_{ee}(t) = \left[\prod_{i=1}^n T_i R_i(t) S_i \right] \vec{p} \quad (2.2)$$

El vector $\vec{p} = \{0, 0, 0, 1\}$, es la posición del end-effector en su propio espacio local. Dado que el end-effector se encuentra en el origen de su propio sistema de referencia, aplicarle una rotación a su posición local no genera en ella ningún cambio. Para cualquier matriz de rotación R , se cumple que $\vec{p} = R\vec{p}$. Esto implica que modificar la rotación asociada al end-effector, no altera el resultado de la ecuación 2.2.

2.4.3. Cinemática inversa

Considérese una cadena articulada K con n nodos, en la que cada nodo tienen asociada una rotación modificable (considerando de 1 a 3 grados de libertad (DoF)) que afecta al segmento conectado a él. La cinemática inversa [3], o IK, es la técnica que permite determinar como debe girar cada nodo o articulación en la cadena para que su end-effector alcance una posición objetivo. Así, al contrario de la cinemática directa, que encuentra una posición objetivo para el end-effector a partir de la configuración de cada una de las rotaciones, la técnica de IK descifra cuales deben ser las rotaciones para que la posición del end-effector sea igual a la posición objetivo.

Defínase $\vec{\theta}$, como el vector que contiene un ángulo θ_i por cada articulación j_i de la cadena K , que indica cuanto ha rotado j_i desde su estado de reposo en un determinado plano de rotación. El vector $\vec{\theta}$ permite determinar completamente el estado de la cadena, teniéndose como base las distancias fijas entre las articulaciones. Con cinemática directa (FK) puede tomarse esta información rotacional, y obtenerse la posición del end-effector en el espacio de la base de la cadena. Se puede expresar entonces la posición del end-effector en función de las rotaciones de las articulaciones como $\vec{s} = f(\vec{\theta})$, usando FK. Resolver el problema de IK consiste en obtener la función inversa, tal que $f^{-1}(\vec{s}) = \vec{\theta}$. f^{-1} es una función altamente no lineal y difícil de obtener. Dependiendo de la cantidad de nodos y DoF asociados a la cadena en particular para la que se trate de resolver el problema, puede haber una solución, múltiples soluciones o incluso ninguna (figura 2.4).

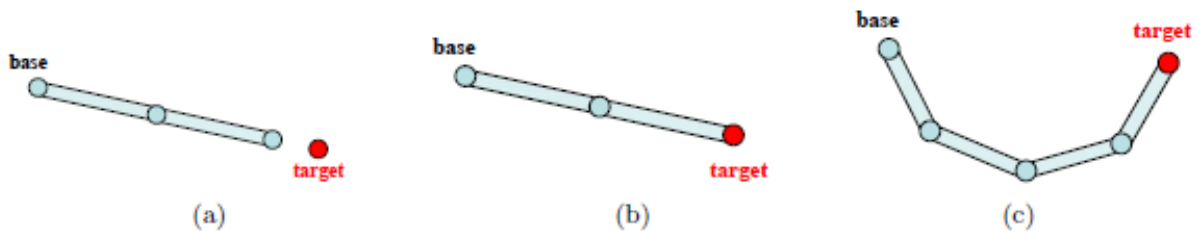


Figura 2.4: Ejemplos de cadenas articuladas y sus soluciones posibles. (a) No es posible alcanzar el objetivo. (b) Existe una única solución. (c) Existen múltiples soluciones (es así en la mayoría de los casos). Fuente: [1]

Los problemas más complejos e interesantes de IK suelen componerse de varias cadenas articuladas interconectadas. La figura humana, que es la estructura sobre la que se aplicará IK en este trabajo de título, es un ejemplo de un conjunto complejo de cadenas articuladas (figura 2.5). Las piernas del esqueleto de la figura pueden tomarse como dos cadenas articuladas, teniendo ambas el nodo pélvico (verde) como nodo base y el nodo del respectivo pie como end-effector.

Otro concepto importante que es extensamente aplicado en los cálculos de IK, es el de restricciones o *constraints* asociadas a los ángulos de rotación. En el caso de animaciones generadas con IK, se requiere limitar las magnitudes y ejes de rotación posibles para no generar poses imposibles y/o poco realistas. Por ejemplo, no es deseable que al animar un modelo humanoide, la pierna se flecte de manera que la rodilla vaya hacia atrás. Usar las constraints

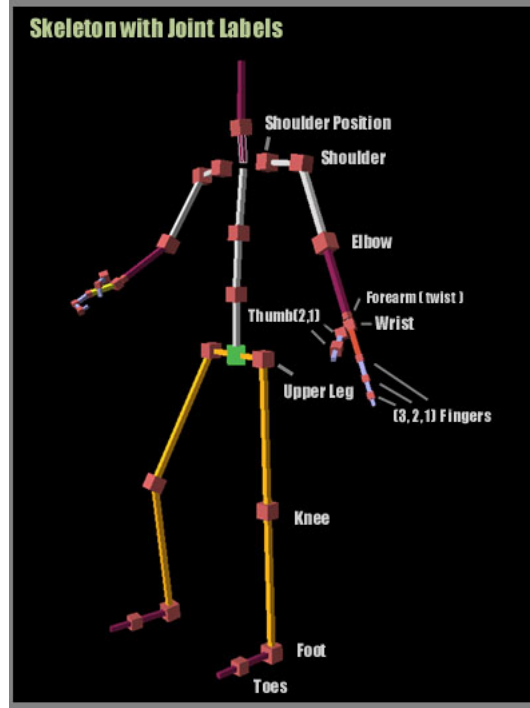


Figura 2.5: *Figura humana como un conjunto de cadenas articuladas.* Fuente: www.3dkingdoms.com

adecuadas soluciona este problema.

2.5. Curvas linealmente interpoladas

Una curva linealmente interpolada, o *LIC* como se le llama en este informe por sus siglas en inglés, es un conjunto discreto de puntos que existen en un espacio n -dimensional, donde cada punto está asociado a un valor específico de un parámetro escalar t . Una curva linealmente interpolada es en realidad una spline lineal [21]. Si una LIC l posee k puntos p_i , con sus respectivos valores del parámetro $t, t_1, \dots, t_i, \dots, t_k$, se genera un intervalo de tiempo $[t_1, t_k]$ para l . Es posible obtener un punto de la curva para cualquier instante de tiempo \hat{t} perteneciente a ese intervalo, simulando continuidad. Si se da que $\exists i \hat{t} = t_i$, entonces obtenemos directamente el punto asociado a t_i y $l(\hat{t}) = p_i$. En otro caso, buscamos el subintervalo más pequeño que contenga a \hat{t} , tal que $t_i < \hat{t} < t_{i+1}$ e interpolamos linealmente entre los puntos p_i y p_{i+1} utilizando la relación entre t_i, \hat{t} y t_{i+1} como referencia, obteniéndose que:

$$l(\hat{t}) = p_i + (p_{i+1} - p_i) \frac{\hat{t} - t_i}{t_{i+1} - t_i}$$

2.6. Descenso de gradiente

El descenso de gradiente [5] es una técnica de optimización iterativa, que permite encontrar mínimos locales en una función escalar, multivariable, y diferenciable. Si se tiene una función F , que cumple con las características anteriores, se quiere encontrar un vector $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ tal que $F(\vec{x})$ sea un mínimo local. En cada iteración debe calcularse el gradiente de F evaluado en \vec{x} :

$$\nabla F(\vec{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_i} \\ \dots \\ \frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

El gradiente de F evaluado en \vec{x} es un vector, e indica la dirección de máximo crecimiento de F . Teniendo calculado el gradiente, se actualiza el valor de \vec{x} :

$$\vec{x} := \vec{x} - \lambda \nabla F(\vec{x})$$

Un paso del descenso de gradiente consiste en mover a \vec{x} en la dirección opuesta a la dirección de máximo crecimiento local de F , aplicando un factor λ al valor del gradiente llamado *tasa de aprendizaje*, que controla la velocidad del descenso. A medida que \vec{x} se acerca a un mínimo local, las coordenadas del gradiente presentan valores más y más cercanos a 0, dado que la función se mueve a una zona más “plana”, donde los valores absolutos de las pendientes que dan valor a las derivadas parciales, son menores. El proceso se detiene al llegar a un número especificado de iteraciones, o si las coordenadas del gradiente presentan valores suficientemente cercanos a 0 según lo requerido en el caso de uso particular.

2.7. La caminata humana

La caminata humana (en su versión promedio), es definida como un movimiento de péndulo invertido. Conceptualmente, en cada paso dado, el pie de apoyo es el soporte del péndulo, la pierna conectada a ese pie es la cuerda, y la cadera es el peso oscilante. Mientras la cadera se encuentra cayendo (u oscilando), el pie opuesto al de apoyo, que se encuentra en movimiento, se aproxima al que será el próximo punto de soporte, lo que permite mantener el ciclo.

En la figura 2.6, el pie que se encuentra atrás en el movimiento, comienza el proceso de ser levantado, para seguir una trayectoria parabólica que termina en el punto de apoyo indicado con el número 2. En cada paso, el pie tiene sus velocidades mínimas de movimiento al encontrarse en torno al punto de soporte, donde se detiene por un instante.

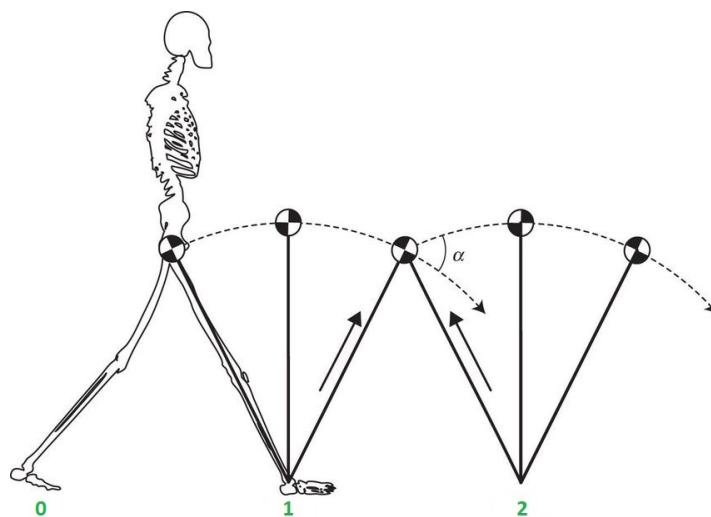


Figura 2.6: *Movimiento de péndulo invertido en la caminata humana. Fuente [19]*

2.8. El MonaEngine

El motor dentro del cual se desarrolla el trabajo de esta memoria es el MonaEngine [7], un motor simple, que tiene lo necesario para transmitir lo que es un motor de juegos y como puede estructurarse a un nivel más bien minimalista. Está escrito en C++, es multiplataforma y de código abierto. Cuenta con un sistema de audio, uno de renderizado 3D, uno de eventos, uno de física y colisiones, y uno de animación, además de un modelo de *game objects* para representar a las entidades que existen en el mundo del juego. A continuación se explican superficialmente las partes del motor relevantes para la implementación de la solución:

2.8.1. Modelo de game objects

El modelo de game objects [8] es uno basado en componentes, lo que significa que los objetos del mundo del juego se construyen ensamblando distintas piezas básicas, que le dan un conjunto de propiedades y capacidades al objeto. Algunos de los componentes que provee el motor, y que pueden ser usados por cualquier game object son: *TransformComponent*, *SkeletalMeshComponent*, *StaticMeshComponent* y *AudioSourceComponent*. Si se quiere por ejemplo, construir un game object que represente un personaje dentro del juego, tendría sentido incluir un *TransformComponent*, que guarde información sobre la posición global del objeto; un *SkeletalMeshComponent*, que guarde información sobre el modelo articulado a animar; y un *AudioSourceComponent* que le permita al personaje reproducir sonidos. Los componentes existen de forma separada, pero en muchos casos, para añadir un componente a un game object, es necesario que este tenga también otro, especificado como una dependencia en el componente que se quiere añadir. Por ejemplo, la mayoría de los componentes del sistema, requieren que el game object contenga un *TransformComponent*, porque sus propiedades dependen de la posición del game object en el espacio del mundo.

Para poder manipular una instancia de un componente en particular, desde los distintos sistemas del motor, se utiliza un identificador de tipo *InnerComponentHandle*, que permite

acceder a un puntero del componente identificado.

2.8.2. Mallas geométricas

Una malla geométrica [9] es un grafo que se utiliza para representar un objeto o modelo en el espacio. Al ser un grafo, una malla tiene un conjunto de vértices, que se conectan entre si mediante aristas. En el caso particular de las mallas, un grupo de nodos vecinos, además de los que pueden “verse” entre si (o sea que no tienen una arista que bloquee una línea imaginaria dibujada entre ellos), forman una *cara*. Las mallas se categorizan según el número de vértices que puede tener una cara. En el caso del MonaEngine, cada cara se compone de 3 vértices, por lo que las mallas utilizadas son mallas de triángulos o *triangulaciones*. Además, el MonaEngine es un motor 3D, en consecuencia, las mallas que utiliza se construyen y dibujan en un espacio tridimensional.

El motor permite la utilización de dos tipos de mallas: *StaticMesh* y *SkinnedMesh*. Las *SkinnedMesh* son mallas que pueden ser modificadas en tiempo de ejecución, y se utilizan para el proceso de animación de esqueletos, funcionando como la cubierta o volumen que constituye al modelo animado. Por otro lado, las *StaticMesh*, como su nombre lo indica, son estáticas, y las posiciones locales (en el espacio de la malla) de sus vértices se mantienen fijas. Estas mallas pueden usarse para construir objetos no animados. Al construir un game object que contenga una malla estática, debe incluirse un *TransformComponent* para guardar su transformación global, y un *StaticMeshComponent*, para guardar la instancia de la clase *Mesh* que contiene el grafo que conforma la malla a dibujar.

2.8.3. Manejo del tiempo

Cuando se ejecuta una aplicación creada con el motor, esta avanza según el tiempo transcurrido registrado por el programa. El motor funciona manteniendo un loop [8], y en cada iteración, le indica a cada uno de sus sistemas, cuánto tiempo ha transcurrido desde la iteración pasada. La mayoría de los componentes del motor dependen de este pequeño cambio de tiempo. Por ejemplo, la simulación física llevada por el motor, para comportarse de forma realista, debe tener en cuenta el paso del tiempo.

2.8.4. Sistema de animación

El sistema de animación [10] permite reproducir animaciones basadas en esqueletos (modelos articulados). En este sistema, una animación o *clip de animación*, es representada por la clase *AnimationClip*. Un *AnimationClip* está constituido por un conjunto de pistas de animación, llamadas *AnimationTracks*, una por cada articulación a animar. El esqueleto animable es representado por la clase *Skeleton*, y para poder asignarle una animación, es necesario que las pistas de animación del *AnimationClip* estén asociadas a un subconjunto de sus articulaciones. La clase *Skeleton* y la clase *AnimationClip*, guardan los nombres de sus articulaciones asociadas. Además, la clase *Skeleton*, por representar un modelo articulado,

guarda las relaciones padre-hijo entre los nodos. Estas relaciones, y en general, la forma en la que esta estructurado un grafo, se denomina la *topología* del grafo.

Sea entonces un esqueleto S con un conjunto de articulaciones J_s , y un AnimationClip A , asociable al esqueleto S . A está constituido por n AnimationTracks, cada una de las cuales está asociada a una articulación perteneciente al conjunto J_a . Se cumple que $J_a \in J_s$.

Cada AnimationTrack T_i del AnimationClip A tiene información de transformación local para su articulación asociada, teniendo un arreglo de traslaciones P_i , uno de rotaciones R_i (en formato cuaternión), y uno de escalamientos S_i . Estos tres arreglos dentro del AnimationTrack tienen un tamaño arbitrario. Cada uno de los arreglos tiene un arreglo paralelo del mismo tamaño, que contiene sus *timeStamps*, o marcas de tiempo. Cada timeStamp, indica el tiempo dentro del intervalo de duración d_A de la animación A , para el que el valor de su arreglo paralelo está destinado. En el contexto de este informe, al índice de una timeStamp se le denomina *frame*. Por lo tanto, si una animación tiene n timeStamps de rotación para una articulación j , entonces se tienen n frames asociados, que van de 0 a $n - 1$. Notar que el número de frames para distintas articulaciones no necesariamente es el mismo. También puede darse que una misma articulación tenga distinto número de frames de rotación, traslación y escalamiento.

Se desea extraer del clip de animación, una pose a asignar al esqueleto, asociada a un instante arbitrario t perteneciente al intervalo $[0, d_A]$. Para ello se recorre cada AnimationTrack, y por cada uno de sus arreglos de timeStamps tA , se busca el intervalo más pequeño tal que $tA_i \leq t \leq tA_{i+1}$. Usando las distancias relativas entre tA_i , t y tA_{i+1} , se interpola linealmente entre los valores de transformación asociados a tA_i , y tA_{i+1} , para generar un valor de transformación para t . Al final del proceso de recolección, se tiene una transformación espacial local por cada AnimationTrack. El proceso de renderizado del modelo, requiere que las transformaciones sean pasadas a espacio del modelo (y más tarde a espacio global). Tal como se indica en la sección 2.2, la concatenación de las transformaciones de las articulaciones a animar, transforma los puntos desde el espacio de las articulaciones, hasta los espacios de sus padres, y los padres de sus padres, hasta llegar al espacio de la raíz del esqueleto, o espacio del modelo.

Para construir un game object que represente a un modelo animado, se requiere un SkeletalMeshComponent, y un TransformComponent para la información de transformación global. La construcción del SkeletalMeshComponent requiere:

1. Un puntero a un clip de animación previamente asociado a un esqueleto.
2. Un puntero a una instancia de la clase SkinnedMesh, también asociada a un esqueleto, que contiene la superficie visible del modelo a ser renderizado.
3. Un puntero a una instancia de la clase *Material*, que determina como la superficie del modelo será afectada por la iluminación.

Pueden asignarse varias animaciones a un mismo esqueleto. La reproducción de un clip de animación en particular, y la transición entre distintas animaciones, es manejada por la clase *AnimationController*. Esta clase guarda un puntero al clip de animación que se está reproduciendo actualmente, y al clip de animación al que se transicionará (en caso de haberlo), llamado *CrossFadeTarget*.

El sistema de animación reproduce sus clips de animación de acuerdo al tiempo transcurrido indicado por el programa (2.8.3), pero además incluye un factor llamado *playRate* o tasa de reproducción, que determina la velocidad de reproducción de la animación en relación al avance de tiempo basal. El paso del tiempo para la animación también es regulado por la clase *AnimationController*, y es guardado en la variable *sampleTime*. *sampleTime* hace referencia al tiempo interno del clip de animación que se reproduce actualmente, que va desde 0 hasta el valor de su duración. De igual forma, la instancia de *CrossFadeTarget*, que contiene al clip de animación al que se va a transicionar, posee su propio *sampleTime*, que también va desde 0 hasta su duración total.

Capítulo 3

Estado del arte

3.1. Métodos para resolver el problema de IK

El problema de IK puede resolverse de muchas maneras, que varían en complejidad y tiempo de ejecución. La siguiente es una recopilación de esos métodos, extraída principalmente del trabajo de Aristidou y Lasenby [2]:

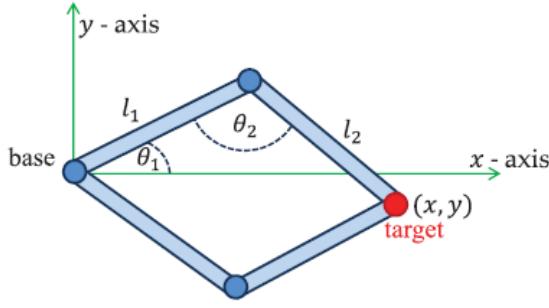
3.1.1. Métodos analíticos

Las soluciones analíticas al problema de IK consisten en funciones que entregan de manera inmediata (sin necesidad de un proceso iterativo), todas las configuraciones (conjunto de rotaciones para las articulaciones) que llevan al(los) end-effector(s) al (los) punto(s) objetivo(s). Estas funciones entregan resultados a partir de los largos de los segmentos, la configuración rotacional base, y las constraints de rotación (Ejemplo: figura 3.1).

La solución generada es global (obtenemos de una sola vez los valores para todas las articulaciones) y precisa. Por su precisión, los métodos analíticos son ideales para el campo de la robótica. La otra ventaja considerable que proveen los métodos analíticos, es que al poder llegar a la solución final de manera inmediata, son tremendamente rápidos comparados con los demás métodos.

Por muy atractivas que puedan parecer sus cualidades, los casos en que los métodos analíticos pueden ser usados son limitados. Cuando las cadenas se vuelven complejas, y además se trabaja en el espacio tridimensional, tiende a volverse extremadamente difícil, si no imposible, encontrar una solución analítica. En el caso del modelo humano, por ejemplo, que llega a tener alrededor de 70 grados de libertad en total, usar este método a nivel global no parece plausible.

También debe tenerse en consideración, que cuando los sistemas se vuelven más complejos, el resultado generado puede consistir en más de una solución, por lo que deben establecerse criterios para elegir una solución final única que se ajuste a lo requerido por el caso de uso.



$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + x^2 + y^2 - l_2^2}{2l_1\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - (x^2 + y^2)}{2l_1l_2} \right)$$

Figura 3.1: Caso de cadena articulada en el que únicamente hay dos soluciones posibles para alcanzar el objetivo (x,y) . Puede alcanzarse por arriba o por abajo del eje x . Se usa una solución analítica. Fuente [2]

3.1.2. Métodos numéricos

Los métodos numéricos trabajan aproximando soluciones. Deben ser escogidos y configurados con cuidado para evitar resultados erráticos e inconsistentes.

Recordando el planteamiento original de IK (2.4.3), se busca solucionar la ecuación $f^{-1}(\vec{s}) = \vec{\theta}$. Generalizando, $\vec{\theta}$ es el vector de rotaciones, y \vec{s} es un vector con las posiciones de un número arbitrario end-effectors. Si se considera \vec{s} como las posiciones actuales, y \vec{t} como las posiciones objetivo, se puede definir un vector de error \vec{e} , tal que $\vec{e} = \vec{t} - \vec{s}$. Se quiere usar los métodos numéricos para modificar \vec{s} , acercándolo a \vec{t} lo más posible y minimizando el error \vec{e} .

Métodos basados en la inversión del Jacobiano

Se puede escribir el jacobiano del vector θ como $J(\vec{\theta})_{ij} = (\frac{\partial s_i}{\partial \theta_j})_{ij}$. Las entradas de la matriz J pueden calcularse como $(\frac{\partial \vec{s}_i}{\partial \theta_j})_{ij} = \vec{v}_j \times (\vec{s}_i - \vec{p}_j)$, donde \vec{v}_j es el vector unitario que apunta en la dirección del eje actual de rotación de la j -ésima articulación, y \vec{p}_j es su posición actual. Además la derivada de \vec{s} con respecto al tiempo puede escribirse como $\dot{\vec{s}} = J(\vec{\theta})\dot{\vec{\theta}}$. Con esto, una pequeña variación del vector \vec{s} puede aproximarse como $\Delta\vec{s} \approx J\Delta\vec{\theta}$. La idea es elegir un vector $\Delta\vec{\theta}$ que haga que $\Delta\vec{s}$ se aproxime lo más posible a \vec{e} , logrando así un acercamiento a la posición objetivo con ese pequeño cambio. Por último, se puede obtener la variación de $\vec{\theta}$ requerida si se calcula el inverso del jacobiano J , ya que $\Delta\vec{\theta} = J^{-1}\vec{e}$. Para resolver esta ecuación en general se buscan alternativas que eviten tener que calcular la inversa directamente. Problemas comunes al usar métodos que involucren el uso del jacobiano son la aparición de singularidades, y crecimiento explosivo del valor de la función en torno a ellas. Las singularidades son zonas en el espacio de la ecuación en las cuales no es posible encontrar una variación $\Delta\vec{s}$ que genere un acercamiento al $\Delta\vec{\theta}$ buscado. El crecimiento explosivo mencionado genera variaciones erráticas en los valores de las rotaciones, lo que lleva a resultados poco creíbles en el proceso de animación. A continuación se presentan dos ejemplos (existen varios más) de reemplazantes para la inversa del jacobiano:

- i *Transpuesta del jacobiano*: Se modifica la ecuación para reemplazar J^{-1} , quedando como $\Delta\vec{\theta} = \alpha J^T \vec{e}$, donde J^T es la transpuesta de J y α es un escalar que puede calcularse como $\alpha = \frac{\vec{e} \cdot J J^T \vec{e}}{J J^T \vec{e} \cdot J J^T \vec{e}}$, siendo \cdot el producto punto. Esta solución suele requerir muchas iteraciones (cálculos consecutivos de valores pequeños $\Delta\vec{\theta}$) para acercarse de forma aceptable al objetivo \vec{t} , y es común que genere poses poco creíbles y movimientos faltos de fluidez. Estos problemas se dan principalmente cuando el objetivo está muy lejos de la posición inicial. Para evitar problemas es también ideal que el valor de α sea pequeño.
- ii *Pseudo-inversa del jacobiano*: En este caso la ecuación es $\Delta\vec{\theta} = \alpha J^{pi} \vec{e}$, donde J^{pi} es la pseudo-inversa del jacobiano o inversa Moore-Penrose. La pseudo-inversa puede calcularse como $J^{pi} = J^T (J J^T)^{-1}$. Esta solución, en caso de estar cerca de una singularidad es especialmente propensa a generar cambios drásticos en los ángulos de las articulaciones aunque el cambio en la posición del end-effector sea muy pequeño.

Descenso de gradiente

También es posible aplicar el método del descenso de gradiente descrito en 2.6, para resolver este problema. Basta para ello definir una función F a minimizar, que represente la distancia entre las posiciones actuales de los end-effectors y sus posiciones objetivo, en función de los valores de rotación de las articulaciones del modelo articulado. Puede por ejemplo, usarse la siguiente función:

$$F(\vec{\theta}) = ||\vec{s}(\vec{\theta}) - \vec{t}||^2 \quad (3.1)$$

Se explicita en la ecuación 3.1, la dependencia de las posiciones de los end-effectors hacia las rotaciones de las articulaciones. La norma usada es la norma euclidiana.

Métodos heurísticos

Estos métodos calculan una solución aproximada acercándose a ella de manera iterativa, paso a paso. Se basan en cálculos pequeños y simples que resultan en algoritmos de muy bajo costo. Dos ejemplos emblemáticos son “Cyclic Coordinate Descent“ (o CCD), y “Forward And Backward Reaching Inverse Kinematics“ (o FABRIK).

- i *CCD*: En el caso de CCD, la idea es aplicar pequeñas transformaciones a cada nodo, partiendo desde el end-effector, de tal manera de acercarse lo más posible a la posición objetivo con cada cambio. Se parte por el end-effector, que se encuentra al final de la cadena. Se llama a este nodo p_n y t a la posición objetivo. Lo siguiente es considerar los vectores $(p_n - p_{n-1})$ (vector del nodo anterior al actual) y $(t - p_{n-1})$ (vector del nodo anterior al objetivo). El paso clave consiste en modificar la rotación asociada al nodo p_{n-1} , para alinear los dos vectores recién mencionados, tal como se ve en la figura 3.2. Esto se repite hasta que p_{n-1} corresponda al nodo raíz, terminando así una iteración de CCD. Pueden llevarse a cabo tantas iteraciones como se quiera, fijando un valor de error aceptable para marcar el término del proceso.

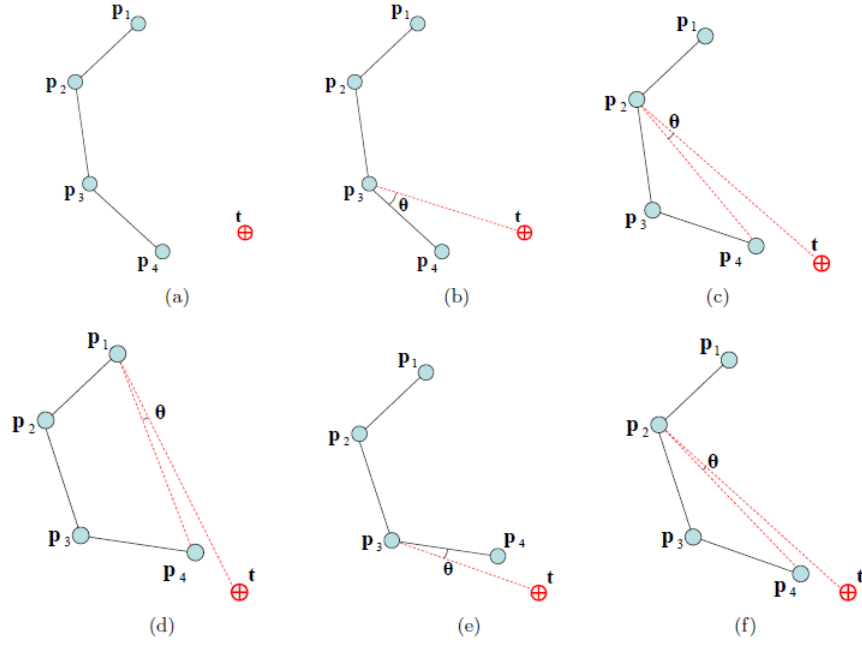


Figura 3.2: Ejemplo de una iteración de CCD sobre una cadena articulada. Fuente: [1]

- ii *FABRIK*: Supóngase que se tiene una cadena cuyos nodos tienen posiciones p_1, p_2, p_3 y p_4 , donde p_1 es la base de la cadena, que se encuentra fija, y p_4 es el end-effector que quiere llevarse a la posición objetivo t . Los largos de los tramos que unen los nodos son d_1 ($p_1 - p_2$), d_2 ($p_2 - p_3$) y d_3 ($p_3 - p_4$). Ahora, poco a poco se irán transformando las posiciones hasta obtener un resultado suficientemente bueno. Como se ve en la figura 3.3, se mueve p_4 a la posición objetivo. Luego se genera p_3' , tomando la dirección del vector $(p_3 - p_4')$ y amplificándola por d_3 . p_3' es ahora la nueva posición objetivo, y p_3 el nodo que se debe desplazar. Se repite esto hasta obtener p_1' , posicionado a distancia d_1 de p_2' en dirección $(p_1 - p_2')$, y luego desplazar p_1 . Luego se realiza el proceso en dirección opuesta, hacia el end-effector, tomando la base original de la cadena (que debe mantenerse fija) como primer objetivo. Se itera hasta obtener un resultado satisfactorio, indicando también un valor de error máximo para señalar cuando debe detenerse el algoritmo.

Ambos algoritmos son bastante rápidos dentro del mundo de los métodos numéricos (especialmente FABRIK), pero muchas veces sufren de movimientos erráticos.

3.1.3. Métodos basados en datos

Métodos basados en ejemplos

Estos métodos se basan en recolectar y utilizar una gran cantidad de poses que se ajusten al esqueleto cuyo movimiento se quiere modelar. Para el caso de la figura humana, existen muchos conjuntos de datos disponibles de manera gratuita en internet, generados mediante *motion-capture*. Las poses se parametrizan según valores como posiciones y rotaciones de

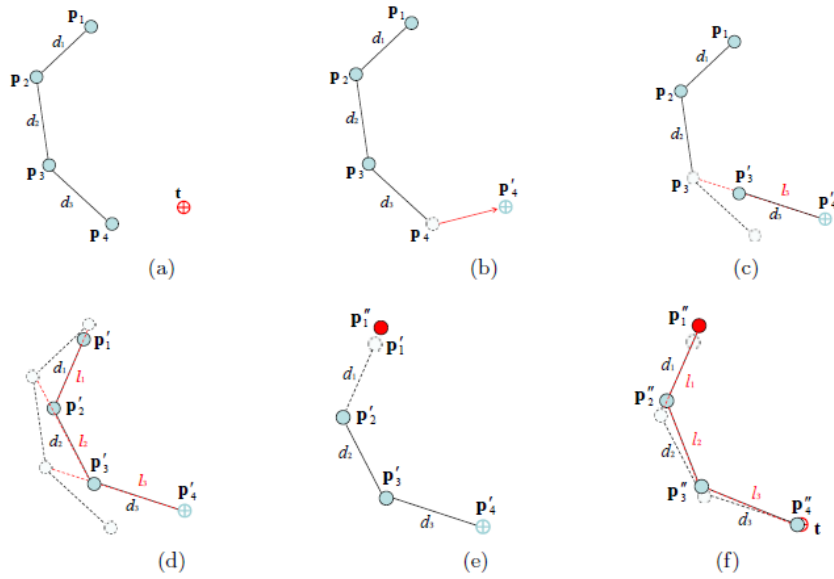


Figura 3.3: *Ejemplo de una iteración de FABRIK sobre una cadena articulada. Fuente: [1]*

articulaciones/huesos en particular. Con base en los parámetros asociados al movimiento que se quiere generar en la cadena o conjunto de cadenas, se recuperan una o varias poses del conjunto y se obtiene un resultado mediante interpolación. También se han incluido distribuciones de probabilidad sobre el espacio de poses, que permiten recuperar la pose más probable dada una serie de condiciones y constraints. Los métodos basados en datos presentan la ventaja de entregar poses realistas y plausibles de forma natural, ya que se basan en ejemplos extraídos del mundo real. Una desventaja característica es la de tender a entregar poses similares a los ejemplos con alta frecuencia, siendo por lo tanto una solución algo más restringida.

Métodos basados en redes neuronales

Al igual que en el caso del método basado en ejemplos, las redes neuronales necesitan una gran cantidad de poses como información base para ser entrenadas. En esencia, las redes neuronales son funciones, cuyos coeficientes son ajustados para minimizar una función de error. Esta función de error representa que tan lejos se está de obtener los outputs esperados para los inputs entregados. En contraste con el método anterior, la red no apunta a asignar una pose completa directamente obtenida de los ejemplos, sino que descompone las poses en movimientos simples y los asocia a ciertos parámetros. Así, con información sobre constraints y posiciones objetivo, la red puede construir una pose completamente distinta a los ejemplos entregados, basándose en las reglas generales extraídas del proceso de aprendizaje.

3.1.4. Métodos híbridos

Los métodos híbridos consisten en alguna combinación de los métodos anteriores. Por ejemplo, se ha planteado resolver el problema de IK para la figura humana, dividiéndolo

en 3 subproblemas [25]. La primera parte consiste en estimar la posición del nodo raíz del modelo, usualmente posicionado en la cadera, moviéndolo de tal manera que se satisfagan las constraints lo mejor posible, y los objetivos de los end-effectors sean alcanzables. Una vez se estima este valor, ya se tiene una primera aproximación de la pose general. El segundo paso es un ajuste de la postura del esqueleto. Puede que al posicionar el nodo raíz algunos de los objetivos sigan sin poder alcanzarse. Para solucionar esto, se reajusta el nodo raíz, modificando su posición y orientación, y además se ajusta la postura del tronco del modelo articulado. Los ajustes necesarios se realizan mediante métodos numéricos (estimativos). El paso final es el de fijar las posiciones de las extremidades. Dado que las extremidades son cadenas articuladas simples (con cantidades reducidas de nodos), a veces pueden reposicionarse mediante métodos analíticos, lo que reduce ampliamente el costo de la solución (comparándose con una que utilice exclusivamente métodos numéricos).

La ventaja de los métodos híbridos recae en su aptitud para extraer lo mejor de cada método, al aplicarlo al subproblema más adecuado. Así es posible conseguir soluciones generales más óptimas y correctas.

3.2. Uso de IK para generar movimientos de locomoción bípeda

La investigación de como simular movimientos complejos de locomoción, tales como correr o caminar, ha avanzado mucho en las últimas dos décadas, con la popularización creciente de los videojuegos y el desarrollo del campo de la robótica. Dado que el corazón de la cinemática inversa recae en ajustar valores de rotación local de articulaciones, para alcanzar una posición objetivo, toda investigación que busque adaptar un movimiento a diferentes condiciones, hace uso de ella de una manera u otra. De todas maneras, es necesario darle cierto límite a la definición de IK, estableciendo que la intencionalidad a la hora de definir una posición objetivo es importante. Por ejemplo, un movimiento tipo *ragdoll*, únicamente generado mediante simulación física, no se preocupa de posiciones objetivo para las partes del modelo articulado, y simplemente modifica la configuración del modelo en respuesta a las fuerzas presentes en la simulación.

Una exploración superficial de las publicaciones ligadas al área de animación de movimientos de locomoción, indica que en los últimos años ha sido la inteligencia artificial la que ha tomado protagonismo. Las técnicas que involucran métodos numéricos, que aparecen repetidamente en trabajos previos al año 2010, han sido reemplazadas por métodos basados en datos. Una recopilación de avances basados en deep learning fueron presentados por Gabriel State en la conferencia anual *GTC* de NVIDIA, en una charla titulada *Applications of Deep Learning for Locomotion Animation* el 2019. En ella se refuerza la noción de que pueden obtenerse muy buenos resultados aprendiendo de un set de datos conseguidos mediante motion-capture. Se expone primero, el paper titulado *Phase-Functioned Neural Networks for Character Control* [18], en el que se estudia el uso de una red neuronal para adaptar movimientos de locomoción bípedos a terrenos variados, que en tiempo de ejecución requiere la geometría del terreno, el tipo de movimiento (caminar, correr, saltar, etc.) y la fase actual del movimiento (qué porción del ciclo del movimiento está ocurriendo). La red neuronal genera movimientos muy dinámicos con excelentes transiciones entre unos y otros.

Se explica una forma de resolver el problema para cuadrúpedos (como perros, gatos, lobos, etc.) en el trabajo titulado *Mode-Adaptive Neural Networks for Quadruped Motion Control* [26]. El sistema presentado trabaja con dos redes neuronales que se apoyan mutuamente: una que predice cual será el siguiente movimiento, dado el estado actual del modelo articulado y el último estado computado; y otra que asiste a esta primera red, modificándola según cual sea el tipo de movimiento a ejecutar, basándose en conocimiento adquirido de un amplio set de datos para cada tipo de movimiento. Durante la charla, se expone también que esta solución puede aplicarse a bípedos, pero los resultados generados son de una calidad bastante menor. Como en varios casos, los resultados dejan en evidencia el problema que muchas veces acompaña a los métodos puramente basados en datos: la falta de precisión a nivel físico en cuanto a la interacción fina con superficies y objetos, y la capacidad de balancearse correctamente de los modelos. En *DeepLoco: Dynamic Locomotion Skills Using Hierarchical Deep Reinforcement Learning* [23] se describe una solución que integra la física a la locomoción generada a partir de los datos. De hecho, el objetivo planteado es el de obtener movimientos físicamente realistas y similares a los movimientos humanos, requiriendo de una cantidad relativamente baja de información de motion-capture como base. El entrenamiento de la red neuronal es realizado mediante *reinforcement learning*, que consiste en ajustar los parámetros de la red indicándole cuando genera resultados apropiados y cuando no, insertándola en un contexto en que puede tratar de resolver el problema mediante ensayo y error. Por ejemplo, se le indica al sistema que no debe permitir que el modelo articulado caiga al suelo. Dado que los movimientos se generan dentro de una simulación física, no pueden ocurrir que los pies del modelo atraviesen el piso, por ejemplo, como si es el caso del resto de los sistemas, cuando no implementan soluciones específicamente diseñadas para el problema de los pies.

Aunque el uso de inteligencia artificial parece liderar el progreso de la animación procedimental, existen métodos que se basan en las técnicas de IK del tipo numérico que también logran conseguir resultados aceptables. En una charla de la GDC del 2016, titulada *IK Rig: Procedural Pose Animation* [4], y dictada por Alexander Berezhnyak de Ubisoft, se presentan resultados bastante interesantes, que al contrario que los métodos anteriores, requieren una única animación como base. Berezhnyak presenta el IK Rig, una representación de un modelo articulado que permite recibir una animación y adaptarla a terrenos irregulares. El IK Rig está conformado por *IK Chains*, cadenas articuladas que definen las partes manipulables del esqueleto. Una de las características del sistema, es que permite que una única animación sea utilizada con una variedad de modelos articulados, que difieren en tamaño, estructura y número de articulaciones. No se explicita la técnica de cinemática inversa utilizada, pero puede deducirse que está fuera del campo de los métodos basados en datos. Para determinar el avance de un modelo articulado por el terreno, se recupera información sobre la geometría próxima en el camino, del tal forma de que puedan tomarse decisiones sobre la factibilidad de ciertos movimientos, y sobre cuál es la manera más realista de hacerlos. Las modificaciones a la animación original se realizan considerando una serie de reglas, que hacen que el personaje pueda adaptarse al entorno con un estilo particular.

Otro enfoque para adaptar animaciones a distintos contextos mediante métodos numéricos requiriendo solo unas pocas de ellas, es el de modificar las animaciones momento a momento en base a ciertos parámetros extraídos previamente. En *Automated Semi-Procedural Animation for Character Locomotion* [20], el autor extrae valores clave de las animaciones, como puntos de apoyo de los pies en el piso, y largo, rapidez y dirección de las trayectorias, entre otros. En tiempo de ejecución, se escogen combinaciones de las animaciones base (e.g. correr y caminar) según la velocidad lineal y angular del modelo, y se adaptan al terreno mediante

una técnica de cinemática inversa no explicitada, utilizando al mismo tiempo los parámetros extraídos en la etapa previa de análisis de las animaciones.

Capítulo 4

Solución

4.1. Arquitectura de la solución

El sistema de navegación IK se inserta dentro de la arquitectura [6] del ya existente MonaEngine, por lo que toma lugar como uno de sus componentes, manteniendo la estructura general del motor. Se añaden además dos librerías que tienen el propósito de asistir el proceso de depuración: *debug-draw* y *console-color*. La figura 4.1 muestra cómo se inserta la solución dentro del motor. La figura 4.2 introduce los componentes de la solución y su jerarquía. Cada una de las clases presentadas en el diagrama de la arquitectura interna, es explorada en alguna de las secciones siguientes del informe. Se incluye también un diagrama UML simple en el anexo, para presentar una relación más clara entre las clases (figura A.1).

4.2. Clases nucleares del sistema

4.2.1. IKRig

El *IKRig* (también llamado simplemente *rig* en este informe), se encarga de representar al esqueleto articulado dentro del marco del sistema IK. Por esta razón guarda un puntero al esqueleto original, y extrae de él las relaciones padre-hijo de los nodos. No obstante, el *IKRig* no es solo un contenedor para el esqueleto: su objetivo es transformarlo (y por lo tanto también al personaje humanoide al que pertenece), en una entidad que pueda desplazarse por el mundo del juego. La clase contiene para esto vectores de referencia, que indican la orientación global del rig, y su dirección de movimiento; una posición inicial global; variables de rapidez angular y ángulo actual de giro respecto de la dirección frontal de movimiento para poder modificar la orientación; e instancias de las clases *ForwardKinematics*, *InverseKinematics* y *TrajectoryGenerator*, que permiten que el desplazamiento ocurra. Dentro del *IKRig*, también se hace explícito cuáles son las articulaciones a modificar mediante IK, estando contenidas en *IKChains*, que son la implementación del concepto de cadena articulada planteado en 2.4.1. En particular al construir una instancia del *IKRig*, se guardan dos cadenas, una por

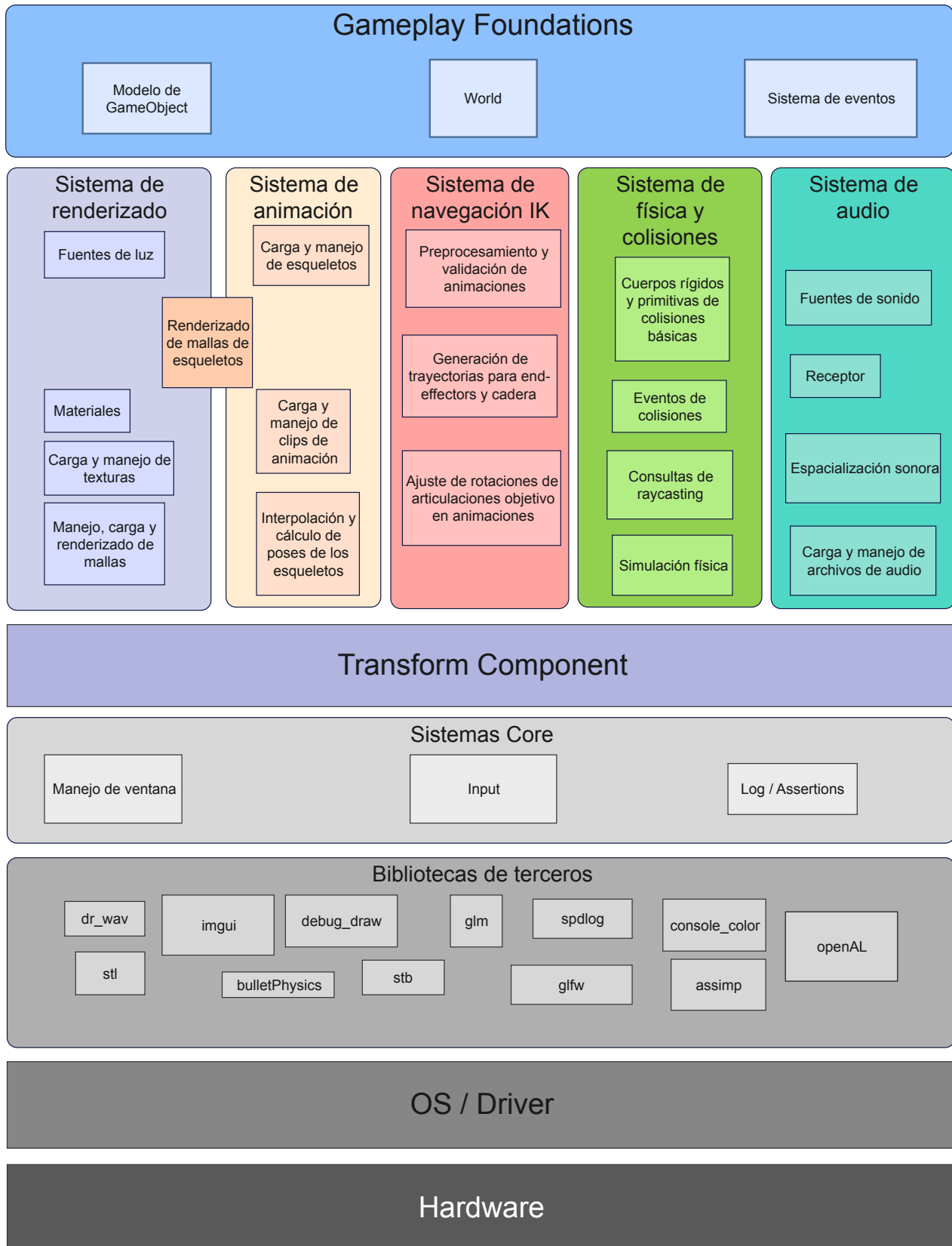


Figura 4.1: *Arquitectura externa en la que se inserta la solución. Diagrama basado en el presentado en la memoria original del MonaEngine [6].*

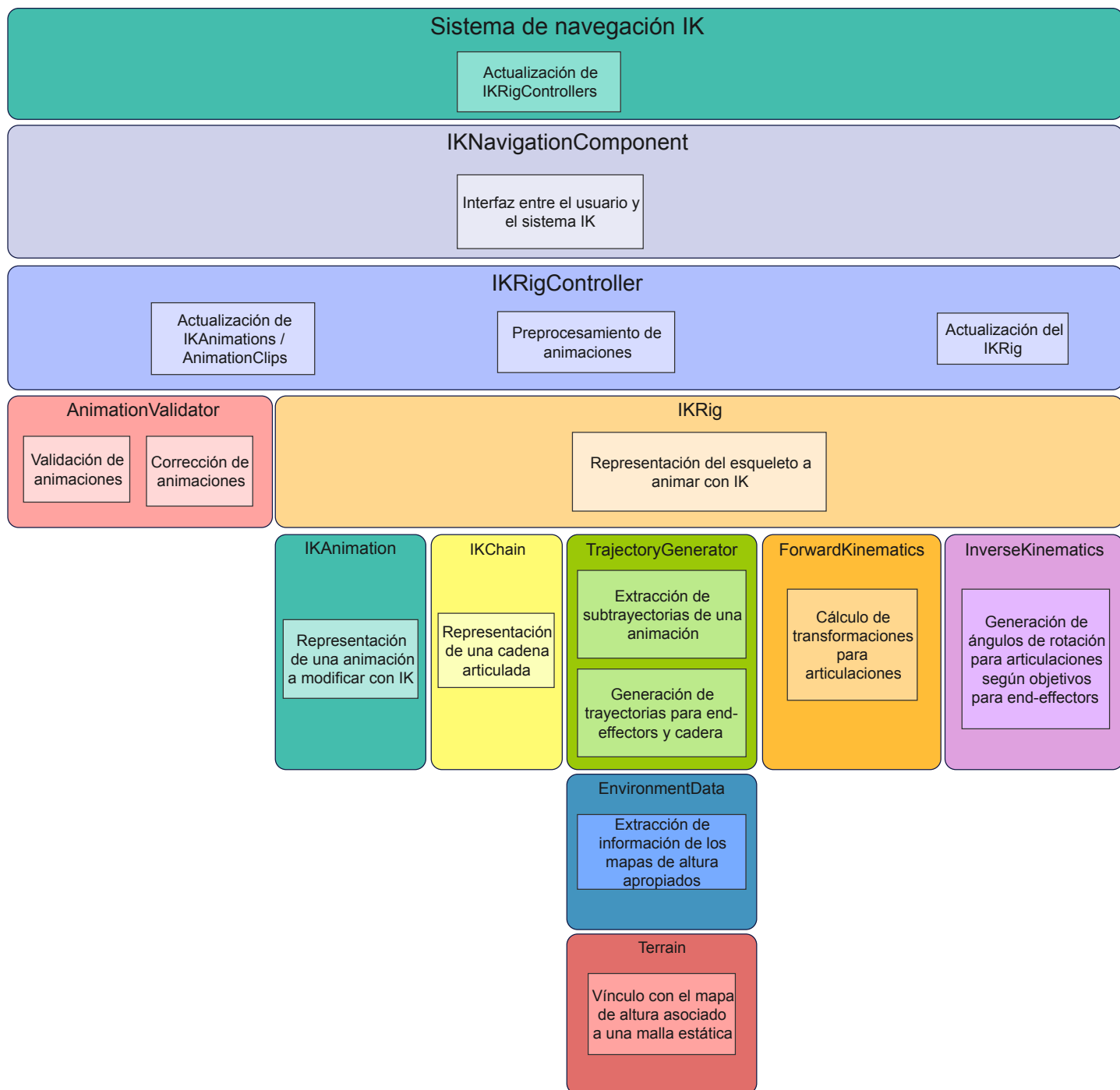


Figura 4.2: *Arquitectura interna del sistema de navegación IK.*

cada pierna del esqueleto. Además se incluye el índice de la articulación de la cadera, que es a partir de donde se controla la trayectoria global del rig; un `InnerComponentHandle` para acceder a la transformación global del game object; y la altura del esqueleto (espacio del modelo) en conjunto con su escala global, para tener una noción de distancia relativa. Por último, el `IKRig` contiene una lista de `IKAnimations`, cuya función se explica a continuación.

4.2.2. IKAnimation

Al igual que el `IKRig` es el símil del esqueleto dentro del sistema IK, una `IKAnimation` representa a un clip de animación. Esta clase se comporta como una configuración del `IKRig`, que se adapta a un clip en particular, y es la clase más voluminosa del sistema. Se incluye información sobre las trayectorias originales de los end-effectors y de la cadera (que se extraen del clip (4.8.2)), y también de las que estos deben seguir momento a momento para adaptarse al terreno. Las clases `ForwardKinematics` e `InverseKinematics`, que son introducidas más adelante, realizan sus cálculos en base a una instancia particular de `IKAnimation`, obteniendo del puntero al `AnimationClip` base (que esta clase contiene), la información de transformaciones espaciales de las articulaciones del esqueleto que son animadas en el clip. Se realiza una separación entre información de transformaciones original, que no es modificada, y la información variable, que es actualizada por el sistema IK. En particular, las traslaciones y los escalamientos del clip de animación, se mantienen fijos. Los ángulos de las rotaciones en el clip son alterados constantemente para ajustar las posiciones de los end-effectors, por lo que se guarda una copia de las rotaciones originales, que es útil en caso de necesitar reiniciar la animación, además de ser requerido por la clase `InverseKinematics`. También existe un arreglo dedicado a almacenar rotaciones variables arbitrarias, que se usan para realizar cálculos necesarios para el ajuste con IK. Un historial de ángulos calculados en el pasado reciente también es mantenido para ser usado por FK e IK.

La otra función de una `IKAnimation`, es la de llevar registro del tiempo de reproducción de la animación, y del frame que está siendo reproducido. Para que la generación de trayectorias mantenga una temporalidad coherente, debe establecerse una línea de tiempo desde que empezó a reproducirse la animación, lo que se logra llevando la cuenta en el *reproductionTime*. Por otro lado, la animación tiene su propio tiempo interno, que va desde 0 hasta la duración de la animación. Este tiempo se denomina *animationTime*, y es necesario para determinar que parte de la animación se está reproduciendo. `IKAnimation` mantiene una relación entre estos dos tiempos, pudiendo pasar de uno al otro según sea necesario.

Al generar trayectorias, si se quiere puede realizarse una validación básica de la trayectoria generada. Si la trayectoria no es válida, se fija la animación, estableciéndose los mismos valores de rotación para todos los frames para que el movimiento se detenga. El frame que se replica en el resto de la animación, llamado *fixedMovementFrame*, también se almacena en esta clase.

Por último, se especifica el tipo de clip de animación guardado en la `IKAnimation`, que puede ser *WALKING* o *IDLE*, lo que determina cómo será manejada la animación por el sistema.

4.2.3. IKChain

IKChain es la implementación del concepto de cadena articulada. Una IKChain, tiene un nombre, que hace referencia a la parte del esqueleto a la que pertenece (e.g.: leftLeg); un arreglo con los índices de las articulaciones que conforman la cadena, ordenadas jerárquicamente; el índice de la articulación padre de la cadena en la jerarquía, que permite conectar la cadena con el resto de la topología directamente; un puntero a la IKChain *opuesta* (e.g. pierna derecha, en el caso de la pierna izquierda), lo que es útil para cálculos que requieran posiciones relativas entre cadenas; y el objetivo actual, por cada IKAnimation, al que debe ser llevado el end-effector de la cadena. Las articulaciones de la cadena son las articulaciones cuyos ángulos de rotación pueden ser modificados por IK. Como se explica en 2.4.2, la rotación del end-effector no tiene efecto en su posición, por lo que su ángulo no se modifica. Debe tenerse en cuenta que la posición del end-effector se maneja en el espacio del modelo, y no en el espacio de la base de la cadena, por lo que las articulaciones superiores en la jerarquía, de haberlas, también se utilizan en los cálculos.

En esta solución se construyen dos cadenas, una por cada pierna. Para cada cadena, el end-effector se encuentra aproximadamente a la altura del tobillo. Cada vez que se hace mención a end-effectors a lo largo de la sección de la solución en este informe, se está hablando de esas articulaciones en particular.

4.3. Orientación global y sistema de referencia

El IKRig se orienta en su espacio local (2.1), de forma que mira en la dirección $+Y$, y el vector que conecta los pies con la cabeza apunta en la dirección $+Z$, como aparece en la figura 4.3.

La posición y orientación del IKRig son únicamente modificadas a nivel global, mediante cambios al TransformComponent del game object al que está asociado el rig. Por lo anterior, localmente, el IKRig (más precisamente la raíz del esqueleto asociado) no sufre ningún cambio de orientación o posición.

Los cambios en la orientación global, están limitados a la rotación del vector front $\vec{V}_f = \{0, 1, 0\}$, en un ángulo *rotationAngle* contenido en el IKRig. Esto implica que el vector up $\vec{V}_z = \{0, 0, 1\}$ global se mantiene constante, ya que solo es posible la rotación en el plano XY.

4.4. Tiempos del sistema

Como se adelantó en 4.2.2, el tiempo del sistema debe avanzar de manera coherente, y para ello debe llevarse un registro adecuado de en qué momento del tiempo se está. Para el ordenamiento temporal se definen tres tipos de tiempo:

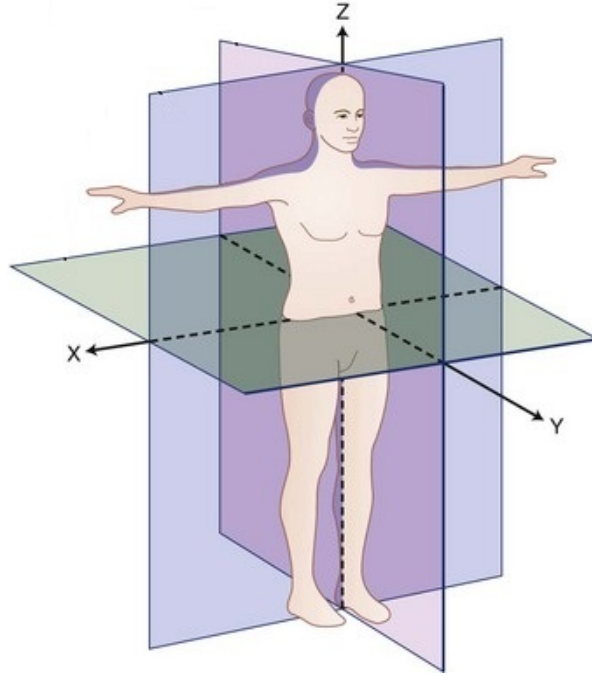


Figura 4.3: Orientación en el espacio del modelo del IKRig. Fuente: <https://musculoskeletalkey.com/biomechanics-of-the-spinal-motion-segment/>

4.4.1. Tiempo de animación

El *animationTime*, es el tiempo interno de una animación, e indica cual es la porción de ella que se está reproduciendo actualmente. El valor del *animationTime* t_a pertenece al intervalo $[0, d_A]$, donde d_A es la duración del clip de animación. El *animationTime* es

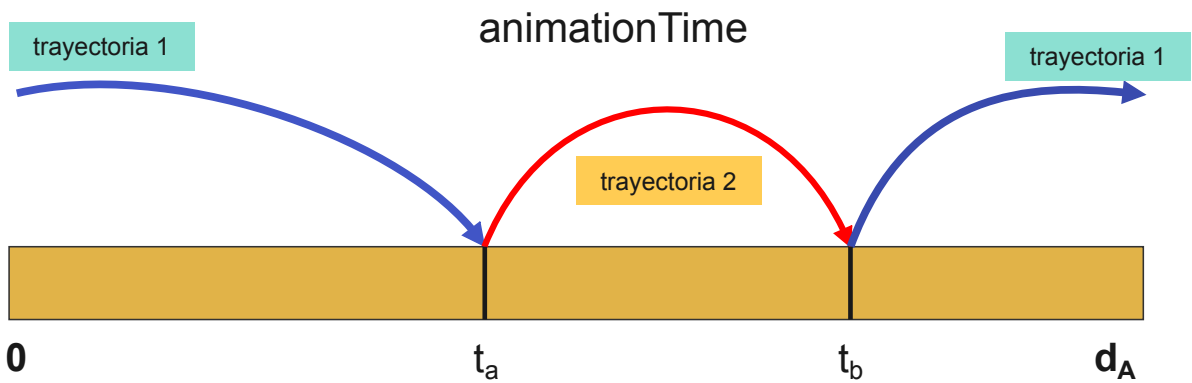


Figura 4.4: Diagrama simplificado de una animación y su *animationTime*, dividida en sub-trayectorias como se explica en la sección 4.8.2.

equivalente al *sampleTime* llevado por la clase *AnimationController* 2.8.4 y al *sampleTime* de *CrossFadeTarget*.

4.4.2. Tiempo de animación extendido

Como su nombre lo dice, el *extendedAnimationTime*, es el tiempo de la animación en su versión extendida. Se considera que el intervalo de tiempo de *animationTime* se amplía en ambas direcciones, repitiéndose la duración de la animación d_A un número arbitrario de veces. A pesar de que se trabaje con un intervalo extendido, la información a la que se hace referencia dentro del clip es la misma. Se puede imaginar que el clip se está repitiendo sin cambios una y otra vez.

Para todo *extendedAnimationTime* $tExt_a$, existe un *animationTime* t_a que hace referencia a la misma información del clip de animación. Para pasar de *extendedAnimationTime* a *animationTime* se consideran tres casos:

1. $tExt_a < 0$: En este caso se suma d_A a $tExt_a$ tantas veces como sea necesario para dejarlo en el intervalo $[0, d_A]$
2. $d_A < tExt_a$: De forma análoga, se resta d_A a $tExt_a$ tantas veces como sea necesario para dejarlo en el intervalo $[0, d_A]$
3. $0 \leq tExt_a \leq d_A$: No es necesario hacer ningún cambio.

La utilidad de *extendedAnimationTime* queda más clara en la sección 4.8.2.

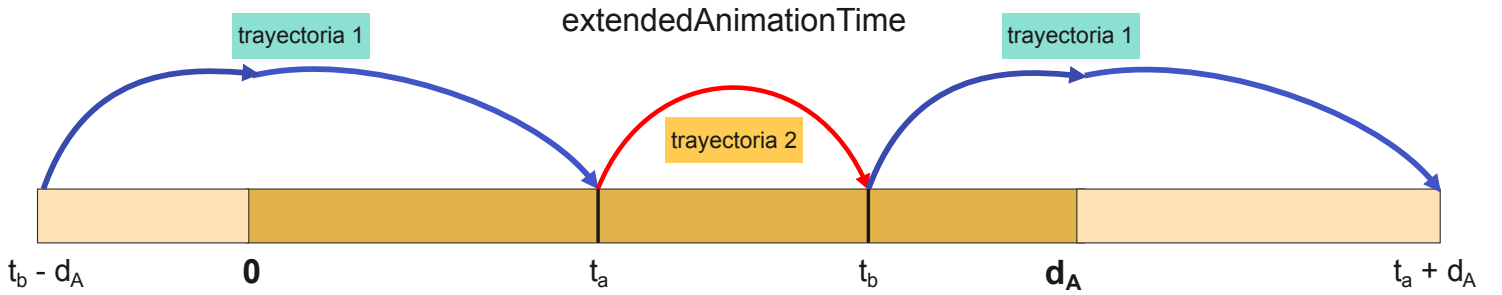


Figura 4.5: Diagrama simplificado de una animación y su *extendedAnimationTime*, dividida en subtrayectorias como se explica en la sección 4.8.2.

4.4.3. Tiempo de reproducción

El *reproductionTime*, es el tiempo que avanza constantemente desde que comienza la ejecución. Su avance depende del tiempo del programa (2.8.3), y del *playRate* (tasa de reproducción) definido en la clase *AnimationController* (2.8.4). Es similar a *extendedAnimationTime* en el sentido de que se construye en base a una repetición de la duración del clip de animación d_A . De hecho, para llevar la cuenta, *IKAnimation* contiene una variable *reproductionCount*, que indica cuantas veces se ha reproducido la animación completa. El *reproductionTime* actual t_{rep} , puede calcularse como $t_{rep} = d_A \text{reproductionCount} + t_a$, donde t_a es el tiempo interno actual de la animación. La diferencia con *extendedAnimationTime*, es que *reproductionTime* hace referencia a información que sí evoluciona en el tiempo. La información que

puede extraerse del tiempo actual t_{rep} , no necesariamente es la misma que en $t_{rep} - d_A$. La generación de trayectorias explicada en la sección 4.8, depende de la relación entre `animationTime/extendedAnimationTime` y `reproductionTime`. Toda trayectoria creada se inserta en la línea temporal del `reproductionTime`, pero se basa en una curva original extraída de `extendedAnimationTime`, y tiene su misma duración. De esta manera, existe un paralelismo temporal permanente entre las trayectorias originales y las trayectorias generadas.

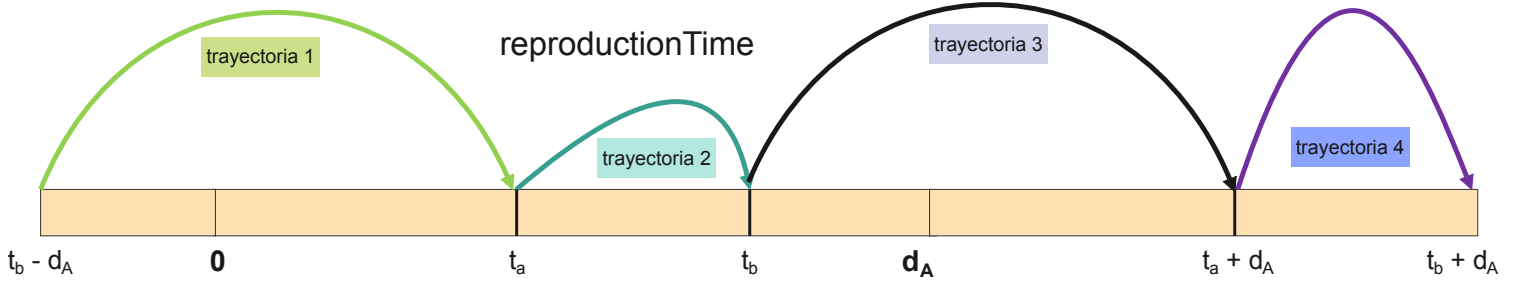


Figura 4.6: Diagrama simplificado de las trayectorias generadas por TrajectoryGenerator (4.8), distribuidas a lo largo del `reproductionTime`. Notar el paralelismo temporal con las curvas de las figuras 4.4 y 4.5.

4.4.4. Reproducción de frames

Como se explicó en 2.8.4, un frame es el índice de una `timeStamp` de una pista de animación (`AnimationTrack`). Sea t el valor actual de `animationTime`, la información de transformación extraída para una articulación, se consigue interpolando entre los valores asociados a los `timeStamps` vecinos de t : t_i y t_{i+1} . Entonces, $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ es el intervalo formado por `timeStamps` más pequeño que contiene a t . i e $i + 1$ son los frames asociados a t_i y t_{i+1} respectivamente. En este caso, se dice que el frame actual es i , y el frame siguiente es $i + 1$. En caso de que i sea el último frame de la animación ($n - 1$), entonces el frame siguiente es el frame 0.

4.5. Descenso de gradiente

La clase que implementa el descenso de gradiente, *GradientDescent*, se construye en base a instancias de la clase *FunctionTerm* que representa sumandos a utilizar para generar la función final a la que se aplicará la técnica de descenso de gradiente. Considérese que se quiere aplicar la técnica a las funciones $f_1, \dots, f_i, \dots, f_n$ en conjunto, ya que cada una de ellas tiene un significado en el contexto del problema a resolver. Estas funciones dependen del mismo vector de variables $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_k, \dots, x_m\}$. Se construye una función total $F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n f_i(\vec{x})$, a la que finalmente se aplica el descenso de gradiente. Cada subfunción (o término) f_i , se encapsula en un *FunctionTerm* que permite calcular su valor $f_i(\vec{x})$, y su derivada parcial $\frac{\partial f_i(\vec{x})}{\partial x_k}$. Cada término tiene también asignado un peso w_i , que determina su importancia para el cálculo del valor final.

La clase GradientDescent utiliza la función de derivada parcial en cada término para construir el vector gradiente:

$$\nabla F(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i(\vec{x})}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial f_i(\vec{x})}{\partial x_k} \\ \dots \\ \frac{\partial f_i(\vec{x})}{\partial x_m} \end{bmatrix}$$

Recordando lo expuesto en 2.6, el vector \vec{x} que minimiza localmente la función F se actualiza como sigue:

$$\vec{x} := \vec{x} - \lambda \nabla F(\vec{x})$$

Esta es la forma regular de actualizar el gradiente, pero existen muchas variantes. La clase GradientDescent, además del método regular, puede utilizar la técnica de *descenso de gradiente con momentum*, en que los cálculos de iteraciones pasadas tienen un peso en el cálculo del valor actual del gradiente. El valor almacenado del gradiente, $\nabla F(\vec{x})_{saved}$, se actualiza de la siguiente manera utilizando momentum:

$$\nabla F(\vec{x})_{saved} := \alpha \nabla F(\vec{x})_{saved} + (1 - \alpha) \nabla F(\vec{x})$$

α es el factor que indica cuánto pesa el gradiente histórico $\nabla F(\vec{x})_{saved}$, en relación al gradiente calculado en la iteración actual $\nabla F(\vec{x})$. En este caso particular, se utiliza $\alpha = 0,8$. El vector \vec{x} se actualiza como sigue usando momentum:

$$\vec{x} := \vec{x} - \lambda \nabla F(\vec{x})_{saved}$$

Para poder contener la información necesaria para realizar los distintos cálculos en el proceso iterativo, la clase GradientDescent guarda un puntero a una clase de tipo arbitrario *dataT*.

La función que realiza el proceso de descenso de gradiente se llama *computeArgsMin*, y en cada iteración genera mediante el uso del gradiente, un vector *argsDelta*, que contiene el cambio a aplicar a cada una de las coordenadas del vector objetivo \vec{x} para ir acercándolo al valor que minimice la función F . Entre sus parámetros se encuentran *maxIterations* y *targetArgDelta*. *maxIterations* es el número de iteraciones máximo permitido. Si se llega a este número el proceso se detiene.

A medida que avanza el proceso iterativo, y los argumentos van acercando la función a su mínimo, las magnitudes de las derivadas parciales, y por lo tanto los valores contenidos en *argsDelta*, son menores. Dado que se puede interpretar un valor bajo para el cambio que se debe aplicar al vector \vec{x} , como una mayor cercanía al término del proceso, *targetArgDelta* cumple la función de especificar el valor de cambio objetivo para cada una de las coordenadas de \vec{x} . Si en una iteración dada, todos los valores del vector *argsDelta* están por debajo de *targetArgDelta*, el proceso iterativo se detiene.

Para construir una instancia de GradientDescent, también se requiere una función *postDescentStepCustomBehaviour*, que es ejecutada al final de cada iteración, y contiene cualquier comportamiento especial que se quiera. Esta función, recibe una referencia vector \vec{x} actualizado, un puntero a la instancia de *dataT* y una referencia a *argsDelta*.

4.6. Cinemática

Las clases que se introducirán a continuación, comparten la característica de ser dependientes de un IKRig y de una IKAnimation en particular para realizar sus cálculos, ya que se basan en los valores de transformación de las articulaciones y de su jerarquía. Ambas clases guardan por lo tanto un puntero al IKRig asociado para poder acceder directamente a su estructura y sus animaciones.

4.6.1. Cinemática directa

Los cálculos en la clase ForwardKinematics se realizan en dos modalidades, *simple* y *variable*. Los cálculos de tipo variable, extraen los valores de rotación de las articulaciones del arreglo de rotaciones variables de la IKAnimation. Esto permite modificar las transformaciones teniendo libertad en el ámbito rotacional. El arreglo de rotaciones variables contiene solo una rotación por articulación, por lo que no existe variabilidad temporal.

Por otro lado, las transformaciones simples utilizan el historial de rotaciones de la IKAnimation, por lo que los cálculos pueden realizarse para distintos momentos en el tiempo (en base a reproductionTime 4.2.2), para un rango temporal acotado (del que se tiene registro). Estas transformaciones permiten generar las posiciones que realmente han tenido las articulaciones en el periodo registrado.

Ambas modalidades, simple y variable, cuentan con los valores fijos de escalamiento y posición de cada articulación.

Las clases que dependen de ForwardKinematics necesitan las transformaciones para un grupo específico de articulaciones: las articulaciones que van desde la raíz hasta cada uno de los end-effectors. Para realizar el cálculo, para cada end-effector *ee*, se calculan las transformaciones locales que están en el camino desde *ee* hasta la raíz. Estas transformaciones locales también son útiles, así que se guardan en un vector de salida que es un parámetro opcional de la función. Cuando se tienen las transformaciones locales de la cadena completa hasta la raíz, se acumulan las transformaciones para pasarlas desde el espacio local hasta el espacio del modelo. También se les aplica una transformación base que puede utilizarse para transformar a un espacio arbitrario (generalmente el espacio global). Al calcular las transformaciones para cada end-effector, se cuida de no repetir cálculos que ya se hayan realizado, en caso de que dos end-effectors compartan articulaciones en su camino hasta la raíz. El resultado del cálculo (también en el caso del vector de salida de transformaciones locales), es un vector del tamaño de la topología del esqueleto, que guarda según el índice de cada articulación su transformación. En los índices de las articulaciones para las que no se calculó nada, simplemente se guarda la transformación identidad.

4.6.2. Cinemática inversa

La clase InverseKinematics se encarga de calcular ángulos apropiados para las articulaciones contenidas en las IKChains del IKRig, utilizando la información extraída de una IKAnimation en particular. Los cálculos se hacen para un frame específico: el frame siguiente

a reproducir del clip de animación asociado a la IKAnimation. Para calcular los ángulos, InverseKinematics guarda una instancia de la clase GradientDescent, y utiliza el struct IKData como contenedor de la información para el descenso. Los ángulos son calculados por GradientDescent según tres requisitos, cada uno de los cuales es encapsulado en un FunctionTerm (4.5). La norma ($|| \cdot ||$) usada en los términos es la norma euclidiana.

1. Primer término: El primer requisito, y el más importante, es el de acercar el end-effector de cada IKChain a su posición objetivo. Para esto, la función que se quiere minimizar es:

$$f_1(\vec{\theta}) = ||ee\vec{Pos}(\vec{\theta}) - ee\vec{Target}||^2 \quad (4.1)$$

Donde $ee\vec{Pos}(\vec{\theta})$ es la posición actual del end-effector, y $ee\vec{Target}$ es la posición a la que se quiere llevar. La posición del end-effector en el espacio del modelo, depende de los ángulos de rotación de todas las articulaciones por encima de él en la jerarquía (desde él hasta la raíz). Dado que solo se modifican los ángulos de las articulaciones de las IKChains (excluyendo el end-effector), el vector $\vec{\theta} = \{\theta_1, \dots, \theta_k, \dots, \theta_m\}$ contiene únicamente esos ángulos. Es decir, cada variable θ_k del vector $\vec{\theta}$, es un ángulo de rotación asociado a una articulación j_k presente en una de las cadenas (no se repiten en caso de haber superposición entre cadenas). El resto de los ángulos del esqueleto se mantienen fijos. Los ejes de rotación de todas las articulaciones también se mantienen fijos para reducir la cantidad de argumentos de la función objetivo y simplificar la derivada parcial, disminuyendo el costo del algoritmo. Por otro lado, las posiciones y escalamientos no cambian como ya se ha mencionado. Por esto, las únicas variables a considerar son los ángulos contenidos en el vector $\vec{\theta}$.

Para calcular la derivada parcial de f_1 , $\frac{\partial f_1(\vec{\theta})}{\partial \theta_k}$, se reformula el cálculo de $f_1(\vec{\theta})$, separando las partes dependientes de variable θ_k del resto de los valores, que en este contexto son constantes. Notar primero que $eePos(\vec{\theta})$ puede descomponerse de la siguiente manera:

$$ee\vec{Pos}(\vec{\theta}) = \hat{M}^A T^{\theta_k} R^{\theta_k} S^{\theta_k} \hat{M}^B \vec{b} \quad (4.2)$$

Recordar que para calcular la posición de una articulación en el espacio del modelo, deben multiplicarse en cadena las transformaciones desde la articulación en cuestión hasta la raíz del esqueleto. La ecuación 4.2 contiene precisamente ese cálculo, donde las matrices de transformación han sido agrupadas de forma conveniente. En primer lugar, el vector $\vec{b} = \{0, 0, 0, 1\}$, tiene ese valor porque es la posición del end-effector en su propio espacio local. M^{θ_k} es la matriz de transformación local de la articulación j_k asociada a la variable θ_k . Esta matriz se descompone en sus tres subtransformaciones, con lo que $M^{\theta_k} = T^{\theta_k} R^{\theta_k} S^{\theta_k}$. Esta descomposición se realiza porque la única de ellas que varía es la matriz de rotación. \hat{M}^A y \hat{M}^B son simplemente las transformaciones acumuladas de las demás articulaciones en torno a la articulación j_k . Se agrupan las constantes, quedando $M^A = \hat{M}^A T^{\theta_k}$ y $\vec{b} = S^{\theta_k} \hat{M}^B \vec{b} = \{b_0, b_1, b_2, b_3\}$:

$$ee\vec{Pos}(\vec{\theta}) = M^A R^{\theta_k} \vec{b} \quad (4.3)$$

Los elementos de los factores de la ecuación 4.3 se agrupan con sumatorias:

$$ee\vec{Pos}(\vec{\theta}) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 \begin{bmatrix} b_j M_{0i}^A R_{ij}^{\theta_k} \\ b_j M_{1i}^A R_{ij}^{\theta_k} \\ b_j M_{2i}^A R_{ij}^{\theta_k} \\ b_j M_{3i}^A R_{ij}^{\theta_k} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Substrayendo la posición objetivo:

$$ee\vec{Pos}(\vec{\theta}) - ee\vec{Target} = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 \begin{bmatrix} b_j M_{0i}^A R_{ij}^{\theta_k} - \frac{eeTarget_0}{16} \\ b_j M_{1i}^A R_{ij}^{\theta_k} - \frac{eeTarget_1}{16} \\ b_j M_{2i}^A R_{ij}^{\theta_k} - \frac{eeTarget_2}{16} \\ b_j M_{3i}^A R_{ij}^{\theta_k} - \frac{eeTarget_3}{16} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Finalmente la función f_1 reconstruida queda de la siguiente forma:

$$f_1(\vec{\theta}) = \sum_{k=0}^3 \left[\sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 (b_j M_{ki}^A R_{ij}^{\theta_k} - \frac{eeTarget_k}{16}) \right]^2 \quad (4.6)$$

Con esto, la parte variable de f_1 queda claramente separada en $R_{ij}^{\theta_k}$, y calcular la derivada parcial resulta más fácil:

$$\frac{\partial f_1(\vec{\theta})}{\partial \theta_k} = 2 \sum_{k=0}^3 \left[\sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 (b_j M_{ki}^A R_{ij}^{\theta_k} - \frac{eeTarget_k}{16}) \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 b_j M_{ki}^A \frac{\partial R_{ij}^{\theta_k}}{\partial \theta_k} \right] \quad (4.7)$$

Para obtener $\frac{\partial R_{ij}^{\theta_k}}{\partial \theta_k}$, se requiere poder calcular los elementos de una matriz de rotación de 4x4, en función de un ángulo y un eje rotación. La matriz buscada y su derivada se presentan en el anexo B.1.

2. Segundo término: En segundo lugar, se quiere que los ángulos calculados sean similares a los de las rotaciones originales para el frame objetivo. La función escogida es:

$$f_2(\vec{\theta}) = ||\vec{\theta} - \vec{\omega}||^2 \quad (4.8)$$

El vector constante $\vec{\omega}$ contiene, por cada θ_k , el ángulo ω_k original de la animación en el frame objetivo para la misma articulación j_k . La derivada es simple de calcular:

$$\frac{\partial f_2(\vec{\theta})}{\partial \theta_k} = 2(\theta_k - \omega_k) \quad (4.9)$$

3. Tercer término: El último término tiene el objetivo de mantener estabilidad temporal en los valores calculados. Se quiere que los valores calculados para el frame actual no difieran excesivamente de los valores calculados para el frame anterior. Las ecuaciones son análogas a las del segundo término:

$$f_3(\vec{\theta}) = ||\vec{\theta} - \vec{\gamma}||^2 \quad (4.10)$$

En este caso, el vector constante $\vec{\gamma}$, en lugar de contener los valores originales, contiene los valores de frame anterior para cada j_k .

$$\frac{\partial f_3(\vec{\theta})}{\partial \theta_k} = 2(\theta_k - \gamma_k) \quad (4.11)$$

Al final de cada iteración, dentro de la función *postDescentStepCustomBehaviour*, se recalculan las transformaciones requeridas por 4.7, de forma que luego no tengan que rehacerse cálculos para generar información que es compartida por distintas articulaciones.

También es importante notar, que *computeArgsMin* (4.5), solo se encarga de ajustar el vector $\vec{\theta}$, y no de modificar los valores reales de los ángulos de rotación, guardados en el vector de rotaciones variables de la IKAnimation, que se usan para calcular las transformaciones de las articulaciones en cada paso del descenso. Por esto, *postDescentStepCustomBehaviour* debe encargarse de realizar esa actualización.

Para aplicar el descenso de gradiente de manera óptima, es importante escoger de manera inteligente los valores iniciales de las componentes del vector $\vec{\theta}$. Si al iniciar el proceso, los valores ya se encuentran relativamente cerca del resultado deseado, se puede disminuir significativamente el tiempo de cálculo. Se escoge entonces inicializar el vector de variables como sigue:

$$\vec{\theta} = \vec{\gamma}$$

Dado que los movimientos en una buena animación deben ser lo más suaves y continuos posibles, es natural esperar que los valores para el frame actual sean similares a los del frame anterior. Por esto se usa $\vec{\gamma}$, el vector de valores de frame anterior, que también se usa en 4.10, para marcar donde comienza el descenso.

La función final F a minimizar es:

$$F(\vec{\theta}) = af_1(\vec{\theta}) + bf_2(\vec{\theta}) + cf_3(\vec{\theta}) \quad (4.12)$$

Los coeficientes a , b , y c , se determinan mediante ensayo y error, buscando un resultado óptimo a nivel visual. Al ir probando valores, se tiene siempre en mente cuál es el significado de cada término f_i , y qué es lo que se quiere lograr visualmente. Por ejemplo, si a tiene un valor muy alto, se siguen las trayectorias objetivo con mayor precisión, pero los movimientos se vuelven menos creíbles. Por el contrario, si b tiene un valor muy alto, los movimientos son tan similares a la animación original que se pierde la capacidad de adaptación al terreno. Los valores usados son $a = \frac{1}{[rigHeight][\delta p]}$, $b = 2$, y $c = 4$. El valor *rigHeight* corresponde a la altura del rig en el espacio del modelo, mencionado en 4.2.1. El valor δp corresponde a un valor directamente proporcional al pequeño cambio de posición que sufre, en promedio, un end-effector en una iteración del descenso de gradiente, al ir modificando los ángulos de rotación de las articulaciones.

Dado que lo importante es mantener estable la relación entre las magnitudes de $af_1(\vec{\theta})$, $bf_2(\vec{\theta})$, y $cf_3(\vec{\theta})$, hay que considerar el efecto que puede tener la variación de la altura del rig, que puede ser distinta dependiendo del modelo articulado usado. La altura del rig sirve para tener una noción de distancias relativas en el espacio del modelo (y espacio global si se incluye la escala). En particular, es posible tener una noción de la distancia que recorren los end-effectors en cada paso dado por el rig al caminar. Lo anterior se explica porque que los largos de las piernas del rig, y su altura *rigHeight*, tienen una relación de proporcionalidad directa (si se consideran modelos de proporciones humanoides), y, sumado a lo anterior, los largos de las piernas determinan la distancia que puede ser abarcada con un paso.

En el caso de f_2 y f_3 , sus derivadas representan tasas de cambio para valores de ángulos (al cuadrado)(4.9 y 4.11) con respecto a cada componente del vector de ángulos variables $\vec{\theta}$. Es decir, se calculan variaciones de ángulos en función de otros ángulos. Esto implica que una variación de *rigHeight* no tiene influencia en sus magnitudes, y por ello b y c tienen valores

constantes.

Por otro lado, al derivar f_1 se obtiene una tasa de cambio de distancias al cuadrado con respecto a ángulos. Al calcular la variación de la posición del end-effector con respecto a la variación del ángulo θ_k asociado a la k -ésima articulación, se puede imaginar, como aproximación, que se está rotando un segmento de largo fijo en torno a su inicio para reposicionar su final. Considérese un segmento s de largo fijo l , cuyo extremo quiere cambiarse de posición desde una posición inicial, mediante una rotación en un ángulo $\delta\theta$. Esta rotación ocurre en torno a un eje perpendicular a s situado en su comienzo. La distancia δp (nombrada así para hacer un símil con lo planteado al definir a) entre la posición inicial y la posición final alcanzada, se calcula como $\delta p = 2l \sin(\frac{\delta\theta}{2})$. Al ser $\delta\theta$ pequeño, puede aproximarse la función seno a su argumento, con lo que $\delta p \approx l\delta\theta$. Reordenando y considerando el cuadrado de la distancia:

$$l \approx \frac{\delta p}{\delta\theta} \quad (4.13)$$

$$l\delta p \approx \frac{\delta p^2}{\delta\theta} \quad (4.14)$$

La ecuación 4.14 indica que, de manera simplificada y aproximada, la tasa de cambio de distancia al cuadrado en relación a un ángulo de rotación, asociada a la función f_1 , es directamente proporcional al largo del segmento rotado (y en consecuencia a *rigHeight*), multiplicado por el valor de cambio de la distancia. Además, si se considera $\delta\theta$ como un ángulo fijo, entonces se desprende de 4.13, que δp y l son directamente proporcionales, lo que implica que δp y *rigHeight* también lo son. Con esto, se define heurísticamente que $\delta p = \frac{\text{rigHeight}}{200}$. Los cálculos anteriores permiten establecer un valor razonable para el coeficiente a .

Para estudiar el funcionamiento del proceso de descenso de gradiente con las funciones y los coeficientes planteados, se recopilan datos que ilustran el rango de valores de los f_i multiplicados por sus coeficientes respectivos. Los valores son extraídos a lo largo de múltiples iteraciones completas del descenso de gradiente. También se incluyen datos sobre la cantidad de iteraciones requeridas para completar el proceso de descenso. Se presentan los datos en las tablas 4.1, y 4.2. La información es recopilada al hacer caminar a un modelo articulado por un terreno bastante irregular durante alrededor de 60 segundos. El proceso de recopilación se realiza dos veces, difiriendo únicamente el valor de *rigHeight* entre ambas ejecuciones del programa, para demostrar que se logra mantener estable la relación entre los valores $af_1(\vec{\theta})$, $bf_2(\vec{\theta})$, y $cf_3(\vec{\theta})$.

Se define $maxIt = 300$ como el máximo número de iteraciones permitido, y $lr = 0,01$ como tasa de descenso (o aprendizaje). Además, $targetDelta = 0,001$ es el valor que, al ser alcanzado por todas las componentes del vector gradiente multiplicadas por lr , determina el término del proceso.

Los dos valores escogidos de *rigHeight* para la recopilación difieren en órdenes de magnitud, para asegurar un mínimo de robustez. Para el primer caso se usa *rigHeight* = 189,83, que es la altura original del modelo de prueba. Para el segundo caso se escala el modelo y sus animaciones en 150, para obtener un valor de *rigHeight* = 28474,5.

Para cada valor de *rigHeight*, también se guardan los valores de una única ejecución del descenso de gradiente, para ilustrar cómo convergen los valores $af_1(\vec{\theta})$, $bf_2(\vec{\theta})$, $cf_3(\vec{\theta})$ y $F(\vec{\theta})$, a medida que se ajusta el vector $\vec{\theta}$. Los datos se muestran en las figuras 4.7 y 4.8. Notar que las subfunciones no necesariamente deben decrecer en todo momento, ya que muchas veces,

| | Promedio | Desviación estándar | Mínimo | Máximo |
|---|----------|---------------------|--------|---------|
| $af_1(\vec{\theta})$ | 0.6984 | 1.5523 | 0.0170 | 16.4533 |
| $bf_2(\vec{\theta})$ | 0.3749 | 0.9152 | 0.0005 | 9.0186 |
| $cf_3(\vec{\theta})$ | 0.0910 | 0.1835 | 0.0006 | 2.8177 |
| $F(\vec{\theta})$ | 1.1642 | 2.3392 | 0.0479 | 23.0851 |
| Número de pasos por cada ejecución del descenso | 27.0242 | 13.9022 | 3 | 28 |

Tabla 4.1: Valores de referencia recolectados a lo largo de múltiples ejecuciones completas del descenso de gradiente para IK. Con $rigHeight = 189,83$.

aumentar una de ellas permite que otra disminuya, reduciendo la suma total. Por ejemplo, ya que el vector $\vec{\theta}$ es inicializado con los ángulos de rotación del frame anterior γ , antes de la primera iteración del descenso, se cumple que $f_3(\vec{\theta}) = 0$, que es el valor más bajo que podría tener. Su única opción, al ser siempre positiva, es aumentar, para dejar espacio de ajuste para f_1 y f_2 . Los valores iniciales de las funciones (anteriores a la primera iteración) no son incluidos en 4.7 y 4.8, porque representan el cambio más brusco en el proceso, y generan que el resto de la curva respectiva se aplane bastante y se superponga con las demás, disminuyendo la calidad de la visualización. En cualquier caso, los valores iniciales coinciden, en general, con la tendencia (creciente o decreciente) de las curvas correspondientes.

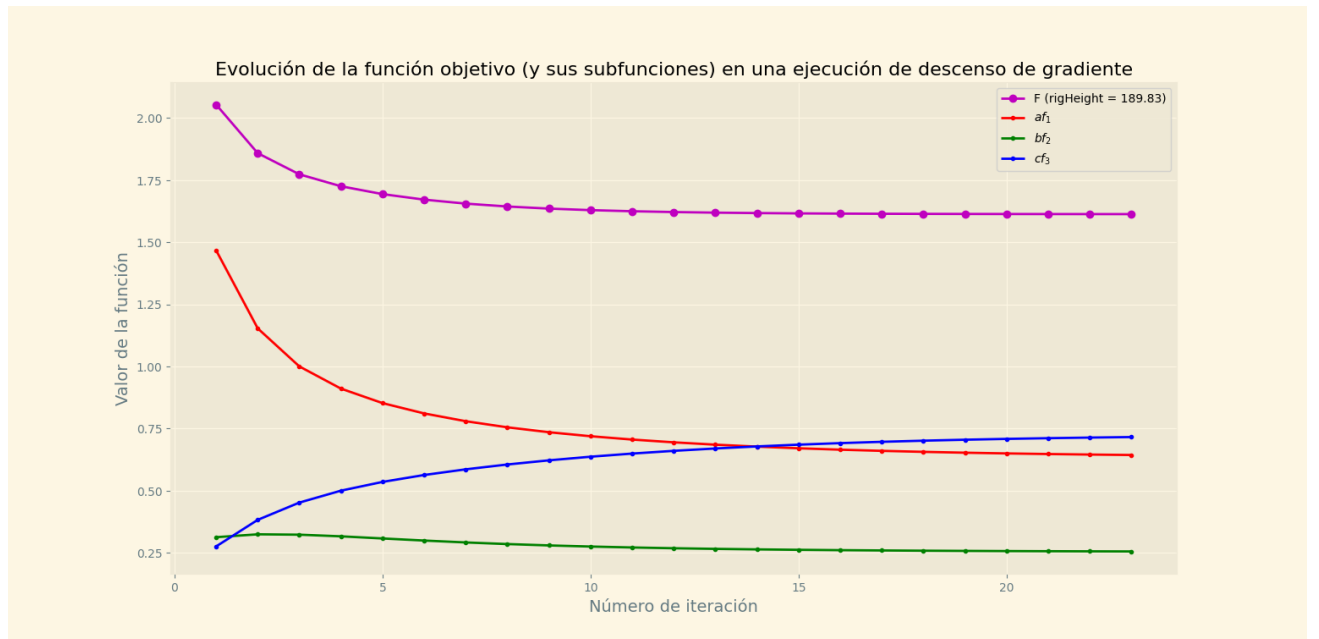


Figura 4.7: Valores por iteración de F y sus subfunciones (considerando coeficientes), para una ejecución completa de descenso de gradiente aplicado a cinemática inversa. El número de iteraciones es 23, con $rigHeight = 189,83$.

| | Promedio | Desviación estándar | Mínimo | Máximo |
|---|----------|---------------------|--------|---------|
| $af_1(\vec{\theta})$ | 0.8005 | 1.7585 | 0.0248 | 24.4570 |
| $bf_2(\vec{\theta})$ | 0.4230 | 0.9268 | 0.0008 | 9.4162 |
| $cf_3(\vec{\theta})$ | 0.0974 | 0.1876 | 0.0003 | 2.2687 |
| $F(\vec{\theta})$ | 1.3208 | 2.4802 | 0.0684 | 25.5004 |
| Número de pasos por cada ejecución del descenso | 27.4569 | 13.6283 | 3 | 31 |

Tabla 4.2: Valores de referencia recolectados a lo largo de múltiples ejecuciones completas del descenso de gradiente para IK. Con $rigHeight = 28474,5$.

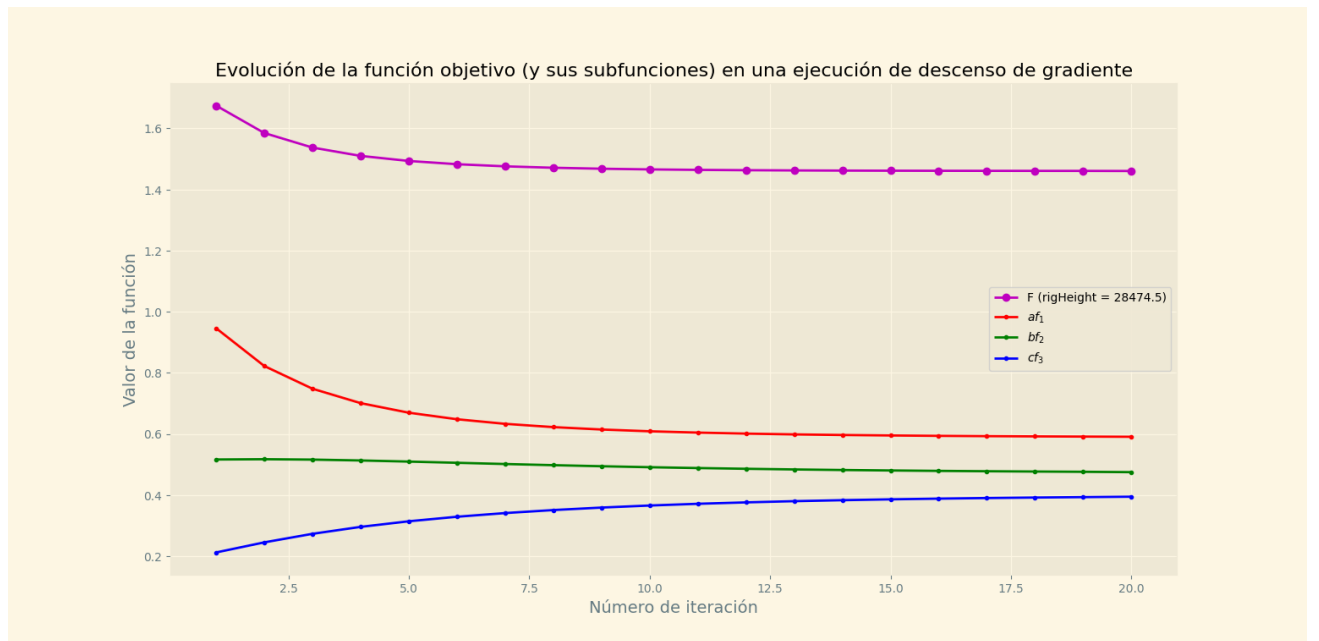


Figura 4.8: Valores por iteración de F y sus subfunciones (considerando coeficientes), para una ejecución completa de descenso de gradiente aplicado a cinemática inversa. El número de iteraciones es 20, con $rigHeight = 28474,5$.

4.7. Información del entorno

4.7.1. Mapas de altura

Para poder generar las trayectorias que guían a los end-effectors del rig, es necesario tener un conocimiento del terreno que está siendo recorrido. Para ello, se extiende la clase *Mesh*, cuyas instancias se usan para contener la información de una malla estática. Se incluye un nuevo constructor de *Mesh*, especialmente creado para la generación de terrenos en base a mapas de altura. Para construir el terreno se solicita: una función $h(x, y) = z$ sobreyectiva (e idealmente continua), los límites del dominio de h , y el número de vértices de ancho y

de profundidad que tendrá la malla. Para crear la malla, se distribuye de manera uniforme la cantidad de vértices indicada en el constructor, en el plano $(x, y, 0)$. A cada vértice $\vec{v} = \{v_x, v_y, 0\}$, se le asigna una altura, tal que $\vec{v} = \{v_x, v_y, h(v_x, v_y)\}$. La función h es encapsulada en una instancia de la clase *HeightMap*, que además guarda los valores mínimos y máximos de x e y para la malla creada. La instancia de *HeightMap* se almacena como un miembro de la clase *Mesh*. Como la malla se construye en base a la función h , pueden hacerse consultas a la instancia de *HeightMap* para obtener de forma precisa la altura de cada punto x, y de la malla.

4.7.2. EnvironmentData

Cuando el IKRig (más precisamente su *TrajectoryGenerator* asociado) necesita información de altura para un punto (x, y) , la consulta es hecha a la clase *EnvironmentData*. Esta clase puede acceder a todos los mapas de altura que han sido vinculados al rig. De esta forma, la navegación no está limitada a un único terreno. Si dos o más mallas de terreno se superponen, *EnvironmentData* devuelve el valor de altura máximo entre ellas.

4.7.3. Terrenos

Para manejar la información de las mallas, *EnvironmentData* utiliza instancias de la clase *Terrain*, que se construye en base a un game object que contenga un *StaticMeshComponent*. Del game object se extraen los *InnerComponentHandle* que permiten acceder directamente a su *StaticMeshComponent* y su *TransformComponent*. El *StaticMeshComponent* entrega acceso al *HeightMap* contenido en la malla, y el *TransformComponent* permite acceder a su información de transformación global. Así, *EnvironmentData* puede hacer consultas sobre la altura global de los puntos de las mallas. Para que la relación de un punto (x, y) y su altura $h(x, y)$ se mantenga consistente, no se permite que el game object asociado al terreno haya sido rotado.

4.8. Generación de trayectorias

4.8.1. Curvas linealmente interpoladas

La clase *LIC*, que implementa el concepto de curva linealmente interpolada (2.5), es usada principalmente dentro de esta solución para contener los puntos de las trayectorias y sus instantes de tiempo asociados. Una *LIC* se construye a partir de dos arreglos paralelos: uno que contiene m puntos pertenecientes a un espacio n -dimensional, siendo n un entero positivo arbitrario (mayor que 0); y otro que contiene los valores del parámetro t para cada punto, ordenados de forma estrictamente creciente. Además, se requiere un valor *epsilon*, que indica la tolerancia al error al hacer cálculos con los valores de la curva. Dado que se trabaja con valores tipo float, es muy importante tener en cuenta que las comparaciones

entre números suelen venir acompañadas de imprecisiones. La clase LIC posee (entre otras) las siguientes capacidades:

1. *evalCurve*: Evaluar la curva para un valor arbitrario de t en el intervalo permitido $[t_0, t_m]$.
2. *getPointVelocity*: Calcular la velocidad de un punto \vec{p}_k por la izquierda y por la derecha, donde las ecuaciones son $\frac{\vec{p}_k - \vec{p}_{k-1}}{t_k - t_{k-1}}$ y $\frac{\vec{p}_{k+1} - \vec{p}_k}{t_{k+1} - t_k}$ respectivamente.
3. *scale, translate y rotate*: Escalar, trasladar y rotar la curva. Se aplica una transformación de escalamiento, traslación o rotación a todos los puntos simultáneamente.
4. *setCurvePoint*: Cambiar el valor de un punto particular de la curva.
5. *offsetTValues*: Desplazar con un offset los valores del parámetro t .
6. *sample*: Extraer una subcurva de la curva c actual, indicando un subintervalo del intervalo $[t_0, t_m]$ que contiene todos los tiempos de c .
7. *connect*: Conectar dos curvas espacialmente, adaptando los valores de t si es necesario, e insertando el comienzo de una al final de la otra.
8. *join*: Unir dos curvas, respetando los valores de t y sus puntos \vec{p} , incluyendo los valores de la segunda curva solo si sus valores de t son superiores a los de la primera.
9. *insertPoint*: Insertar un nuevo par (\vec{p}_k, t_k) . La inserción solo se realiza si el nuevo t_k es suficientemente distinto a los ya presentes (usando *epsilon*).
10. *transition*: Transicionar de una curva a otra, especificando el valor del parámetro t durante el que se quiere transicionar. Ambas curvas deben incluir el valor de transición en su propio rango del parámetro t . En la curva final generada, el valor de punto asociado al valor de transición \hat{t} indicado, es una interpolación entre los puntos asociados a \hat{t} de las curvas input.
11. *transitionSoft*: Equivalente a *transition*, pero usa un rango de valores al transicionar, en lugar de uno solo, permitiendo que la curva final generada contenga una mayor cantidad de puntos interpolados.
12. *fitEnds*: Adaptar la curva para que su inicio y su final calcen con los puntos arbitrarios \vec{v}_{start} y \vec{v}_{end} respectivamente. Para esto, se lleva la curva al origen, y se rota para alinear su dirección $d_{original} = \vec{p}_m - \vec{p}_0$ con la dirección objetivo $d_{target} = \vec{v}_{end} - \vec{v}_{start}$. Luego, se traslada la curva completa en \vec{v}_{start} , con lo que \vec{v}_{start} se vuelve el nuevo punto inicial de la curva. El último paso consiste en escalar la curva para que se cumpla que $\|d_{original}\| = \|d_{target}\|$, donde $\|\cdot\|$ es la norma euclidiana, para que el final de la curva coincida con \vec{v}_{end} .

4.8.2. Extracción de trayectorias base

Esta es una de las etapas de preprocesamiento del clip de animación (se incluye en esta sección en lugar de en 4.10 para mayor claridad). Este proceso es llevado a cabo principalmente por la clase `TrajectoryGenerator`.

La generación de trayectorias nuevas para los ee's y la cadera se realiza tomando como base las trayectorias originales globales de esas mismas articulaciones. Al añadir una animación al sistema, se calculan las posiciones globales de las articulaciones requeridas para cada frame, y se almacenan en curvas LIC de dimensión 3 (4.8.1), que requieren los valores de posición y sus tiempos asociados. Las alturas globales se ajustan considerando el plano $(x, y, 0)$ como *plano de soporte* o “piso” para la animación. Para encontrar el offset entre la animación y el plano de soporte, se busca la mínima altura global alcanzada en la animación, considerando todos los frames y todas las articulaciones.

Al calcular las posiciones globales, se calculan los *frames de soporte* para los ee, que representan los puntos de apoyo de la caminata (2.7). Si para un ee, su posición en un frame f está a menos de una distancia d_{min} de su posición en el frame anterior, f se considera un frame de soporte. El valor d_{min} es proporcional a la altura global del IKRig. Una animación debe tener al menos un frame de soporte para poder ser procesada adecuadamente. Se indica si un frame es de soporte o no mediante un valor booleano.

Dado que en la caminata humana, mientras un pie se apoya, el otro pie está en movimiento, los frames de soporte se ajustan para que los end-effectors de cadenas opuestas (e.g. pierna izquierda y pierna derecha) tengan frames de soporte complementarios. Es decir, si un frame es de soporte para un end-effector, para el ee de su IKChain opuesta no lo es. Las trayectorias originales se almacenan de acuerdo a lo que se detalla a continuación.

1. *Trayectorias originales de ee's*: En el caso de los end-effectors, las trayectorias originales se subdividen en tramos, tomando en cuenta los puntos de soporte ya calculados. La trayectoria total del end-effector se subdivide en subtrayectorias *estáticas* y *dinámicas*. Una subtrayectoria estática, está compuesta por una porción de la trayectoria en la que el movimiento es mínimo, ya que todos sus frames son de soporte. Por el contrario, una trayectoria dinámica presenta un desplazamiento significativo del ee, ya que está conformada únicamente por frames que no son de soporte.

Para construir las subtrayectorias, se van chequeando uno a uno los frames. Si el siguiente frame no es de soporte, se comienza a generar una trayectoria dinámica, y en caso contrario una estática. Una subtrayectoria se completa cuando se agotan los frames que deben ser chequeados, o cuando se da la condición para empezar una trayectoria del tipo opuesto. Al chequear los frames, se toma en cuenta que las animaciones utilizadas son circulares, y que por lo tanto, una subtrayectoria puede comenzar en un frame y terminar en uno anterior, habiendo dado la vuelta a la animación. Dado que el sistema requiere que pueda recuperarse una trayectoria original completa para cualquier `animationTime` (4.4.1), las trayectorias cortadas en los límites de la animación se llevan a `extendedAnimationTime`. Una curva LIC debe tener valores de tiempo estrictamente crecientes, por lo que no se permite representar un loop (o parte de él). Necesariamente la curva cortada al final del clip de animación (o análogamente al comienzo de este), debe continuar su tiempo después del final de la animación (o antes del comienzo) (aclaración en figura 4.5).

A medida que se calculan las posiciones globales de los ee's, se construye un arreglo con sus *alturas de soporte*, que es la diferencia de altura entre el ee y el plano de soporte momento a momento. Estos valores se utilizan para determinar la mínima altura esperada del ee para cada momento del tiempo.

Para una subtrayectoria estática, las alturas de soporte son simplemente los valores z de sus puntos, ya que en esos instantes el end-effector está apoyado, con z como offset, en el plano de soporte.

En cambio, para una trayectoria dinámica, donde el ee se encuentra en movimiento y puede tener alturas muy variadas, se establecen las alturas de soporte interpolando entre las alturas de soporte de las curvas estáticas vecinas. Como se indicó, la animación ingresada necesariamente debe tener al menos un frame de soporte, lo que asegura que si se genera una trayectoria dinámica, esta sea acompañada por al menos una trayectoria estática. Dado que las trayectorias se construyen usando el concepto de circularidad de una animación, una subtrayectoria siempre tendrá una curva previa y una curva siguiente.

Por cada subtrayectoria generada, se almacenan su LIC tridimensional, su tipo (estático o dinámico), y su ID único, en una instancia de la clase *EETrajectory*.

Para contener la información de trayectorias separada por end-effector, se crea la clase *EEGlobalTrajectoryData*. Una instancia de esta clase guarda un arreglo de las *EETrajectory* con las subtrayectorias originales del ee, y también una instancia separada de *EETrajectory* para contener la trayectoria objetivo que crea la clase *TrajectoryGenerator*. Además se guarda un puntero a la instancia de *EEGlobalTrajectoryData* asociada a la *IKChain* opuesta. *EEGlobalTrajectoryData* también guarda las alturas de soporte del ee, y un historial de posiciones análogo al historial de rotaciones en *IKAnimation*. Un arreglo con cada *EEGlobalTrajectoryData* generado (uno por *IKChain*), es almacenado en la instancia de *IKAnimation* asociada al clip de animación de donde fueron extraídas las trayectorias.

2. *Trajectory original de la cadera*: El almacenamiento de la trayectoria de la cadera es simple, ya que no requiere subdivisiones. Las posiciones globales se almacenan tal como vienen en una única LIC tridimensional.

De manera análoga al caso de los ee, la información de trayectoria de la cadera se almacena en una instancia de la clase *HipGlobalTrajectoryData*. Esta clase, guarda una LIC con la trayectoria original, y otra en la que se almacena la trayectoria objetivo generada a partir de ella en cada iteración. De igual manera, *HipGlobalTrajectoryData* contiene el historial de posiciones globales de la cadera.

4.8.3. TrajectoryGenerator

La clase *TrajectoryGenerator* es la encargada de generar las trayectorias a seguir por los end-effectors y la cadera, teniendo en cuenta la información entregada por su instancia de *EnvironmentData* sobre las elevaciones del terreno. *TrajectoryGenerator* también contiene un puntero al *IKRig*, para poder acceder a las *IKAnimations*, *IKChains* y a la información de orientación global del rig. Las trayectorias objetivo generadas, almacenadas en LICs tridimensionales, existen en *reproductionTime*, lo que permite mantener una continuidad temporal, e insertar una trayectoria después de otra de manera constante. A pesar de que la anima-

ción original existe en `animationTime`, y las trayectorias objetivo en `reproductionTime`, las trayectorias objetivo avanzan de forma paralela a la animación. Cada trayectoria objetivo generada está basada en una de las trayectorias originales extraídas del clip, y tiene su misma duración. De esta manera las temporalidades entre la animación y los movimientos del IKRig se mantienen consistentes.

Las trayectorias nuevas se crean tomando como puntos de partida las posiciones históricas de los end-effectors y de la cadera. Para chequear en que posición se insertará una nueva trayectoria, se chequea dónde se estuvo en ese punto del tiempo, para mantener la continuidad del movimiento. En cada iteración del sistema IK, se guardan las posiciones actuales de los end-effectors y de la cadera en los historiales de posiciones correspondientes (`EEGlobalTrajectoryData` y `HipGlobalTrajectoryData`), antes de generar nuevas trayectorias. Antes de la primera generación de nuevas trayectorias, las alturas de las articulaciones objetivo no han sido ajustadas: las posiciones en el plano (x, y) son correctas, pero los valores de z no se han ajustado al terreno. Estos valores de posición, aunque incompletos, son necesarios para generar las primeras trayectorias. Para indicar que es la primera vez que se generarán las trayectorias, y que no se cuenta aún con información de altura correcta, la clase `HipGlobalTrajectoryData` guarda la variable booleana *motionInitialized*.

Como la generación de nuevas trayectorias es un proceso constante, deben tenerse en cuenta los casos en que se genera una nueva trayectoria cuando la anterior aún no ha terminado de ser recorrida. En este caso, se transiciona de una curva a otra para evitar cambios bruscos usando la función de LIC `transitionSoft` (o `transition`). Si la trayectoria anterior está suficientemente cerca de su final o si es incompatible con la nueva trayectoria, puede simplemente ser reemplazada por esta. Cabe destacar que siempre hay alguna superposición temporal entre las curvas creadas por `TrajectoryGenerator`, por lo que no quedan espacios de tiempo vacíos.

4.8.4. Trayectorias para end effectors

Para generar una nueva trayectoria para un end-effector particular ee_i , se chequea el `animationTime` del frame actual del clip de animación. Ese tiempo se utiliza para seleccionar la subtrayectoria original del ee_i , $S_{original}$, sobre la que se construirá la trayectoria objetivo actual. S_{target} , la trayectoria objetivo a construir, se inicializa con $S_{original}$, por lo que al comienzo son iguales.

Lo primero es llevar S_{target} a `reproductionTime`, para poder insertarla en la línea de tiempo de ejecución del sistema. Para ello simplemente se utiliza la función de LIC descrita en 4.8.1, `offsetTValues`, restando el `animationTime` del frame actual, $t_{Anim_{current}}$, y sumando el `reproductionTime` del frame actual, $t_{Rep_{current}}$.

Luego se ajusta la posición, orientación, y tamaño de S_{target} . En esencia, se debe calcular un punto de inicio y un punto final para S_{target} . Estos puntos deben adaptarse a la altura terreno, y considerar el largo de la subtrayectoria $S_{original}$.

Considérese una tercera curva, S_{saved} , que es una subcurva extraída de las posiciones históricas de ee_i (guardadas en su `EEGlobalTrajectoryData`), y existe en `reproductionTime` al igual que S_{target} . Las tres curvas $S_{original}$, S_{target} y S_{saved} son temporalmente análogas: tienen la misma duración, y están asociadas al mismo `extendedAnimationTime`. S_{target} y S_{saved} existen en el intervalo de tiempo $[t_{Rep_0}, t_{Rep_n}]$. $S_{original}$ existe en el intervalo $[t_{ExtAnim_0}, t_{ExtAnim_n}]$, con valores en `extendedAnimationTime`.

1. *Cálculo de la posición inicial:* Se intenta obtener de S_{saved} , el valor de posición histórico para el tiempo inicial de la trayectoria $tRep_0$. En caso de que la primera generación de trayectorias ya haya ocurrido (indicado en `motionInitialized` de `HipGlobalTrajectory-Data`), la posición guardada existe y puede ser usada directamente.

Si no existe una posición guardada para ese tiempo, se extrae de S_{saved} la posición guardada para el `reproductionTime` $tRep_{current}$, de la que solo se extraen los valores de x e y , teniendo con esto una posición actual de referencia en el plano, $p\vec{s}_{XYref}$. Luego, se toma la dirección de $S_{original}$ en el plano XY, y se rota según la dirección global de movimiento del IKRig. Con esto se obtiene $\vec{d}_{XYTarget}$, la dirección XY tentativa de la trayectoria final (puede variar).

Llámesese distancia objetivo a la distancia en el plano XY entre $S_{original}$ evaluada en $tExtAnim_0$, y $S_{original}$ evaluada en $tAnim_{current}$. Se quiere que el tramo análogo de S_{target} (entre $tRep_0$ y $tRep_{current}$) tenga una distancia en XY lo más similar posible. Dada la dirección objetivo $-\vec{d}_{XYTarget}$, la distancia objetivo, y el punto de referencia $p\vec{s}_{XYref}$, se puede calcular el punto inicial para S_{target} . Se calcula un número arbitrario de puntos candidatos a lo largo de la dirección objetivo, partiendo desde el punto de referencia, asignándoles sus alturas correspondientes en el terreno. Se selecciona el punto candidato que tenga la distancia con el punto de referencia más cercana a la distancia objetivo.

2. *Cálculo de la posición final:* Una vez que se tiene la posición inicial $targetStart$ de la trayectoria, puede calcularse la posición final siguiendo un proceso análogo. Esta vez, el punto de referencia es el punto inicial que se acaba de obtener, y la distancia objetivo es la distancia entre el punto inicial y el punto final de $S_{original}$. La dirección objetivo se calcula teniendo como referencia la relación original entre la posición de la cadera y el end-effector actual ee_i , en el tiempo de la animación donde la trayectoria $S_{original}$ llega a su fin ($tExtAnim_n$). La idea es que cuando se mueva el end-effector (que se encuentra a la altura del tobillo), su posición con respecto a la cadera en el plano XY no difiera mucho de la original al terminar su trayectoria, para que no ocurra por ejemplo, que una pierna pase a través de la otra. Se predice entonces una posición para la cadera para el tiempo $tRep_n$, y se aplica el offset original con ee_i para calcular una posición objetivo $ee_{candidateXYEnd}$. La dirección objetivo en el plano XY para el cálculo de la posición final de la trayectoria, se calcula como $ee_{candidateXYEnd} - targetStartXY$, donde $targetStartXY$ es la proyección de la posición inicial ya calculada en el plano XY. Como se indicó, el proceso para calcular la posición final $targetEnd$, es análogo al proceso de cálculo del inicio. La diferencia principal recae en que en este caso, además de considerar las alturas del terreno para la recolección de puntos candidatos, se toman en cuenta las alturas de soporte asociadas a la curva $S_{original}$. Recordar que las alturas de soporte representan el offset original del end-effector con el piso (sin contar la elevación extra generada al dar un paso).

Una vez se tienen las posiciones buscadas, se ajusta la curva objetivo S_{target} a ellas mediante la función $fitEnds$ (4.8.1).

Finalmente se asigna S_{target} como curva objetivo a la instancia de `EEGlobalTrajectoryData` asociada ee_i , reemplazando la anterior directamente o transicionando de una a otra según sea el caso.

4.8.5. Corrección de trayectorias dinámicas

A pesar de que la trayectoria generada para un paso de la caminata sea ajustada en su punto inicial y final de manera correcta al terreno, puede que las alturas intermedias originales de la trayectoria no sean suficientes para superar la altura del terreno, como se observa en la figura 4.9.

Para solucionar este problema, la clase `TrajectoryGenerator` guarda una instancia de la clase



Figura 4.9: *Trayectoria dinámica (paso de la caminata), que atraviesa una porción del terreno.*

StrideCorrector. A su vez, la clase `StrideCorrector`, guarda una instancia de `GradientDescent`, la cual utiliza para adaptar la forma de una trayectoria dinámica al terreno. Lo que hace, es asignar una altura mínima para cada punto de la trayectoria input, que considera la altura de soporte, y la altura del terreno. Entonces, cada punto \vec{p} de la trayectoria S_{input} , exceptuando el inicio y el final, que ya fueron calculados correctamente, deben estar por encima de la altura mínima $hMin = hTerrain + hSupport$, donde $hTerrain$ es la altura del terreno, y $hSupport$ la altura de soporte.

El concepto utilizado en este caso por `GradientDescent`, es el de acercar la forma de una curva a la de otra lo más posible. Para ello, se busca acercar las velocidades locales de las curvas, punto a punto, lo que implica orientar de forma similar los segmentos que componen las curvas. Lo que se modifica son las posiciones de los puntos, coordenada a coordenada.

Se tiene una curva base S_{base} , la cual se busca imitar, y una curva objetivo S_{target} , la cual se busca ajustar. La utilidad de este enfoque recae en que pueden establecerse puntos fijos en S_{target} , de tal manera de que haya una diferencia que se mantiene inalterada con S_{base} en esos puntos, mientras que el resto de los puntos son ajustados. De esta forma se genera una curva restringida parcialmente, que es lo más parecida posible a la curva base. La función a minimizar es entonces:

$$f(\vec{P}_T) = \sum_{i=1}^n \left[\|lVel(\vec{p}\vec{T}_i) - lVel(\vec{p}\vec{B}_i)\|^2 + \|rVel(\vec{p}\vec{T}_i) - rVel(\vec{p}\vec{B}_i)\|^2 \right] \quad (4.15)$$

La letra T mayúscula, hace referencia a la curva S_{target} , y la letra B mayúscula a la curva S_{base} . La norma $(\|\cdot\|)$ usada es la norma euclidiana. Son n los puntos de la curva objetivo S_{target} , cuyas coordenadas se quieren ajustar para acercarse a los velocidades de n puntos

paralelos de la curva base S_{base} . El vector \vec{P}_T , del cual depende la función a minimizar, contiene todas las coordenadas de los n puntos de la curva objetivo:

$$\vec{P}_T = \{..., p\vec{T}_{ix}, p\vec{T}_{iy}, p\vec{T}_{iz}, ...\}$$

$lVel$ y $rVel$, son las velocidades por la izquierda y por la derecha respectivamente (4.8.1). Se utilizan ambas velocidades, porque se quiere corregir la relación de cada punto con sus dos vecinos. La derivada parcial de f se calcula con respecto a cada coordenada w de cada uno de los n puntos $p\vec{T}_i$:

$$\frac{\partial f(\vec{P}_T)}{\partial p\vec{T}_{iw}} = 2 \left[\frac{lVel(p\vec{T}_i)_w - lVel(p\vec{B}_i)_w}{t_i - t_{i-1}} + \frac{rVel(p\vec{T}_i)_w - rVel(p\vec{B}_i)_w}{t_i - t_{i+1}} \right] \quad (4.16)$$

La variable t_i , es el instante de tiempo asociado al i -ésimo punto. Notar que la curva base y la curva objetivo deben compartir los mismos instantes de tiempo para todos sus puntos, por lo que t_i aplica para ambos $p\vec{T}_i$ y $p\vec{B}_i$. Además, es muy importante que ambas curvas tengan las mismas orientaciones generales en el espacio, para que el ajuste de velocidades realmente genere similitud entre sus formas.

El subíndice w se aplica a las velocidades, indicando que se está usando esa coordenada del vector velocidad.

La velocidad por la izquierda de un punto \vec{p}_i , se superpone con la velocidad por la derecha de \vec{p}_{i+1} , y la velocidad por la derecha de \vec{p}_i , se superpone con la velocidad por la izquierda de \vec{p}_{i+1} , lo que implica que las derivadas parciales de \vec{p}_i dependen también de velocidades calculadas para \vec{p}_{i+1} y \vec{p}_{i-1} . Como la dependencia es simétrica, esos valores se omiten al definir la derivada parcial para simplificarla. Este cambio genera una reducción uniforme de las componentes del gradiente, lo que no afecta significativamente el proceso de descenso.

En este contexto, S_{base} es la curva dinámica generada, que está posicionada correctamente, pero que atraviesa el terreno. Se dice que está posicionada correctamente, porque su inicio y su final ya fueron determinados según la elevación de terreno. Esos dos puntos se mantienen fijos en el proceso de ajuste. La curva S_{target} se inicializa con S_{base} . Se quiere que S_{target} tenga una forma lo más similar a S_{base} , pero que respete las alturas mínimas permitidas.

La función *postDescentCustomBehaviour* cumple el objetivo de asegurar que las alturas de los puntos se mantengan por sobre sus alturas mínimas asignadas. Se chequea que la coordenada z_i de cada punto $p\vec{T}_i$, esté por encima del valor mínimo permitido $hMin_i$. Si z_i está por debajo del mínimo, se le asigna el valor $hMin_i$. Además se altera artificialmente el valor de $argsDelta_i$, para indicarle a *computeArgsMin* que la variable está cerca de su valor objetivo (aunque no lo esté según el gradiente calculado). Aquí entra en uso la modalidad de descenso de gradiente con momentum explicada en 4.5. Al modificar $argsDelta_i$, se altera el registro histórico del gradiente, lo que influye en el cálculo del gradiente de la siguiente iteración. Como cada vez que se fuerza z_i a tener el valor $hMin_i$ se disminuye $argsDelta_i$, el gradiente se va acercando forzosamente a valores más bajos, y *computeArgsMin* cree que $hMin_i$ es el valor correcto para z_i .

De igual forma que en 4.6.2, la función *computeArgsMin* solo cumple con modificar el vector de variables \vec{P}_T , por lo que *postDescentCustomBehaviour* se encarga de ajustar las posiciones de los puntos en S_{target} usando los delta calculados.

La combinación de ajustar las alturas de la curva, y de acercar las velocidades de S_{target} a S_{base} , genera una curva con una forma apropiada, que no atraviesa el terreno (figura 4.10).

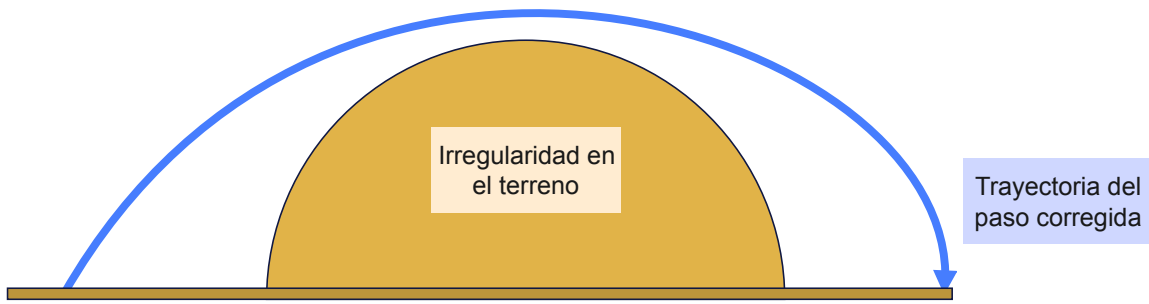


Figura 4.10: *Trayectoria dinámica corregida con descenso de gradiente.*

4.8.6. Trayectorias para la cadera

Luego de que han sido calculadas las trayectorias de los end-effectors, se calcula la trayectoria de la cadera. Se escoge la trayectoria calculada eeS_{base} , que es la trayectoria a la que le queda más tiempo para terminar de ser recorrida, y pertenece un end-effector ee_i . Como se explica en 4.8.4, las trayectorias calculadas para los end-effectors existen en $reproductionTime$. $[tRep_0, tRep_n]$ es el intervalo de tiempo en el que existe eeS_{base} , y $[tExtAnim_0, tExtAnim_n]$ es el mismo intervalo pero llevado a $extendedAnimationTime$. Se utiliza este último intervalo para extraer una curva de la trayectoria original de la cadera guardada en $HipGlobalTrajectoryData$. Se tiene ahora una subtrayectoria original de la cadera $hipS_{original}$, que existe en $extendedAnimationTime$, y que se usa para inicializar la curva objetivo $hipS_{target}$. Al igual que en el cálculo de trayectorias para end-effectors, lo primero es llevar $hipS_{target}$ a $reproductionTime$. Luego se siguen dos pasos principales: encontrar la posición inicial, y ajustar las alturas de la trayectoria punto a punto.

1. *Cálculo de la posición inicial:* Se establece una posición inicial, chequeando primero si existe una posición histórica guardada. El cálculo de la posición inicial en caso de no haber una guardada es similar al usado en 4.8.4. Primero debe calcularse la posición inicial proyectada en el plano XY. Para esto último debe tomarse en cuenta la dirección global actual del movimiento de la cadera, y también la distancia entre el punto correspondiente al tiempo de inicio de $hipS_{original}$, y el punto correspondiente al $animationTime$ actual de $hipS_{original}$. Una vez se tiene el punto de inicio $targetStart$, ya sea extraído del historial de posiciones, o recién calculado en el plano XY, se rota $hipS_{target}$ para ajustarla a la dirección global de movimiento, y se traslada su comienzo a $targetStart$.
2. *Ajuste de las alturas:* Lo que falta es corregir las alturas de los puntos de la curva $hipS_{target}$. Esta corrección se hace utilizando la curva eeS_{base} y la curva $eeS_{opposite}$, que es la curva objetivo del end-effector opuesto a ee_i . Para cada punto \vec{p}_i a ajustar, asociado a un $reproductionTime$ $tRep_i$ perteneciente a $[tRep_0, tRep_n]$, la función $calcHipAdjustedHeight$, recupera la diferencia de altura original entre los end-effectors recién mencionados, y la cadera. Mediante un proceso iterativo simple, busca la mayor altura posible z_i para el punto \vec{p}_i , tal que ni eeS_{base} evaluada en $tRep_i$, ni $eeS_{opposite}$ evaluada en $tRep_i$, tengan una diferencia de altura mayor con la cadera, que la diferencia de altura original respectiva. De esta manera se mantiene una altura de la cadera coherente con la animación original, calculada en base a las posiciones objetivo de los end-effectors.

Esto permite subir y bajar por el terreno, siguiendo el movimiento generado para los ee. La función *calcHipAdjustedHeight* se utiliza para ajustar todos los puntos de *hipS_{target}*, a excepción del primero (*targetStart*), en caso de que haya sido extraído del historial de posiciones, ya que entonces su altura no requiere ajuste.

Una vez que *hipS_{target}* ha sido calculada completamente, se asigna como nueva curva objetivo a *HipGlobalTrajectoryData*, mediante reemplazo o transición desde la curva objetivo anterior, según sea el caso.

4.8.7. Trayectorias fijas y validación de trayectorias dinámicas

Las trayectorias fijas, son trayectorias que mantienen una misma posición para la totalidad de su duración. Cuando se determina que la trayectoria de un end-effector debe ser fija, entonces se asignan trayectorias fijas a los demás end-effectors y también a la cadera, ya que el movimiento siempre debe detenerse por completo (y no parcialmente). Se utilizan las trayectorias fijas en dos casos:

1. *Animaciones tipo IDLE*: Si la animación para la que se está calculando una trayectoria es tipo IDLE, significa que no representa una caminata, sino una pose estática, por lo que siempre se le asignan trayectorias fijas.
2. *Trayectorias dinámicas inválidas*: Si al calcular el punto final de una trayectoria dinámica, se determina que el cambio de elevación del paso a dar será demasiado grande, entonces se decide que la trayectoria es inválida debido a un exceso de pendiente en el terreno. En ese caso (y si la variable *enableStrideValidation* tiene el valor *true*), en lugar de guardar esa trayectoria como trayectoria objetivo, se asigna una trayectoria fija.

Para que la fijación del movimiento sea efectiva, se replica la información de rotación del frame en que se fijó el movimiento, denominado *fixedMovementFrame*, en todo el clip de animación, forzando así que la pose sea completamente estática.

En el caso de las animaciones tipo WALKING, si se determina en algún instante que las trayectorias generadas son nuevamente válidas, se restauran las rotaciones originales de la animación, y se permite retomar el movimiento.

4.9. Control del sistema e interfaz de usuario

4.9.1. IKNavigationComponent

IKNavigationComponent, es el componente que se le asigna a un game object con un *SkeletalMeshComponent*, para darle la capacidad de adaptar sus animaciones estáticas y de caminar, a un terreno irregular. Para construir un *IKNavigationComponent* se necesita una

instancia de la clase *RigData*, que debe ser rellenada por el usuario, para entregar al sistema IK la información básica requerida. La clase *RigData* requiere:

1. El nombre de la articulación de la cadera.
2. El nombre de la articulación base y del end-effector para ambas piernas. El sistema, en su estado actual, trabaja únicamente ajustando las articulaciones de las piernas, por lo que se requiere indicar el nombre de la articulación donde inicia una pierna (que suele ser una articulación hija de la cadera), y la articulación donde termina (se recomienda usar una articulación en la zona donde comienza el pie, a la altura del tobillo). Las piernas no pueden comenzar en la cadera, ya que la cadera se utiliza para controlar la trayectoria global del IKRig. Se requiere además que no haya superposición entre las articulaciones de la pierna izquierda y las de la pierna derecha.
3. La información de transformación global para el IKRig, que incluye el ángulo de rotación inicial, la posición inicial, y la escala.

Una vez que el *IKNavigationComponent* ha sido asignado al game object, el componente le da las siguientes posibilidades al usuario:

1. Agregar una animación: El usuario puede agregar un nuevo clip de animación al IKRig. Para que esto tenga sentido, el clip también debe haber sido cargado por el sistema de animación, y debe ser compatible con el esqueleto asociado al IKRig. Junto con el clip de animación, deben ingresarse los vectores de referencia originales del clip, que indican su dirección up, y su dirección front, lo que permite al sistema chequear de manera básica si el clip posee las condiciones adecuadas para que las piernas del esqueleto puedan ser manipuladas adecuadamente.

También se requiere el tipo de la animación a agregar, que puede ser WALKING o IDLE. Las animaciones tipo WALKING son animaciones que contienen un movimiento de caminata relativamente simple, y las animaciones IDLE son aquellas que contienen una pose estática.

El último valor para construir el componente se llama *supportFrameDistanceFactor*, e influye en el cálculo de la máxima diferencia de posición que puede haber entre dos frames consecutivos para un end-effector (final de una pierna), para que el segundo frame siga siendo considerado de soporte. Esto determina cuan largas son las trayectorias estáticas en relación a las dinámicas (4.8.2). En general es suficiente con dejar este parámetro en su valor por defecto 1,0.

Como se indica en 4.3, el problema de la caminata se soluciona considerando el eje $Z+$ como up, y el eje $Y+$ como front, por lo que es necesario que las animaciones utilizadas sean ajustadas a esta condición. Al incorporar la animación al sistema, deben ser previamente ajustadas por el usuario mediante el método *Reorient* de la clase *AnimationClip* (en caso de ser necesario).

Esta responsabilidad se asigna al usuario, ya que un mismo clip de animación puede ser utilizado por múltiples IKRigs. De esta manera, se evita que el reajuste se vuelva realizar si el clip es recibido más de una vez por el sistema IK.

2. Eliminar una animación: Se puede desvincular una animación del componente ingresando el puntero al clip de animación.

3. Agregar un terreno: Un terreno, a nivel de la interfaz de usuario, es un game object que contiene un StaticMeshComponent, cuyo objeto Mesh fue construido mediante una función de elevación (4.7.1). Solo luego de asignado el terreno al IKNavigationComponent, el IKRig tendrá acceso a la información de elevación.
4. Eliminar un terreno: Se puede desvincular un terreno del componente ingresando la misma referencia usada para agregarlo.
5. Activar y desactivar la cinemática inversa: Se puede activar o desactivar la parte del sistema que ajusta las animaciones mediante cinemática inversa. Con esto, se generarán nuevas trayectorias, pero no se llevará a los end-effectors a las posiciones objetivo. Como el seguir la trayectoria objetivo de la cadera no depende de los cálculos de cinemática inversa (que sólo van dirigidos a los end-effectors), el movimiento general por el terreno se mantiene. También se mantiene la actualización de la orientación del IKRig según la rapidez angular.
6. Activar y desactivar la corrección de trayectorias: Puede activarse y desactivarse la corrección de trayectorias dinámicas descrita en 4.8.5.
7. Activar y desactivar la validación de trayectorias: Puede activarse y desactivarse la validación de trayectorias descrita en 4.8.7. Si la validación de trayectorias está activada, el movimiento del IKRig se detendrá al acercarse a zonas con pendientes demasiado elevadas. Aunque el rig esté detenido, puede girarse, y retomará el movimiento si la pendiente no es tan grande en la nueva dirección.
Si la validación no está activada, se podrá recorrer cualquier zona del terreno, pero es probable que haya más errores en el ajuste de las piernas a la superficie.
8. Modificar la rapidez angular del IKRig: Puede modificarse el valor de la rapidez angular del rig, que influye en la rapidez del cambio de la orientación global en cada iteración del motor.

El IKNavigationComponent contiene una instancia de la clase IKRigController, que a su vez contiene y maneja la instancia del IKRig.

4.9.2. IKRigController

La clase *IKRigController* cumple el rol de coordinar las piezas clave de la solución. Contiene la instancia del IKRig, y la actualiza en cada iteración del motor, utilizando la información generada por las clases InverseKinematics y TrajectoryGenerator. En cada iteración del loop principal del motor, IKRigController recibe el valor de cambio de tiempo ΔT indicado (2.8.3), y lo modifica considerando la tasa de reproducción p de AnimationController, obteniéndose el cambio de tiempo de animación $\Delta T_a = p\Delta T$. Teniendo este valor, IKRigController realiza los siguientes pasos en orden (visualización en el anexo (figura A.2)):

1. *Actualización del tiempo de las IKAnimations:*
Recordar que el IKRig contiene un arreglo de IKAnimations, donde cada una representa

una animación vinculada al esqueleto del IKRig, a la que se le puede aplicar cinemática inversa. Cada IKAnimation tiene valores que indican el actual reproductionTime, y el frame que toca reproducir del clip de animación. El IKRigController actualiza estos valores, utilizando el valor ΔT_a . El valor ΔT_a se ajusta para cada IKAnimation a_i , considerando posibles desfases entre el animationTime de a_i y el sampleTime (2.8.4) respectivo. Se chequea si a_i contiene el clip reproducido actualmente, o el clip asociado a la instancia de CrossFadeTarget guardada en el AnimationController, y según eso se recupera el desfase correcto. Puede que a_i no contenga ni al clip actual, ni al clip de transición, y en ese caso no se realiza ningún ajuste. Los desfases ocurren precisamente cuando se transiciona de una animación a otra.

En esta etapa, también se setea la variable de IKAnimation *onNewFrame*, que determina si el frame actual a reproducir es distinto al frame que se estaba reproduciendo en la iteración pasada.

2. *Actualización de la dirección global de movimiento:*

Una instancia de IKRig posee un ángulo de rotación *rotationAngle*, y una rapidez angular *rotationSpeed*. El ángulo de rotación, define la dirección global de movimiento, al usarse para rotar la dirección de movimiento basal (*frontVector* = {0, 1, 0}). En cada iteración, IKRigController utiliza el avance de tiempo de la animación ΔT_a para actualizar el ángulo de rotación:

$$rotationAngle := rotationAngle + \Delta T_a rotationSpeed$$

3. *Actualización del estado de activación de las IKAnimations:*

Para definir si es necesario calcular trayectorias y ángulos ajustados para una IKAnimation a_i , debe verificarse si esa animación realmente está siendo usada por el sistema de animación del motor. Para ello, de la misma forma que se realizó al actualizar el tiempo de las IKAnimations, se revisa si el animationClip de a_i es el clip que está siendo actualmente reproducido por el AnimationController, o si es el clip de transición. Si se da uno de estos dos casos, se setea el valor *active* de a_i a true, en caso contrario, se setea a false y se limpia la información guardada en a_i , para que cuando a_i sea activada, no contenga información obsoleta de rotaciones y trayectorias.

4. *Actualización de las trayectorias:*

Por cada IKAnimation a_i activa que se encuentre en un nuevo frame (indicado por la variable *onNewFrame*), deben generarse nuevas trayectorias para los end-effectors y la cadera. Una vez construidas las trayectorias por TrajectoryGenerator, IKRigController extrae la posición objetivo para cada end-effector para el siguiente frame, y la asigna a la IKChain correspondiente. Notar que hay una posición objetivo distinta para cada animación activa.

También actualiza el historial de posiciones globales por end-effector y para la cadera. Se mantiene limitado el tamaño de los historiales, recortándolos para que no crezcan indefinidamente.

Antes de calcular las posiciones globales, se revisa que el historial de ángulos de cada articulación tenga información disponible hasta el frame actual. Recordar que el historial de ángulos es usado por ForwardKinematics para el cálculo de las transformaciones del rig (4.6.1). Si no hay información para el frame actual, se debe a que hubo un salto de frames por mal rendimiento del programa. Para calcular la información faltante, en

caso de que se hayan saltado pocos frames, se interpola entre la información calculada para el último frame que logró ser reproducido y la información original de rotación del frame actual. Mientras más pequeño haya sido el salto, se le da más peso a los ángulos calculados. Si el salto fue demasiado grande, se utiliza directamente la información de rotaciones original.

5. *Actualización de la transformación global del IKRig:*

El TransformComponent del game object asociado al IKNavigationComponent tiene la información de posición global del rig. En este paso, se actualiza la transformación de rotación global, usando el ángulo de rotación del rig, para que el modelo este orientado correctamente. Además se ajusta la traslación global, utilizando las trayectorias generadas para la cadera.

En general se utiliza sólo la trayectoria generada para la IKAnimation que contiene el clip que está siendo reproducido por el sistema de animación en ese momento, y se extrae la posición correspondiente al reproductionTime actual para asignarla al TransformComponent.

En caso de que este ocurriendo una transición entre animaciones, se debe considerar también la trayectoria generada para el IKAnimation que contiene el clip al que se va a transicionar. Simplemente se promedian las dos posiciones extraídas para calcular la traslación final.

6. *Actualización de las animaciones:*

Al igual que en la actualización de trayectorias, la actualización de animaciones sólo ocurre para cada IKAnimation a_i que esté activa, y que acabe de pasar a un nuevo frame.

Se recorta primero los historiales de ángulos, para que no crezcan ilimitadamente, de la misma forma que se hace con los historiales de posiciones.

Luego se utiliza InverseKinematics para generar los ángulos de rotación por cada IKChain. Teniendo los ángulos calculados, que se generan específicamente para el frame siguiente, se modifica el animationClip, asignando los ángulos al frame correspondiente, para todas las articulaciones objetivo (que son todas las articulaciones de las IKChains excluyendo sus end-effectors).

Ya que el sistema de animación genera información de transformación para las articulaciones, interpolando entre el frame actual y el frame siguiente, no es necesario actualizar las rotaciones al estar entre un frame y otro. Lo importante es que al llegar a un nuevo frame, se calculen los ángulos para el frame siguiente.

Como es posible que haya saltos de frames por mal rendimiento del programa, siempre debe actualizarse también la información de rotaciones para el frame actual en el animationClip. Esa información se obtiene del historial de ángulos que siempre tiene información disponible para el frame actual.

4.9.3. IKNavigationSystem

El sistema de navegación IK o *IKNavigationSystem*, es la clase encargada de actualizar todas las instancias existentes de IKNavigationComponent, en cada iteración del loop principal del motor. IKNavigationSystem itera sobre los componentes, y extrae de cada uno de

ellos su IKRigController, para llamar a su método *updateIKRig*, que recibe el paso de tiempo desde la última iteración del motor, y realiza todos los pasos descritos en 4.9.2.

4.10. Preprocesamiento de las animaciones

4.10.1. Validación

IKRigController contiene una instancia de la clase *AnimationValidator*, que se asegura de que cada clip de animación input, cumpla con los requisitos necesarios para ser usado por el sistema IK adecuadamente. Los requisitos a cumplir son los siguientes:

1. Tener posiciones y escalamientos fijos en el tiempo para todas las articulaciones, exceptuando la cadera. La cadera se excluye porque su movimiento es el que genera la trayectoria principal de la caminata. Como se indica en la sección 2.4, las articulaciones deben tener distancias fijas entre si para los cálculos de cinemática, y para esto, sus escalamientos y posiciones no pueden cambiar.
2. No poseer rotaciones ni traslaciones por encima de la cadera en la jerarquía. Esto se debe a que el movimiento principal de la animación debe venir de la cadera para poder ser procesado correctamente. Se permiten articulaciones sobre la cadera que no cumplan la función de generar movimiento.
3. Ser circular. La animación debe venir en formato loop, ya que el sistema mantiene la continuidad de movimiento utilizando la misma animación una y otra vez, asumiendo que el final de la animación y su inicio pueden conectarse.
4. Si una animación fue diseñada considerando un vector up V_{up} , y un vector front V_{front} , se espera que los ejes de rotación locales de las articulaciones a ajustar mediante IK, presenten un nivel mínimo de oblicuidad con el *plano principal de movimiento* de la animación, tendiendo idealmente a la perpendicularidad. Se define el plano principal de movimiento de una animación de caminata, orientada de forma arbitraria, como el plano formado por sus vectores up V_{up} y front V_{front} en el espacio del modelo. Esto es ejemplificado por la figura 4.12, que posee un plano principal de movimiento YZ. Este plano contiene de forma aproximada los movimientos de las piernas que generan la caminata. La definición de este plano es una simplificación, ya que las piernas se mueven mas bien en planos paralelos a él, de los que a su vez pueden salirse ligeramente. Dado que el uso de cinemática inversa en la presente solución está limitado al ajuste de ángulos de rotación, las posiciones que pueden ser generadas en cada frame para un end-effector, están limitadas por los ejes de rotación locales de la cadena. Al modificar el ángulo de rotación de una articulación, se genera movimiento en su articulación hija, pero únicamente en una elipse en torno al eje de rotación, y perpendicular a él (figura 4.11), dando lugar a un *plano de movimiento posible*. Si frame a frame, el eje de rotación para un end-effector da lugar a un plano de movimiento posible que difiere mucho del plano principal de movimiento (y por lo tanto la posición objetivo), entonces las trayectorias generadas no podrán ser seguidas correctamente.

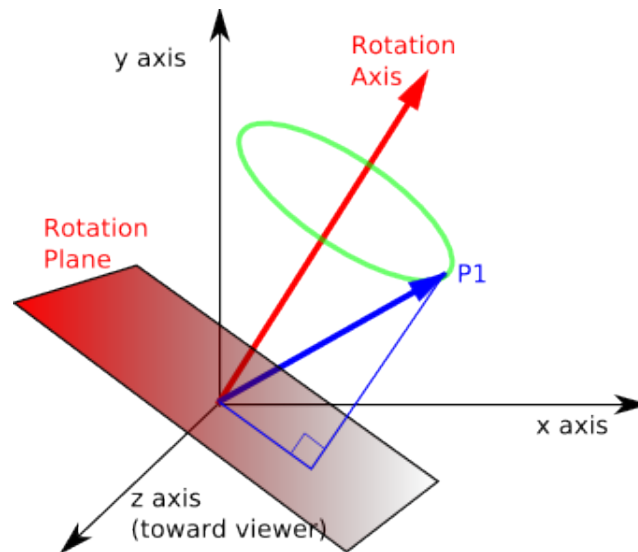


Figura 4.11: Plano de rotación generado al rotar un punto \vec{P}_1 mediante un cuaternión. Fuente: <https://ece.montana.edu/seniordesign/archive/SP14/UnderwaterNavigation/Quaternions.html>.

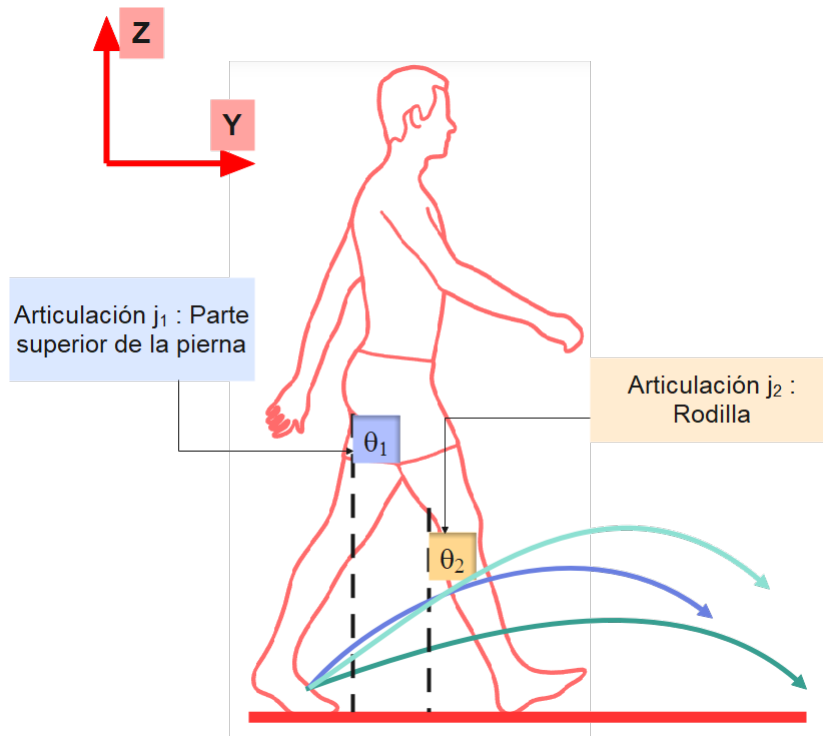


Figura 4.12: Caminata en el espacio local del IKRig, con ángulos de rotación para las articulaciones j_1 y j_2 , de la cadena asociada a la pierna derecha. Fuente: <https://www.dimensions.com/collection/people-walking>

Considérese el caso de una animación con vector up Z y vector front Y como se ve en la figura 4.12. Su plano principal de movimiento es YZ . Para poder sacar el máximo provecho al alcance de las articulaciones j_1 y j_2 de la figura, es ideal que el plano de movimiento posible de ambas articulaciones sea similar a YZ , ya que ahí es donde se

encuentran aproximadamente las posiciones objetivo en el espacio del modelo. Si ambas articulaciones cumplen con la condición, entonces únicamente modificando los ángulos θ_1 y θ_2 es posible alcanzar una gran variedad de posiciones en el plano objetivo.

Como ya se mencionó, el plano principal de movimiento es una mera simplificación, que contiene los movimientos de la caminata de manera aproximada, por lo que es deseable que los ejes de rotación no sean perfectamente perpendiculares al plano general de movimiento, permitiendo así algo de movimiento lateral de las piernas, lo que a su vez brinda mayor realismo al movimiento.

En la figura 4.12 se muestran también ejemplos de trayectorias posibles, en este caso para la pierna izquierda, que son alcanzables si sus articulaciones cumplen con la condición propuesta.

Es posible que haya otras formas de determinar si las articulaciones pueden ser manejadas correctamente por el sistema IK, y también que este método no sea efectivo en la totalidad de los casos, ya que la relación entre el movimiento local y global es compleja, y depende de la interrelación entre las rotaciones y posiciones locales, de unas articulaciones con otras en la jerarquía.

4.10.2. Descompresión de las rotaciones

En un clip de animación, el número de timeStamps por articulación no es uniforme: algunas articulaciones tienen más que otras. Para poder indexar las rotaciones de las articulaciones por frame (4.4.4) de manera consistente, se requiere que todas las articulaciones tengan el mismo número de timeStamps de rotación. Esto se hace recorriendo todos los arreglos de timeStamps de forma paralela, e insertando cada vez el timeStamp con el valor más bajo de entre todos los arreglos, junto con el valor interpolado de la rotación, en las articulaciones que no posean ese timeStamp.

No es necesario descomprimir escalamientos y traslaciones, ya que al tener valores fijos se usa solamente el primer valor del track.

Capítulo 5

Validación

Para validar la solución, se crean 3 aplicaciones simples que utilizan el sistema de navegación IK. Todas pueden usarse con 2 modelos/personajes distintos, cada uno de los cuales dispone de 4 animaciones de caminar, y una estática. En cada uno de los ejemplos, los personajes comienzan en pose estática, haciendo uso de la animación tipo IDLE, pero mediante la tecla *UP* se activa la transición a la animación de caminar seleccionada. La tecla *DOWN* puede usarse para volver a la pose idle. Los controles en los ejemplos están diseñados para poder recorrer la escena y observarla desde distintos ángulos, y a la vez poder controlar la orientación del personaje. Mientras el personaje se mueve, las teclas *RIGHT* y *LEFT* controlan la dirección de movimiento. La posición de la cámara es manejada con las teclas *W*, *A*, *S*, *D*, *E* y *Q*. La orientación de la cámara se controla con el movimiento del mouse, y la velocidad con su rueda.

Para los ejemplos compilados en modo debug, se incluyen opciones para modificar el comportamiento del sistema, que son las permitidas por el `IKNavigationComponent`, detalladas en 4.9.1. También se pueden dibujar las trayectorias objetivo de la cadera y de los end-effectors, y las trayectorias realmente seguidas por los ee, para visualizar la tasa de éxito del ajuste mediante IK.

Los tres ejemplos están contruidos de manera similar, y demuestran la integración del sistema IK en el MonaEngine a nivel de interfaz de usuario. Para utilizar el sistema, el usuario debe simplemente agregar una instancia de `IKNavigationComponent` al game object que representa su personaje, y luego agregarle las animaciones y terrenos que desee utilizar.

1. *Ejemplo básico:*

El primer ejemplo (figura 5.1) demuestra el uso básico, que incluye un único terreno y un único personaje.

2. *Ejemplo con múltiples terrenos:*

El segundo ejemplo (figura 5.2) demuestra el uso de varios terrenos (3), cada uno construido a partir de una función de elevación distinta. Los terrenos son escalados y desplazados usando los `TransformComponents` correspondientes.

3. *Ejemplo con múltiples personajes:*

El tercer ejemplo (figura 5.3) demuestra el uso de más de un personaje. Cada personaje

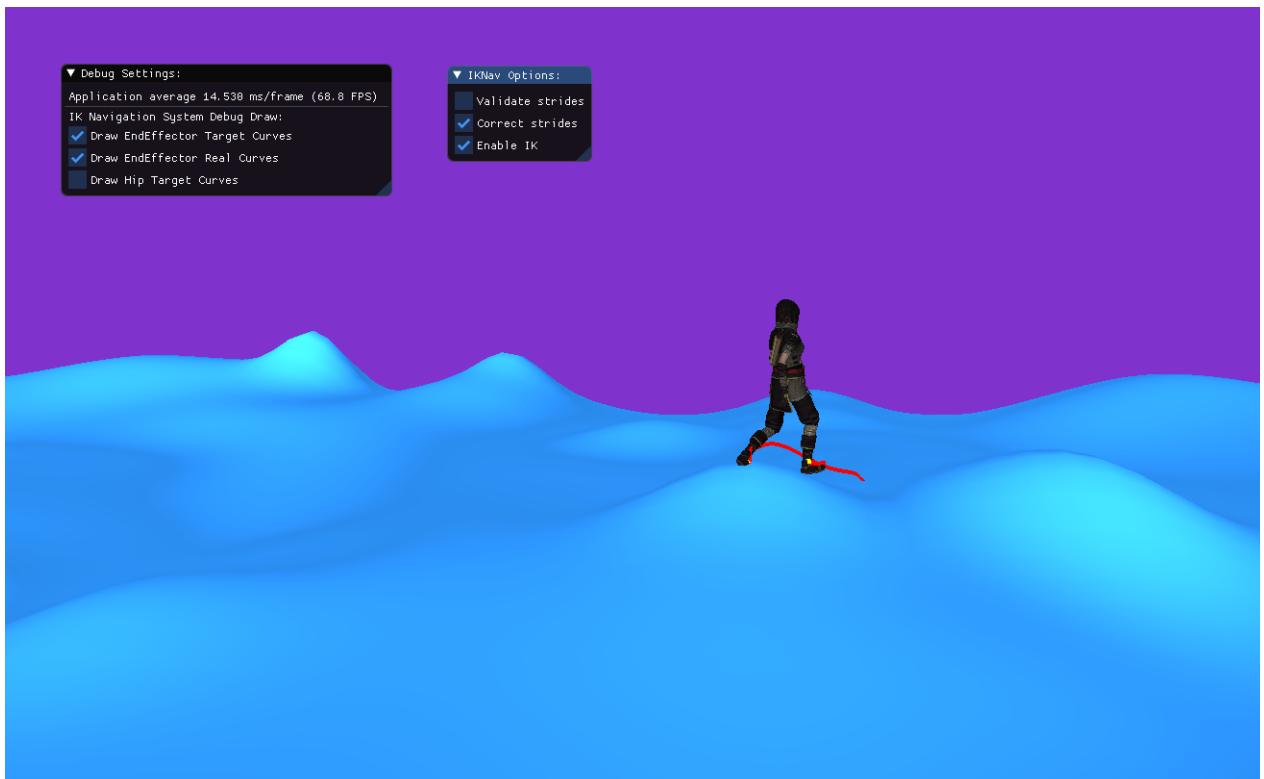


Figura 5.1: *Ejemplo con un único personaje y un único terreno.*

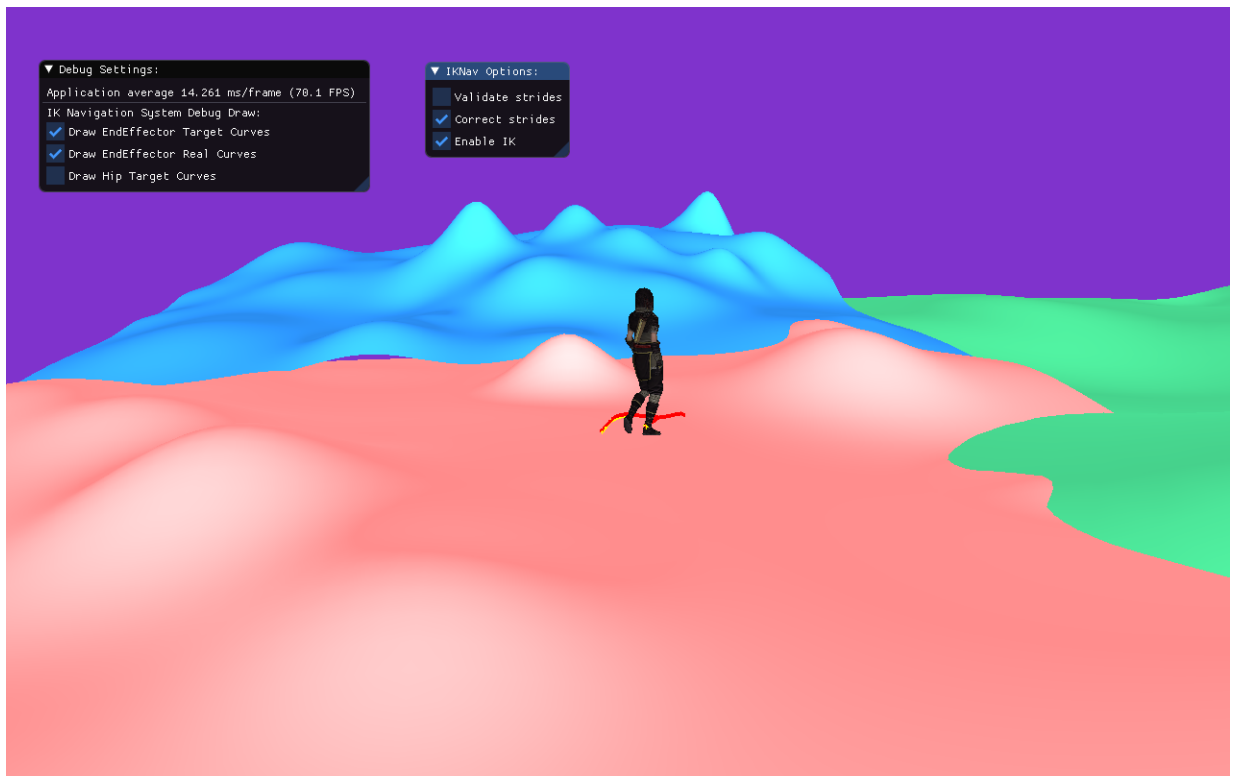


Figura 5.2: *Ejemplo con múltiples terrenos.*

está ligado a un game object distinto, y posee su propio IKNavigationComponent. Para simplificar, ambos personajes son controlados con las mismas teclas simultáneamente.



Figura 5.3: *Ejemplo con más de un personaje.*

5.1. Rendimiento de la solución

Uno de los objetivos más importantes planteados al comienzo del desarrollo de este trabajo, fue el de lograr que las animaciones fueran adaptadas al terreno en tiempo real (1.3). Este requisito se desprende del hecho de que se está trabajando con videojuegos, que son aplicaciones intrínsecamente interactivas.

Para comprobar el cumplimiento de este requisito, se midieron los frames por segundo obtenidos al correr el sistema con el software FRAPS, obtenido gratuitamente de <https://fraps.com/>. Las aplicaciones de ejemplo fueron ejecutadas en modo release, por alrededor de 1 minuto cada una, en un notebook con las siguientes especificaciones de hardware:

- Procesador: Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz
- Memoria Ram: 16gb
- Tipo de disco duro: SSD

- GPU: NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti

La parte más demandante del sistema es la de llevar a los end-effectors a sus posiciones objetivo. Si las posiciones objetivo difieren mucho de las posiciones de la animación original, el descenso de gradiente tarda más en converger. Por esto, se utiliza un terreno muy irregular como el de la figura 5.3, para probar el rendimiento bajo una situación de mayor exigencia. El terreno utilizado para todas las pruebas realizadas es el mismo.

Las animaciones se reproducen a una tasa de 30 frames por segundo. Esto es importante de mencionar, porque el sistema IK realiza sus cálculos cada vez que se llega un nuevo frame de la animación. Una mayor densidad de frames implica una mayor cantidad de iteraciones por segundo en las que el sistema IK debe realizar trabajo.

Para cada prueba, se realiza una prueba preliminar bajo las mismas condiciones, pero en la que no se realizan ajustes a las animaciones mediante cinemática inversa, ni se corrigen las trayectorias dinámicas.

1. *Prueba número 1:*

Baseline: Promedio de 140fps, mínimo de 126fps, y máximo de 145fps.

La primera prueba se realiza con un único personaje, con cadenas compuestas de 3 articulaciones para las piernas. Si las cadenas ingresadas al sistema IK son más largas, entonces el descenso de gradiente debe ajustar una mayor cantidad de articulaciones, lo que demanda una mayor cantidad de cálculos, y dependiendo del caso, una mayor cantidad de iteraciones para converger.

Los resultados obtenidos son excelentes, con un promedio de 120fps, un mínimo de 103fps, y un máximo de 126fps.

2. *Prueba número 2:*

Baseline: Promedio de 140fps, mínimo de 126fps, y máximo de 145fps.

Para la segunda prueba se utiliza también un único personaje, pero esta vez se incluye una articulación adicional en cada pierna. En lugar de usar cadenas que lleguen hasta la altura del tobillo, se llega hasta la punta del pie. Curiosamente, los resultados obtenidos son aún mejores que en la prueba número 1. Esto puede deberse a que quizás las posiciones objetivo de las trayectorias generadas para las puntas de los pies, son inalcanzables con mayor frecuencia que en el caso de los tobillos, lo que genera que el descenso de gradiente para el ajuste con IK se detenga más rápido. Esto es solo especulación, y lamentablemente no se cuenta con otros modelos que tengan estructuras articuladas distintas en las piernas para realizar pruebas más rigurosas.

Se obtiene un promedio de 140fps, un mínimo de 122fps, y un máximo de 145fps.

3. *Prueba número 3:*

Baseline: Promedio de 114fps, mínimo de 107fps, y máximo de 119fps.

La tercera prueba se realiza con dos personajes (y con el largo usual de las cadenas, llegando hasta el tobillo). Considerando el caso base, nuevamente se obtienen resultados muy favorables, con un promedio de 112 fps, un mínimo de 104fps, y un máximo de 115fps.

| Descripción de la prueba | Milisegundos por frame (baseline) | Milisegundos por frame (con IK) |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|
| Único personaje y único terreno | 7.14 | 8.3 |
| Único personaje considerando una articulación adicional por pierna | 7.14 | 8.19 |
| Múltiples personajes (2) | 8.77 | 8.92 |

Tabla 5.1: *Resumen del rendimiento promedio de la solución. Milisegundos por frame para cada ejemplo de prueba.*

La tabla 5.1 presenta un resumen de los resultados anteriores en milisegundos por frame (sólo valores promedio).

5.2. Percepción de los usuarios

Se construye un pequeño cuestionario para medir la percepción subjetiva de los usuarios sobre las animaciones generadas por el sistema de navegación IK. Se reúne opiniones de personas ligadas al mundo de los videojuegos, ya sea en capacidad de jugadores frecuentes, o de desarrolladores. Se escoge a este tipo de personas por su familiaridad con las animaciones comúnmente presentes en los juegos. Si se ha sido un jugador de videojuegos 3d frecuente, es muy probable que se tenga un ojo más crítico con lo que respecta a la calidad de los recursos usados para crear el mundo del juego, y se tenga por lo tanto, una capacidad más desarrollada para comparar y juzgar distintas animaciones. El número total de encuestados es 7, que, aunque no es un número muy alto, se considera suficiente para dar una impresión válida de la calidad de los resultados. La justificación para lo anterior es que se pide evaluar algo que requiere de una percepción muy básica y directa. Al preguntar por el realismo de un movimiento tan común como lo es el caminar, no se espera una gran variabilidad en las opiniones. Fuera de lo que puede darse por haber distintos niveles de exigencia en el juicio, no debería necesitarse encuestar a un número muy alto de personas para lograr una noción básica del cumplimiento de los objetivos.

Se solicita a los usuarios comparar dos ejemplos, uno que presenta una animación de caminar ajustada al terreno con cinemática inversa, y otro que presenta la misma animación pero sin ajustar. Ambos ejemplos se crean a partir del ejemplo básico de la figura 5.1, pero se remueve la animación tipo IDLE, para que el personaje camine automáticamente al iniciar la aplicación. Además, las aplicaciones de prueba se entregan compiladas en modo release, ya que esto genera una notoria mejora de rendimiento general.

Como evaluación principal, se mide la percepción de los usuarios en torno a dos criterios, que buscan, en conjunto, probar el debido cumplimiento del objetivo 3, planteado en la sección de objetivos específicos para esta memoria (1.3). El primer criterio, es el de la preservación de la esencia de la animación original en la animación modificada. El segundo, es el de el realismo de las animaciones resultantes, en cuánto a su adaptabilidad a un terreno irregular. En las tablas 5.2 y 5.3, se presenta la rúbrica con los resultados, donde en cada casilla se

| | |
|--|---|
| Criterio 1: La animación en el ejemplo con cinemática inversa preserva la esencia de la animación original. | |
| Estoy totalmente en desacuerdo, la animación modificada no tiene ninguna relación con la original | 0 |
| Estoy ligeramente de acuerdo, puedo ver muy pocas características de la animación original en la modificada | 0 |
| Estoy de acuerdo, puedo darme cuenta de que ambas animaciones son de un tipo similar | 2 |
| Estoy muy de acuerdo, puedo ver claramente que la animación modificada está basada en la original | 5 |

Tabla 5.2: *Percepción de los usuarios sobre la preservación de la esencia de la animación original.*

| | |
|--|---|
| Criterio 2: Los movimientos de la animación ajustada con cinemática inversa dan una sensación suficientemente realista de una caminata en un terreno irregular. | |
| Estoy totalmente en desacuerdo, puedo ver que es una caminata, pero se ajusta pésimamente al terreno | 0 |
| Estoy ligeramente de acuerdo, puedo ver que sólo en algunos momentos la caminata se ajusta bien al terreno | 1 |
| Estoy de acuerdo, aunque no es totalmente realista, me parece que es una animación creíble | 6 |
| Estoy muy de acuerdo, la animación ajustada simula perfectamente una caminata en un terreno irregular | 0 |

Tabla 5.3: *Percepción de los usuarios sobre la calidad de la adaptación al terreno conseguida.*

indica el número de personas que escogieron esa opción como respuesta.

Adicionalmente, se pregunta sobre la utilidad percibida de la aplicación de IK a los videojuegos, y sobre qué mejoras son las que requiere principalmente esta solución. A continuación se presenta un resumen general de las respuestas entregadas:

1. *¿Pudiste notar claramente la diferencia entre ambos ejemplos?*

La diferencia resulta notoria, especialmente cuando el personaje se acerca a zonas muy irregulares del terreno. En esos momentos las piernas del personaje atraviesan el terreno cuando el sistema IK no está activado.

2. *¿Consideras que el uso de esta técnica puede añadir más realismo y disfrutabilidad a los videojuegos?*

La respuesta es sí. Se enfatiza la importancia de mantener la verosimilitud en los juegos para que las emociones generadas sean más fuertes. El uso de cinemática inversa permite lograr mejores interacciones entre los personajes y su entorno, y evitar situaciones que

rompan la credibilidad del mundo del juego, y por lo tanto, la conexión jugador-juego.

3. *De los problemas que pudiste percibir en el ejemplo con IK (si es que consideras que los hay), ¿qué consideras prioritario mejorar?*

El problema más mencionado es el de la falta de ajuste de los pies al terreno. La solución presentada en este informe sólo se encarga de llevar las piernas a una altura adecuada, pero el ajuste preciso de los pies no está incluido.

Por otro lado, se menciona el hecho de que el comportamiento del personaje es poco dinámico al recorrer superficies con inclinaciones diferentes. Por ejemplo, podría esperarse que el personaje balanceara su cuerpo de una manera distinta para denotar cansancio al subir una pendiente con mayor inclinación.

También se hace notar que para ciertas pendientes, las piernas, aunque se ajustan al terreno, no lo hacen de una forma realmente adecuada.

Capítulo 6

Conclusiones

Se creó un nuevo componente para el MonaEngine, llamado `IKNavigationComponent`, que puede ser agregado a un game object que represente a un personaje animado, para modificar sus animaciones estáticas y de caminar, y adaptarlas a un terreno irregular mediante cinemática inversa.

Para realizar los cálculos de cinemática inversa se escogió el método de descenso de gradiente, seleccionado de entre los métodos numéricos presentados en la sección 3.1.2. Usando únicamente este método, se logró simultáneamente ajustar los valores de rotación de las articulaciones objetivo según tres criterios distintos:

1. El primer criterio, y el más importante, es el de lograr cercanía entre los end-effectors y sus posiciones objetivo (definidas por las trayectorias objetivo creadas por la clase `TrajectoryGenerator`).
2. En segundo lugar, los valores de rotación deben mantener cierta similitud con los de la animación original.
3. Por último, para mantener la cohesión temporal, se requiere que los valores generados para dos frames consecutivos no difieran demasiado.

El uso de este método permitió simplificar la solución, evitando tener que mezclar algún sistema de los presentados en 3.1.2 (que en general solo están enfocados en llevar a los ee a posiciones objetivo), con elementos adicionales que facilitaran crear animaciones estables, y parecidas a las originales. El método del descenso de gradiente permitió estructurar los cálculos de cinemática inversa de forma más ordenada y compacta.

Para que las posiciones generadas para los end-effectors estuvieran contenidas en trayectorias similares a las originales, se desarrolló un sistema que creara nuevas trayectorias, adaptadas a la elevación del terreno, pero haciendo uso de las trayectorias originales para ello. Este método, además de asegurar la creación de trayectorias consistentes con la animación original, dio lugar a la identificación y separación de las partes clave de la caminata. La trayectoria completa de cada tobillo, fue dividida en subtrayectorias estáticas y dinámicas, que representan momentos de apoyo de los pies, y momentos de desplazamiento significativo respectivamente. La división en subtrayectorias facilitó el adaptar los movimientos al terreno, aplicándose la

idea de que el comienzo y final de ambos tipos de trayectoria representan momentos en los que el pie está apoyado, por lo que tiene sentido adaptar la curva al terreno simplemente cambiando las alturas de los extremos para que calcen con el piso. Esta subdivisión también facilitó la validación preventiva de las trayectorias generadas, al estar un paso completo de la caminata encapsulado en una trayectoria dinámica. Para comprobar si un paso que se va a dar a continuación es válido o no, simplemente se revisa si la trayectoria dinámica generada presenta un cambio de elevación demasiado grande. En otras palabras, si el pie va a ser levantado de manera excesiva, puede determinarse que la trayectoria es inválida.

6.1. Valoración de los resultados

El rendimiento logrado por el sistema en cuanto a frames por segundo superó las expectativas, corriendo fácilmente en tiempo real para uno y dos personajes (5.1). Faltó comprobar el verdadero efecto en el rendimiento de agregar una o más articulaciones adicionales a las piernas, pero no se espera que el cambio sea demasiado grande.

En cuanto a la calidad de las animaciones generadas, se logró un nivel en torno a lo esperado. El sistema genera animaciones para nada perfectas, pero que sí demuestran un claro uso de las articulaciones de las piernas del personaje para mejorar la interacción de la animación original y el terreno. Además, se logra mantener la esencia de la animación original. Estas aseveraciones son respaldadas por las respuestas entregadas por los usuarios de prueba en la sección 5.2.

El sistema puede catalogarse como un mínimo viable, en cuanto a que entrega una base sólida, estructural y cualitativamente. Si se exploran con detenimiento las aplicaciones de ejemplo, podrán notarse ciertas discontinuidades en el movimiento, y momentos en las trayectorias objetivo no son seguidas con precisión (figura 6.1). Por ejemplo la transición entre animaciones IDLE y WALKING, donde la posición de la cadera durante la transición es generada con un promedio simple, no siempre logra realizarse con la suavidad deseada.

El hecho de que a veces no se sigan las trayectorias objetivo con precisión tiene dos causas principales: en primer lugar, debe considerarse que son tres los requisitos a ser cumplidos simultáneamente por los ángulos de rotación al ser generados por el descenso de gradiente. Estos requisitos, muchas veces se oponen entre sí, lográndose valores que cumplen los distintos requisitos a medias. Por ejemplo, hay casos en que la nueva posición para el end-effector requiere un cambio demasiado brusco desde la posición actual, lo que va en contra del tercer requisito planteado para el descenso, que busca mantener la estabilidad de la animación. Eso puede generar que la posición final generada, esté a medio camino entre la posición objetivo y la posición actual, por ejemplo. La segunda causa principal de que las trayectorias no sean seguidas correctamente, está relacionada con los ejes de rotación de la animación, que como se explica en el cuarto punto de la sección de validación de animaciones (4.10.1), determinan qué posiciones son alcanzables por los end-effectors al modificar los ángulos. Puede que en un frame dado, los ejes de rotación de las articulaciones de una cadena no sean lo suficientemente adecuados para que el objetivo se alcance con precisión. Este seguimiento incorrecto de la trayectoria, es también parte de la razón de por qué los pies se entierran en el piso (pregunta 3 en sección 5.2), cómo se ve en la figura 6.2.

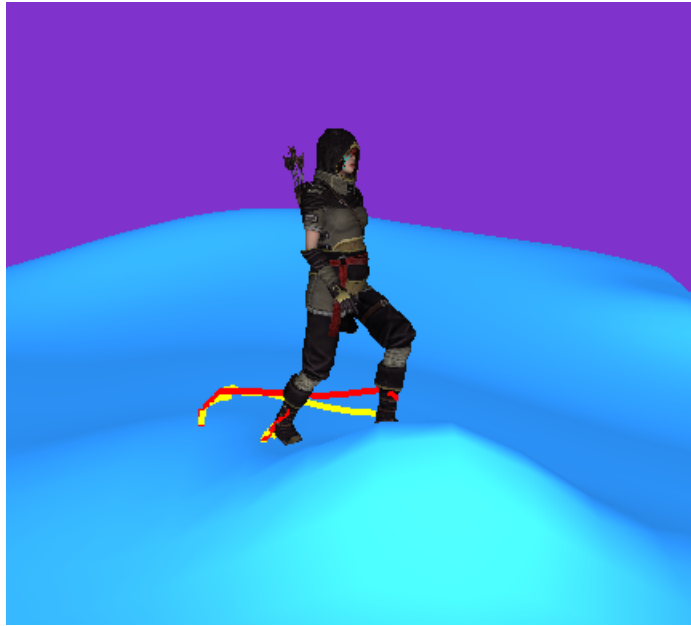


Figura 6.1: *Ejemplo en que no se logra seguir la trayectoria objetivo (curva roja). La curva amarilla es el movimiento real del end-effector.*

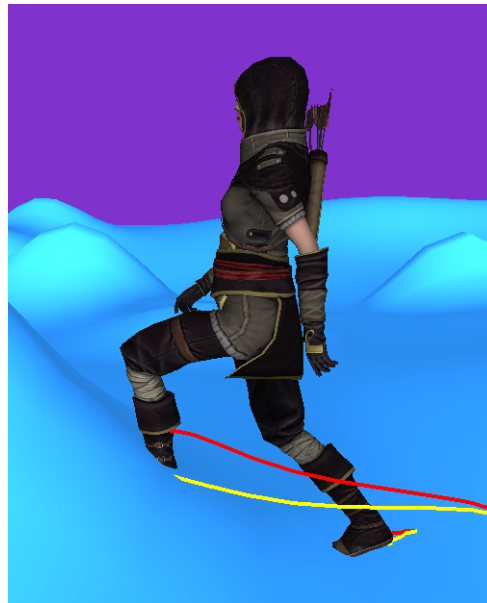


Figura 6.2: *Ejemplo en que los pies del personaje se entierran en el suelo.*

La solución fue implementada siguiendo una estructura similar a la de los sistemas ya existentes del MonaEngine. En particular, se siguió una estructura tipo *Sistema* \rightarrow *Componente* \rightarrow *Controlador* \rightarrow *Clase principal*, que es la misma estructura con la que fue implementado el sistema de animación [10]. El haber usado el concepto de *componente* en la implementación de la solución, generó de forma natural una interfaz de usuario similar al resto de los sistemas del motor, ya que a pesar de que las funcionalidades provistas son diferentes, la forma de acceder a ellas se mantiene. Esto da una sensación de inserción apropiada por parte del sistema de navegación IK en el motor, y demuestra un buen cumplimiento del objetivo 4.

6.2. Reflexiones

Generar buenas soluciones en el campo de la animación no es una tarea fácil, y demanda una gran cantidad de trabajo a nivel de los detalles, pues el ojo es siempre exigente. Lograr movimientos consistentes, verosímiles y que transmitan la personalidad de una criatura, sea humana o no, requiere considerar un gran número de factores. Más allá de que un algoritmo de cinemática inversa lleve a los end-effectors a sus objetivos, la tarea más difícil e importante, es seleccionar cuáles son esos objetivos, y cómo se ve el proceso de llegar a ellos. La personalidad de una animación está en sus detalles, y en cada pequeño movimiento realizado por cada articulación. Si se quiere crear un movimiento realmente verosímil, el algoritmo de cinemática inversa debe ser regulado profundamente, o “saber” muy bien cuál es el movimiento que se está realizando, y qué o quién está realizando ese movimiento.

La solución presentada en este informe, al basarse en una única animación a la vez para representar un movimiento, tiene dificultades para adaptarse bien a todas las condiciones, pues la información de base que utiliza es limitada. Para generar movimientos con un dinamismo real, una opción es tener acceso a varios tipos de movimientos/caminatas, y combinarlos según sea necesario. En otro caso, deben modelarse con cuidado reglas para que los cambios aplicados a la animación se ajusten aún mejor a cada situación. El sistema de navegación IK puede llamarse un primer paso hacia la generación de una animación de caminata dinámica. Se logra el ajuste grueso, en que el personaje utiliza sus piernas para adaptarse al terreno a un nivel básico, y lo hace respetando las cualidades del movimiento original, pero una adaptabilidad verdadera requiere un trabajo mayor.

En el proceso de desarrollar esta memoria, se cometieron varios errores, y al mismo tiempo hubo mucho aprendizaje. Una lección destacable, fue la de que es mucho más razonable no tratar desde el principio de que cada subsistema tenga un alcance demasiado amplio en sus capacidades. En otras palabras, no caer en el empuje de querer solucionarlo todo antes de tener algo que funcione. Se hace presente la importancia de avanzar de a poco, con un diseño limpio, que permita el crecimiento posterior. Muchas partes de este trabajo comenzaron con objetivos mucho más ambiciosos de los que se presentan en la solución final, pero no fue posible llevarlos a un estado de completitud suficiente en todos esos aspectos, y tuvieron que eliminarse varias secciones de código que originalmente demandaron muchas horas de trabajo. Avanzar de manera pausada y paciente, puede evitar invertir horas en trozos de código que terminarán sin ser usados.

Un error algo más concreto, fue el de hacer una suposición con respecto a los clips de animación. En un comienzo, se pensó que el requisito 4, planteado en la sección de validación de animaciones (4.10.1) sería cumplido siempre, porque se asumió que dado que el movimiento de las piernas ocurre en el plano principal de movimiento (4.10.1), entonces necesariamente las rotaciones locales deberían tener ejes de rotación con cierta perpendicularidad a ese plano, para que el movimiento fuera posible. Lamentablemente, las interacciones entre rotaciones y traslaciones locales en la jerarquía dan lugar a mucha variabilidad en cuanto a los ejes de rotación, y esa suposición no generaliza bien. Este descubrimiento fue hecho más bien tarde en el desarrollo, y no hubo tiempo de generar una solución adecuada, que permitiera corregir animaciones que no cumplieran con el requisito, por lo que en la situación actual, sólo ciertas animaciones pueden ser usadas directamente con resultados óptimos en el sistema IK. De esto se desprende la importancia de hacer un estudio más riguroso de las características de los recursos que usará un sistema, antes de adentrarse demasiado en

la implementación, para prevenir problemas como éste, que pueden llegar a ser mucho peores.

6.3. Trabajo futuro

Este sistema, aunque tiene varias cualidades positivas, tiene mucho espacio para mejorar. En primer lugar, sería un gran aporte al sistema, incluir una herramienta para procesar las instancias de `SkinnedMesh`, `Skeleton` y `AnimationClip` para permitir el cumplimiento del requisito 4, y así poder utilizar libremente cualquier animación de caminata. Puede que sea posible resolver este problema modificando únicamente el clip de animación, pero todo apunta a que es necesario reajustar los valores de traslación local en conjunto con los de rotación, lo que significa que la modificación también debe ser hecha en `SkinnedMesh` y `Skeleton` para evitar deformaciones en la animación final. Al igual que la corrección de orientación, que debe ser hecha por el usuario antes de agregar la animación al `IKNavigationComponent` (4.9.1), esta sería una responsabilidad asignada al usuario. Esto, porque considerando que los mismos recursos pueden ser usados por múltiples `IKNavigationComponents`, podría generarse desorden y/o confusión por la posibilidad de que la corrección sea realizada más de una vez innecesariamente. Además, el sistema en su estado actual sólo interactúa con el esqueleto y los clips de animación, por lo que tendría que incluirse una interacción extra con la clase `SkinnedMesh`.

La segunda mejora clave, según lo opinado por los usuarios de prueba (5.2), sería la de corregir la interacción de los pies con el piso (figura 6.2), reorientándolos correctamente para que no lo atravesasen. Además de solucionar el problema de la orientación, queda también el mejorar la precisión de seguimiento de las trayectorias objetivo. Solucionando esos dos problemas, debería obtenerse un posicionamiento más adecuado de los pies.

Lo siguiente, que ya es algo más abierto, sería lograr un mayor dinamismo de los movimientos con alguna de las alternativas planteadas en 6.2. La opción de establecer reglas, que guíen el comportamiento de la animación a un nivel más fino parece óptima, ya que permitiría mantener el uso de una única animación base. Nuevamente, esta idea se extrae de la charla de Alexander Bereznyak en la GDC 2016 [4].

Un punto que recae dentro de los elementos que se trabajaron pero que finalmente fueron descartados, es el de utilizar restricciones para los ángulos de las rotaciones generados. Usar restricciones puede evitar que se generen movimientos imposibles (como flexar las rodillas de forma invertida), y podría ser una adición valiosa al sistema. En este caso, decidió no incluirse, porque el hecho de mantener constantemente un parecido entre la animación generada y la animación original parece evitar que se generen poses extremas de ese tipo. En el estado en que estaba, pareció más sensato no incluir la aplicación de restricciones de movimiento, porque no parecía aportar lo suficiente. De todas maneras, si este sistema llega ampliarse, sería sensato tener esta característica en consideración, para que la calidad de las animaciones generadas sea más robusta.

Para guiar el proceso de crecimiento del sistema, sería también importante estudiar algunos ámbitos de este con mayor profundidad, para lograr comprender mejor sus defectos y sus límites. Primero, debería estudiarse en detalle en qué momentos se producen las fallas

más grandes al seguir las curvas objetivo, y establecer con precisión las causas, para separar los problemas corregibles de los que se deben a la naturaleza del sistema. En relación a lo anterior, podrían generarse visualizaciones en dos dimensiones de las trayectorias objetivo y las trayectorias realmente seguidas por los end-effectors, superponiéndolas para ver directamente los errores existentes.

También sería útil medir el tiempo promedio de ejecución de cada uno de los subsistemas de la solución, para incluir posibles optimizaciones de manera dirigida, especialmente si se quiere llevar al sistema a un punto de exigencia mayor (e.g. al usar decenas de personajes de manera simultánea).

Asimismo, queda pendiente comparar de manera explícita, el enfoque de generación de trayectorias utilizado en este sistema, con otros enfoques que también solucionen el problema de locomoción bípeda en terrenos irregulares, para así lograr una noción más clara de las virtudes y defectos de la solución presentada en esta memoria en un contexto más amplio.

Se recalca que en un sistema que genera resultados a nivel visual como este, siempre queda trabajo por hacer.

Bibliografía

- [1] Andreas Aristidou and Joan Lasenby. Inverse kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver. Technical report, Cambridge University, Engineering Department, 2009.
- [2] Andreas Aristidou and Joan Lasenby. Inverse kinematics techniques in computer graphics: A survey. Technical report, Cambridge University, Engineering Department, 2017.
- [3] Andreas Aristidou and Joan Lasenby. Inverse kinematics techniques in computer graphics: A survey. Technical report, Cambridge University, Engineering Department, 2017. págs. 1-4.
- [4] Alexander Bereznyak. Ik rig: Procedural pose animation. Ubisoft, GDC, 2016.
- [5] Edwin K.P. Chong. *An Introduction to Optimization*. John Wiley Sons, Inc., 2013. págs. 131-153.
- [6] Byron Cornejo. Motor de videojuegos 3d básico para fines pedagógicos. Universidad de Chile, 2021. págs. 61-62.
- [7] Byron Cornejo. Motor de videojuegos 3d básico para fines pedagógicos. Universidad de Chile, 2021.
- [8] Byron Cornejo. Motor de videojuegos 3d básico para fines pedagógicos. Universidad de Chile, 2021. págs. 64-73.
- [9] Byron Cornejo. Motor de videojuegos 3d básico para fines pedagógicos. Universidad de Chile, 2021. págs. 83-96.
- [10] Byron Cornejo. Motor de videojuegos 3d básico para fines pedagógicos. Universidad de Chile, 2021. págs. 96-106.
- [11] Adrian-Vasile Duka. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm. In *Procedia Technology*, volume 12, 2014. págs. 20-27.
- [12] Amar Dum. Design of control system for articulated robot using leap motion sensor. Technical report, Shivaji University, Kolhapur, 2016.
- [13] Michael Garland and Paul S. Heckbert. Fast polygonal approximation of terrains and height fields. Technical report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1995.

- [14] Jason Gregory. *Game Engine Architecture*. A K Peters/CRC Press, 2015. págs. 181-200.
- [15] Jason Gregory. *Game Engine Architecture*. A K Peters/CRC Press, 2015. págs. 200-209.
- [16] Jason Gregory. *Game Engine Architecture*. A K Peters/CRC Press, 2015. págs. 548-551.
- [17] Kris Hauser and Intelligent Motion Laboratory. Section ii. modeling, chapter 6. inverse kinematics, 2018.
- [18] Daniel Holden and Taku Komura. Phase-functioned neural networks for character control. In *ACM Transactions on Graphics*, volume 36, 2017.
- [19] Michael Richard Isaacs. *Partitioning The Mechanical Cost Of Human Walking: Unveiling Cost Asymmetries For Bionic Technologies*. PhD thesis, University of Nevada, Las Vegas, 2020.
- [20] Rune Skovbo Johansen. Automated semi-procedural animation for character locomotion. Master’s thesis, Department of Information and Media Studies, Aarhus University, 2009.
- [21] Jim Lambers. Linear interpolating splines. The University of Southern Mississippi, School of Mathematics and Natural Sciences, 2010. págs. 1-3.
- [22] MathWorks. Row-major and column-major array layouts.
- [23] Xue Bin Peng and Glen Berseth. Deeploco: Dynamic locomotion skills using hierarchical deep reinforcement learning. In *ACM Transactions on Graphics*, volume 36, 2017.
- [24] Department Of Physics. Three-dimensional rotation matrices. University of California, Santa Cruz, 2012. págs. 4-5.
- [25] Hyun Joon Shin and Jehee Lee. Computer puppetry: An importance-based approach. Technical report, Korea Advanced Institute of Science Technology, 2001. págs. 67-94.
- [26] He Zhang and Sebastian Starke. Mode-adaptive neural networks for quadruped motion control. In *ACM Transactions on Graphics*, volume 37, 2018.

Anexos

Anexo A

A.1. Diagrama UML

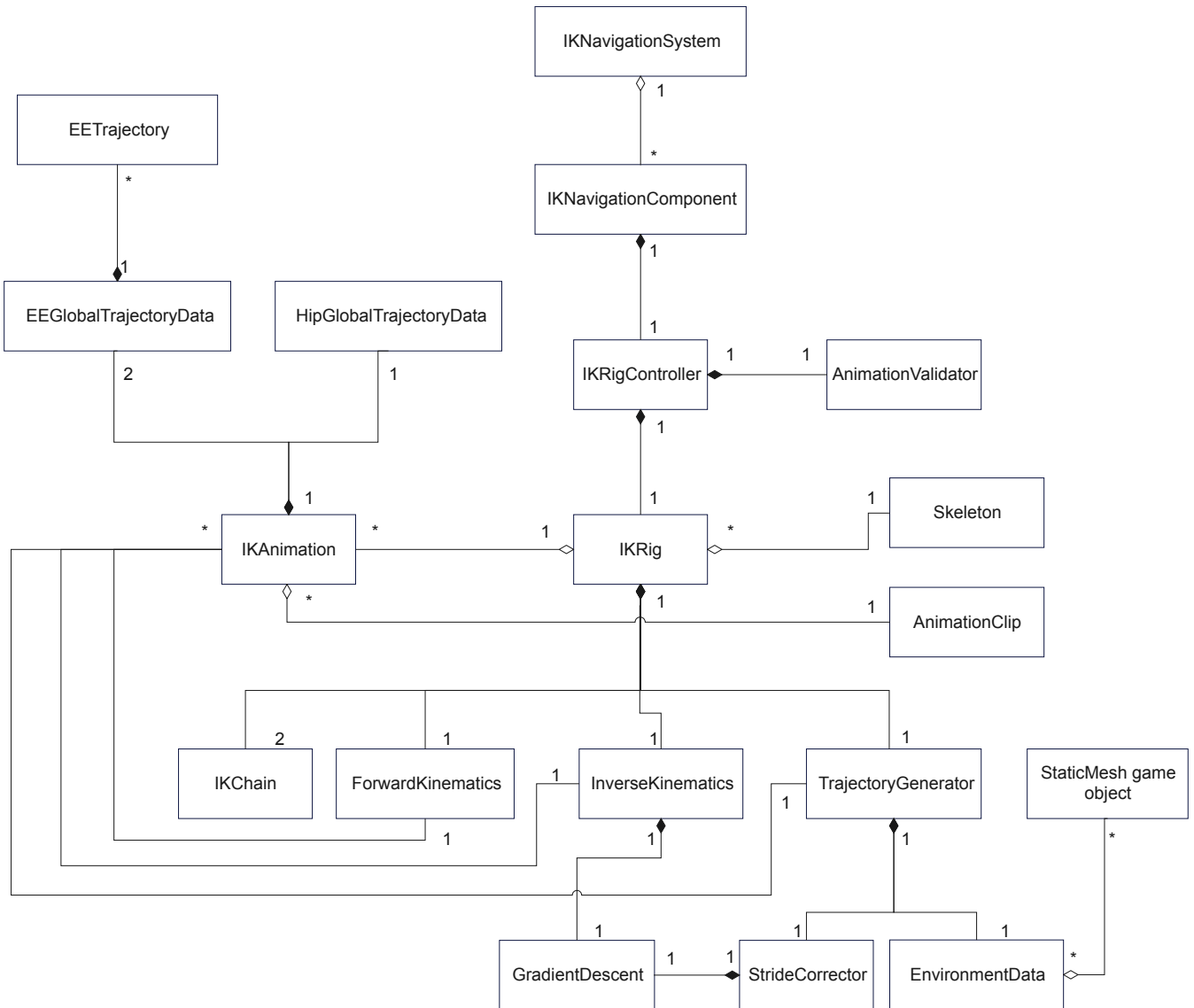


Figura A.1: Diagrama UML básico de la solución.

A.2. Diagrama de flujo

Se presenta en la figura A.2 el diagrama de flujo básico del sistema, que muestra los pasos seguidos en cada iteración del motor. Notar que el sistema de navegación IK es actualizado antes que el sistema de animación. De esta forma, para cada animationTime, el sistema de animación extrae de los clips de animación las transformaciones de las articulaciones luego de que ya han sido modificadas por el sistema de navegación IK.

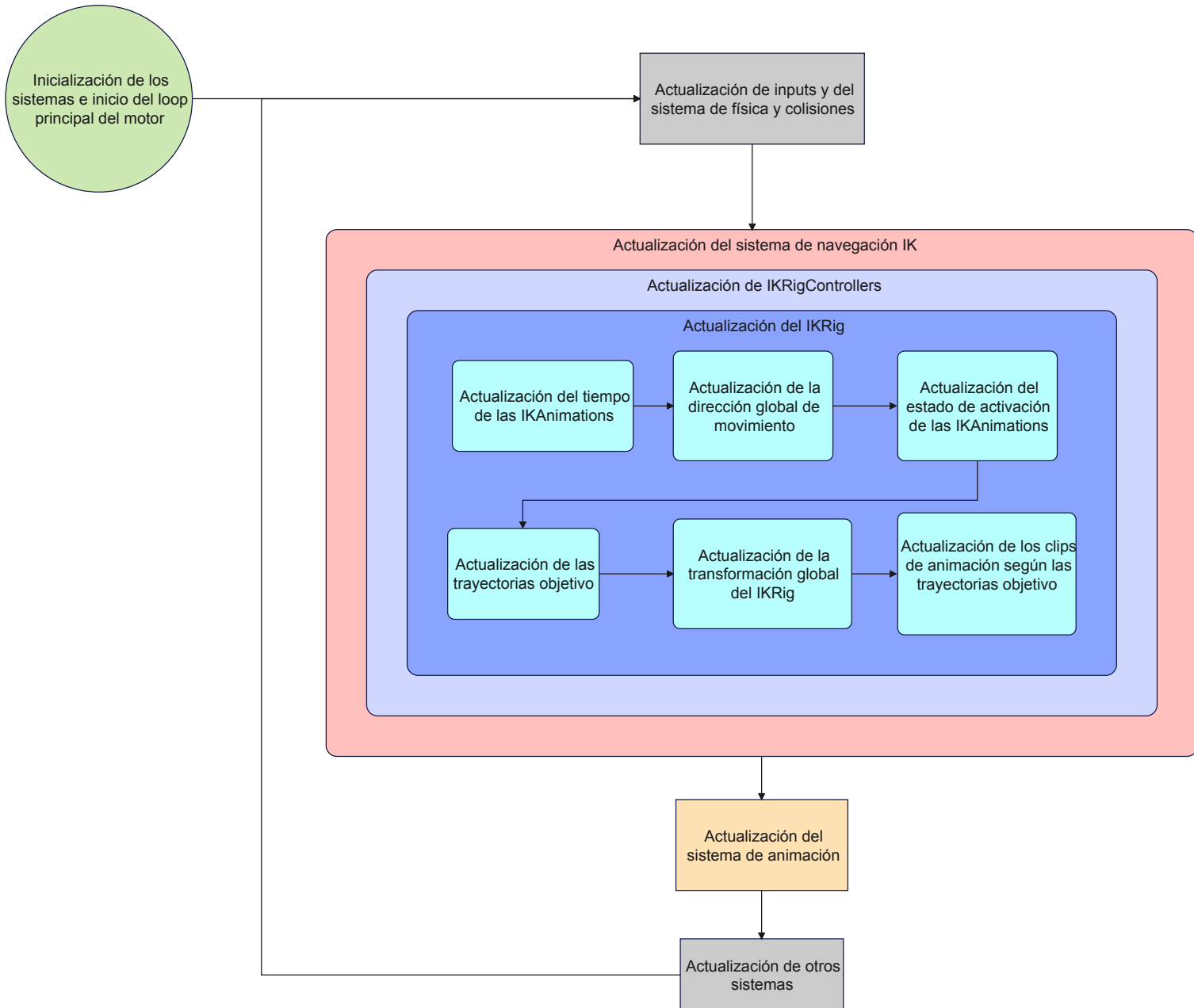


Figura A.2: *Diagrama de flujo básico de la solución.*

Anexo B

B.1. Matriz de rotación en función de un ángulo y eje arbitrarios

De [24] se extrae la ecuación para una matriz de 3x3, donde \vec{a} es el eje de rotación y θ el ángulo:

$$R(\theta, \vec{a}) = \begin{bmatrix} \cos\theta + a_0^2(1 - \cos\theta) & a_0a_1(1 - \cos\theta) - a_2\sin\theta & a_0a_2(1 - \cos\theta) + a_1\sin\theta \\ a_0a_1(1 - \cos\theta) + a_2\sin\theta & \cos\theta + a_1^2(1 - \cos\theta) & a_1a_2(1 - \cos\theta) - a_0\sin\theta \\ a_0a_2(1 - \cos\theta) - a_1\sin\theta & a_1a_2(1 - \cos\theta) + a_0\sin\theta & \cos\theta + a_2^2(1 - \cos\theta) \end{bmatrix}$$

Expandiendo a 4x4 y derivando con respecto a θ :

$$\frac{\partial R(\theta, \vec{a})}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} -\sin\theta + a_0^2\sin\theta & a_0a_1\sin\theta - a_2\cos\theta & a_0a_2\sin\theta + a_1\cos\theta & 0 \\ a_0a_1\sin\theta + a_2\cos\theta & -\sin\theta + a_1^2\sin\theta & a_1a_2\sin\theta - a_0\cos\theta & 0 \\ a_0a_2\sin\theta - a_1\cos\theta & a_1a_2\sin\theta + a_0\cos\theta & -\sin\theta + a_2^2\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

B.2. Enlace al repositorio de la solución

El trabajo presentado en este informe se encuentra en el siguiente enlace: https://github.com/agumatt/MonaEngine_IK.