UE 动画系统源码阅读记录

预备知识

多线程

虚幻引擎中主要的线程有三个：

GameThread(主线程)：主要用来更新游戏逻辑，包括GamePlay、动画、物理等等

RenderThread：主要用来处理GameThread提交的渲染命令，将其转换为RHI线程中可以使用的渲染命令

RHIThread：主要用来处理RenderThread提交的渲染命令，将其转换为对应渲染API命令，以便发送至GPU处理渲染。

动画处理时，也会另起线程来处理动画更新流程，下文中会介绍到。

涉及的类型

类名	描述
FSkelMeshRenderSection	表示模型的一个部分。保存这个部分的材质索引，在IndexBuffer中的顶点索引偏移，三角形数量，蒙皮的骨骼索引等
FSkeletalMeshLODRenderData	表示模型在Lod层级的渲染数据。保存该Lod层级上的FSkelMeshRenderSection， 顶点Buffer，蒙皮权重Buffer，MorphTarget信息，布料信息以及该层级上的活跃的骨骼
FSkeletalMeshRenderData	表示模型的渲染数据。保存一组FSkeletalMeshLODRenderData，以及Lod信息，包括有多少lod层级，当前正在使用哪个层级等等
USkeletalMesh	表示一组组成模型表面的多边形和一个与之对应的骨架。包括FSkeletalMeshRenderData数据
FSkeletalMeshObject	模型渲染数据的接口，包括初始化渲染资源、更新渲染资源、获取VertexFacotry等接口.负责将FSkeletalMeshRenderData中的渲染数据处理成GPU可以使用的格式
FSkeletalMeshObjectLOD	对应于FSkeletalMeshObjectLOD
FSkeletalMeshObjectCPUSkin	负责CPUSkin的渲染实现.
FSkeletalMeshObjectGPUSkin	负责GPUSkin的渲染接口(PC上默认是GPUSkin)
FGPUBaseSkinVertexFactory	GPU蒙皮的顶点工厂
FDynamicSkelMeshObjectDataGPUSkin	一系列蒙皮所需的矩阵（Transform变换信息）。游戏线程与渲染线程通信的主要数据结构
UAnimInstance	动画蓝图类

类名	描述
FAnimInstanceProxy	动画更新代理类，为了支持在游戏线程之外的线程上更新动画而产生的类。多线程更新动画
USkinnedMeshComponent	支持蒙皮
USkeletalMeshComponent	支持动画

部分类详解

FSkelMeshRenderSection

表示SkeletalMesh的一个部分

成员变量

- uint16 MaterialIndex 材质索引
- uint32 BaseIndex 在IndexBuffer中的偏移值
- uint32 NumTriangles Section中包含的三角形数量
- TArray BoneMap；影响Section的骨骼索引数组
- uint32 NumVertices; 顶点数量

FSkeletalMeshLODRenderData

表示模型在Lod层级的渲染数据

成员变量

- TArray　RenderSections; 一组组成整个SkeletalMesh的RenderSection
- VertexBuffers、IndexBuffer等
- FSkinWeightVertexBuffer　　SkinWeightVertexBuffer；SkinWeightBuffer
- TArray ActiveBoneIndices；活跃的骨骼Index
- TArray RequiredBones; Lod层的骨骼

FSkeletalMeshRenderData

- TIndirectArray LODRenderData; 渲染数据
- LodIndex

USkeleton

成员变量

- TArray BoneTree;

  骨骼树的数组。FBoneNode中定义了骨骼的名字和父类在数组中的索引

- FRerenceSkeleton ReferenceSkeleton;

  这个对象中保存了在原始资源中的骨骼，包括名字和变换(A-Pose/T-Pose)，也保存在用户编辑后添加的虚拟骨骼数据。

USkeletalMesh

当游戏或编辑器加载时，磁盘数据首先会被反序列化到此类的成员变量中。

成员变量

- TUniquePtr SkeletalMeshRenderData;
- TObjectPtr Skeleton;

USkinnedMeshComponent

负责蒙皮的类

- TObjectPtr SkeletalMesh
- TArray ComponentSpaceTransformsArray[2]

  动画线程和主线程用于骨骼矩阵交换的Buffer

USkeletalMeshComponent

负责动画的类

- TObjectPtr AnimScriptInstance

  动画蓝图实例

UAnimInstance

动画蓝图类，负责动画更新以及输出每帧的姿势

- TObjectPtr CurrentSkeleton;
- TArray<struct FAnimMontageInstance*> MontageInstances;

  动画Montage数组
- FAnimInstanceProxy* AnimInstanceProxy;

  负责多线程更新动画的代理类实例

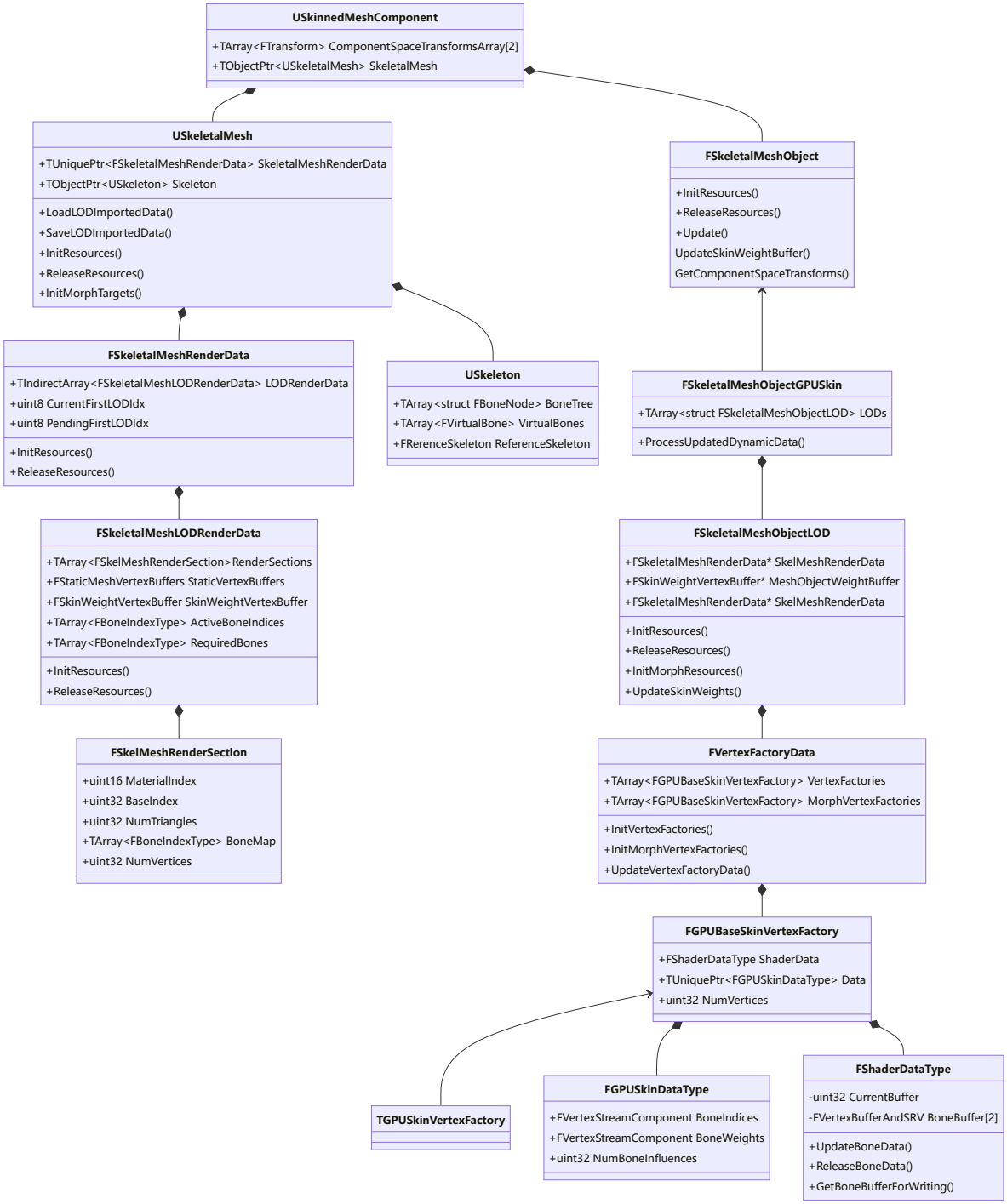
FAnimInstanceProxy

负责多线程更新动画的代理类

- FAnimNode_Base* RootNode;

  动画蓝图根节点，通过这个节点可以更新和计算所有动画蓝图节点

渲染（蒙皮）相关类图

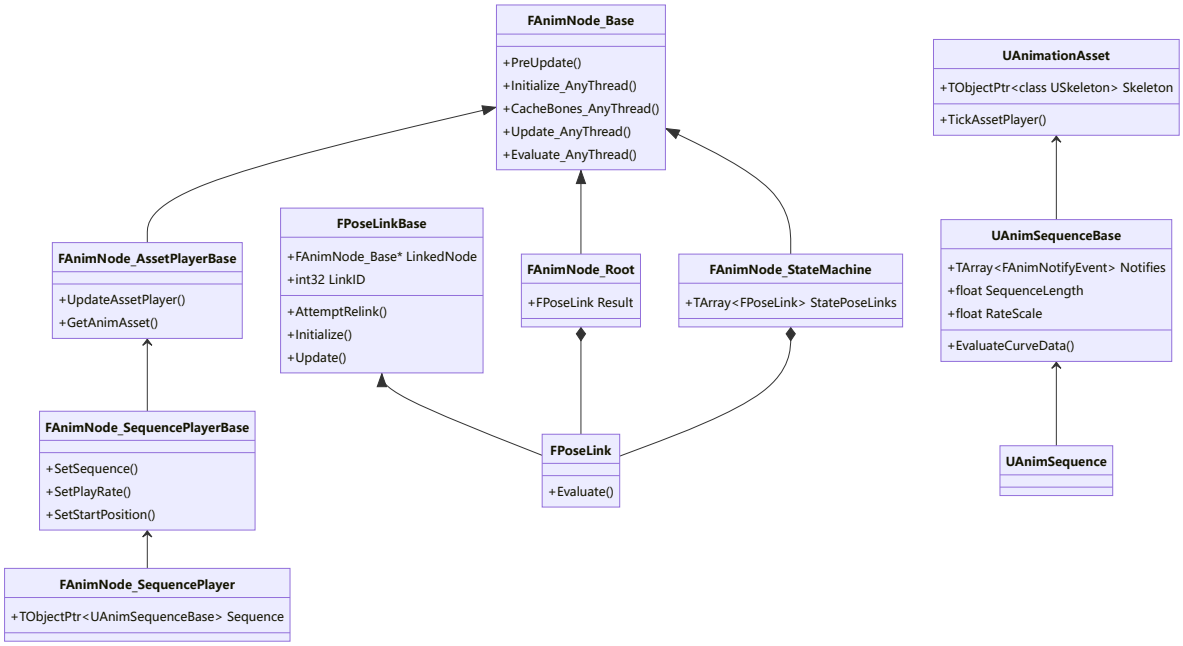

USkinnedMeshComponent
+TArray<FTransform> ComponentSpaceTransformsArray[2]
+TObjectPtr<USkeletalMesh> SkeletalMesh
USkeletalMesh
+TUniquePtr<FSkeletalMeshRenderData> SkeletalMeshRenderData
+TObjectPtr<USkeleton> Skeleton
+LoadLODImportedData()
+SaveLODImportedData()
+InitResources()
+ReleaseResources()
+InitMorphTargets()
FSkeletalMeshObject
+InitResources()
+ReleaseResources()
+Update()
UpdateSkinWeightBuffer()
GetComponentSpaceTransforms()
FSkeletalMeshRenderData
+TIndirectArray<FSkeletalMeshLODRenderData> LODRenderData
+uint8 CurrentFirstLODIdx
+uint8 PendingFirstLODIdx
+InitResources()
+ReleaseResources()
USkeleton
+TArray<struct FBoneNode> BoneTree
+TArray<FVirtualBone> VirtualBones
+FRerenceSkeleton ReferenceSkeleton
FSkeletalMeshObjectGPUSkin
+TArray<struct FSkeletalMeshObjectLOD> LODs
+ProcessUpdatedDynamicData()
FSkeletalMeshLODRenderData
+TArray<FSkelMeshRenderSection>RenderSections
+FStaticMeshVertexBuffers StaticVertexBuffers
+FSkinWeightVertexBuffer SkinWeightVertexBuffer
+TArray<FBoneIndexType> ActiveBoneIndices
+TArray<FBoneIndexType> RequiredBones
+InitResources()
+ReleaseResources()
FSkeletalMeshObjectLOD
+FSkeletalMeshRenderData* SkelMeshRenderData
+FSkinWeightVertexBuffer* MeshObjectWeightBuffer
+FSkeletalMeshRenderData* SkelMeshRenderData
+InitResources()
+ReleaseResources()
+InitMorphResources()
+UpdateSkinWeights()
FSkelMeshRenderSection
+uint16 MaterialIndex
+uint32 BaseIndex
+uint32 NumTriangles
+TArray<FBoneIndexType> BoneMap
+uint32 NumVertices
FVertexFactoryData
+TArray<FGPUBaseSkinVertexFactory> VertexFactories
+TArray<FGPUBaseSkinVertexFactory> MorphVertexFactories
+InitVertexFactories()
+InitMorphVertexFactories()
+UpdateVertexFactoryData()
FGPUBaseSkinVertexFactory
+FShaderDataType ShaderData
+TUniquePtr<FGPUSkinDataType> Data
+uint32 NumVertices
TGPUSkinVertexFactory
FGPUSkinDataType
+FVertexStreamComponent BoneIndices
+FVertexStreamComponent BoneWeights
+uint32 NumBoneInfluences
FShaderDataType
-uint32 CurrentBuffer
-FVertexBufferAndSRV BoneBuffer[2]
+UpdateBoneData()
+ReleaseBoneData()
+GetBoneBufferForWriting()

动画图表数据结构

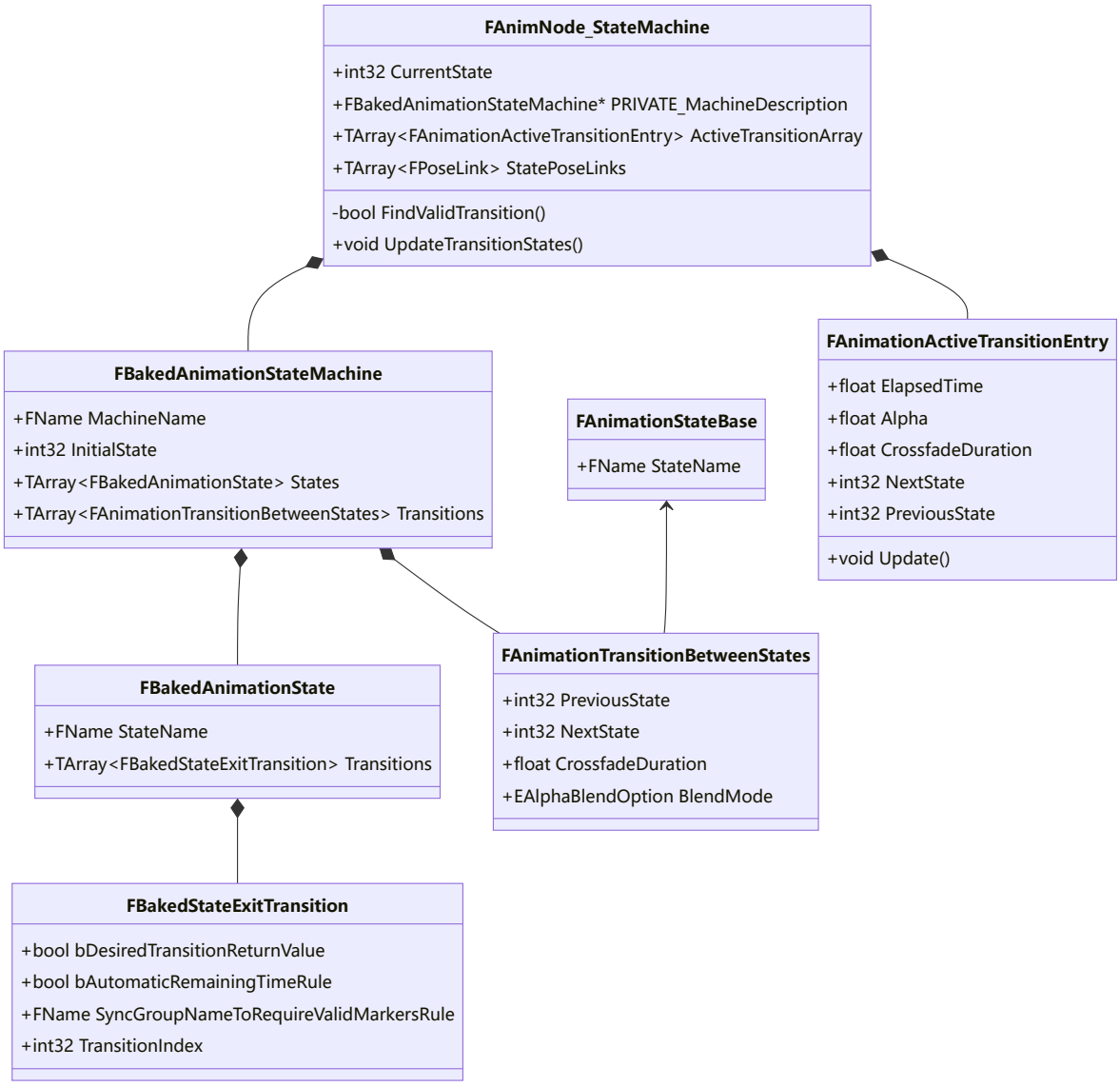
所有在动画图表中用到的动画节点都继承自FAnimNode_base,以下是其类图，简单展示了其两个子节点以及节点间链接的抽象类

其中FAnimNode_Root是在AnimInstance中存储的动画图表的根节点，负责链接动画蓝图和节点，其中包含一个FPoseLinkBase链接，链接到动画图表中具体的节点。这个具体的节点可以是FAnimNode_StateMachine或者是其他输入姿势的节点。

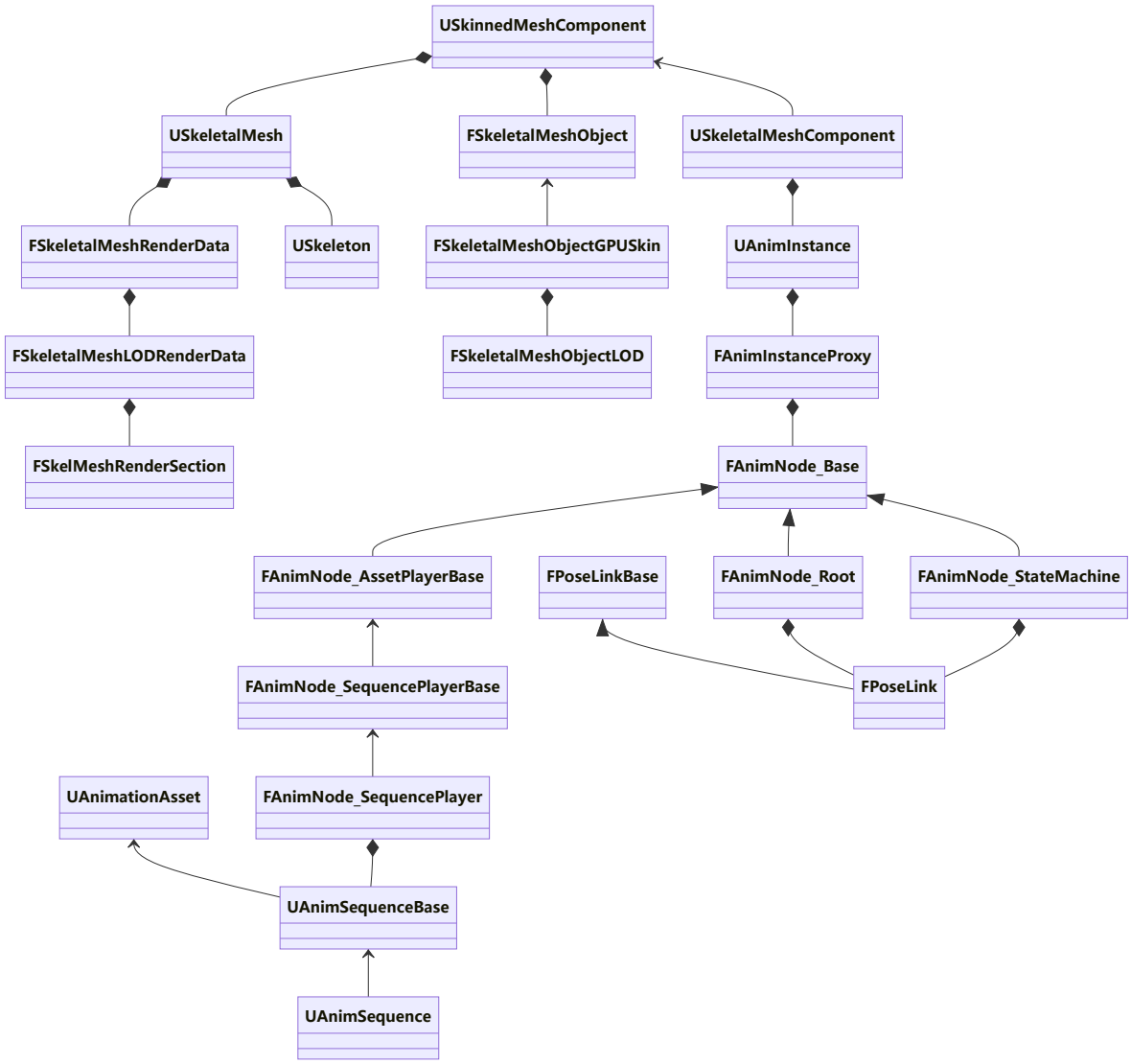
动画节点相关类图


FAnimNode_Base
+PreUpdate()
+Initialize_AnyThread()
+CacheBones_AnyThread()
+Update_AnyThread()
+Evaluate_AnyThread()
UAnimationAsset
+TObjectPtr<class USkeleton> Skeleton
+TickAssetPlayer()
FAnimNode_AssetPlayerBase
+UpdateAssetPlayer()
+GetAnimAsset()
FPoseLinkBase
+FAnimNode_Base* LinkedNode
+int32 LinkID
+AttemptRelink()
+Initialize()
+Update()
FAnimNode_Root
+FPoseLink Result
FAnimNode_StateMachine
+TArray<FPoseLink> StatePoseLinks
UAnimSequenceBase
+TArray<FAnimNotifyEvent> Notifies
+float SequenceLength
+float RateScale
+EvaluateCurveData()
FAnimNode_SequencePlayerBase
+SetSequence()
+SetPlayRate()
+SetStartPosition()
FPoseLink
+Evaluate()
UAnimSequence
FAnimNode_SequencePlayer
+TObjectPtr<UAnimSequenceBase> Sequence

状态机


FAnimNode_StateMachine
+int32 CurrentState
+FBakedAnimationStateMachine* PRIVATE_MachineDescription
+TArray<FAnimationActiveTransitionEntry> ActiveTransitionArray
+TArray<FPoseLink> StatePoseLinks
-bool FindValidTransition()
+void UpdateTransitionStates()
FBakedAnimationStateMachine
+FName MachineName
+int32 InitialState
+TArray<FBakedAnimationState> States
+TArray<FAnimationTransitionBetweenStates> Transitions
FAnimationStateBase
+FName StateName
FAnimationActiveTransitionEntry
+float ElapsedTime
+float Alpha
+float CrossfadeDuration
+int32 NextState
+int32 PreviousState
+void Update()
FBakedAnimationState
+FName StateName
+TArray<FBakedStateExitTransition> Transitions
FAnimationTransitionBetweenStates
+int32 PreviousState
+int32 NextState
+float CrossfadeDuration
+EAlphaBlendOption BlendMode
FBakedStateExitTransition
+bool bDesiredTransitionReturnValue
+bool bAutomaticRemainingTimeRule
+FName SyncGroupNameToRequireValidMarkersRule
+int32 TransitionIndex

关系图


USkinnedMeshComponent
USkeletalMesh
FSkeletalMeshObject
USkeletalMeshComponent
FSkeletalMeshRenderData
USkeleton
FSkeletalMeshObjectGPUSkin
UAnimInstance
FSkeletalMeshLODRenderData
FSkeletalMeshObjectLOD
FAnimInstanceProxy
FSkelMeshRenderSection
FAnimNode_Base
FAnimNode_AssetPlayerBase
FPoseLinkBase
FAnimNode_Root
FAnimNode_StateMachine
FAnimNode_SequencePlayerBase
FPoseLink
UAnimationAsset
FAnimNode_SequencePlayer
UAnimSequenceBase
UAnimSequence

SkeletalMeshComponent初始化

流程简介

1. `UActorComponent::ExecuteRegisterEvents`会在游戏启动时执行，主要负责创建和初始化游戏对象的动画，渲染，物理等状态

```
UActorComponent::ExecuteRegisterEvents()
{
    // 动画
    USkeletalMeshComponent::OnRegister();
    {
        USkeletalMeshComponent::InitAnim(bool bForceReinit);
        {
            TickAnimation();
            RefreshBoneTransforms();
        }
    }

    // 渲染

 USkinnedMeshComponent::CreateRenderState_Concurrent(FRegisterComponentConte
xt* Context);
    {
        // 创建MeshObject，保存蒙皮数据，是游戏线程与渲染线程传递数据的对象
        // 区分GPUSkin和CPUSkin，默认GPUSkin
        MeshObject = ::new FSkeletalMeshObjectGPUSkin(this,
SkelMeshRenderData, SceneFeatureLevel);
        {
            // 创建FSkeletalMeshObjectLOD，用来保存FSkeletalMeshLODRenderData
            InitResources();
            {
                FSkeletalMeshObjectLOD::InitResources();
                {

 GPUSkinVertexFactories.InitVertexFactories(VertexBuffers,
LODData.RenderSections, InFeatureLevel);
                    {
                        CreateVertexFactory(VertexFactories, VertexBuffers,
InFeatureLevel);
                        {
                            // RenderThread
                            InitGPUSkinVertexFactoryComponents();
```

```
                                {
                                    // 绑定BoneIndex
                                    // 绑定SkinWeight
                                }
                            }
                        }
                    }
                }
            }

            // 创建渲染线程的资源

 UPrimitiveComponent::CreateRenderState_Concurrent(FRegisterComponentContext
* Context);
            {
                //渲染Dirty标记设置
                UActorComponent::CreateRenderState_Concurrent();
                // 在渲染线程上创建游戏线程对象的代理
                GetWorld()->Scene->AddPrimitive(this);
                FScene::AddPrimitive(Primitive);
                {
                    Primitive->CreateSceneProxy();
                }
            }

            // 更新MeshObject动态渲染数据
        }

        // 物理
        UActorComponent::CreatePhysicsState(true);
        {

        }
}
```

`USkeletalMeshComponent::OnRegister()` 负责创建和初始化动画相关的资源，主要调用了 `USkeletalMeshComponent::InitAnim`

```
USkeletalMeshComponent::OnRegister();
{
    USkeletalMeshComponent::InitAnim(bool bForceReinit);
    {
        // 根据lodindex计算需要更新的骨骼
        RecalcRequiredBones();
        {
            // FSkeletalMeshLODRenderData数据中已经保存了LodIndex对应的普通骨骼数
组数据
            // 添加虚拟骨骼
            // 添加物理骨骼,确保PhysicsAsset中用到的骨骼都在更新列表中
            // 删除不可见的骨骼
            // 添加镜像骨骼
            // 添加Socke骨骼
            // 添加ShadowShapeBones
        }

```

```
        USkeletalMeshComponent::InitializeAnimScriptInstance(bool bForceReinit, bool bInDeferRootNodeInitialization);
        {
            // 创建并初始化AnimInstance对象
            // 动画蓝图节点的初始化，例如状态机节点的初始化
            UAnimInstance::InitializeAnimation(bool bInDeferRootNodeInitialization);
            {
                // 创建并初始化FAnimInstanceProxy对象
                FAnimInstanceProxy::Initialize();
                {
                    // 初始化一些对象，例如Skeleton,SkeltetalMeshCom等
                    // URO优化初始化

                    // 从蓝图中获取RootNode
                }
            }
            // 比如调用动画蓝图的BeginPlay等事件
            // 更新MorphTargets


            FAnimInstanceProxy::InitializeRootNode();
            {
                // 初始化FAnimNode_StateMachine，设置BakedStateMachine
                // 缓存所有需要preupdate的node
                // 缓存所有dynamic reset nodes

                // 初始化RootNode，动画节点的初始化
            }
        }


        // 更新动画，详细内容在下文中描述
        TickAnimation();

        // 更新骨骼Transform画，详细内容在下文中描述
        RefreshBoneTransforms();

        // 更新Component的坐标
        UpdateComponentToWorld();
    }
}
```

SkeletalMesh更新

动画更新

```
// GameThread
USkeletalMeshComponent::TickComponent()
{
    // 布料数据更新

    USkinnedMeshComponent::TickComponent(float DeltaTime, enum ELevelTick TickType, FActorComponentTickFunction *ThisTickFunction);
    {
```

```
        // Lod计算
        // 如果需要先TickPose
         USkeletalMeshComponent::TickPose(float DeltaTime, bool bNeedsValidRootMotion);
         {
             // URO优化
             USkeletalMeshComponent::TickAnimation(float DeltaTime, bool bNeedsValidRootMotion)
             {
                 USkeletalMeshComponent::TickAnimInstances(float DeltaTime, bool bNeedsValidRootMotion);
                 {
                     // 动画蓝图更新
                     // 主线程中的动画蓝图更新主要负责:
                     // 1 PreUpdateAnimation
                     // 2 montage更新
                     // 3 事件图表的更新
                     UAnimInstance::UpdateAnimation(DeltaTime * GlobalAnimRateScale, bNeedsValidRootMotion)
                 }
             }
         }

        if( ShouldUpdateTransform(bLODHasChanged) )
        {
            // 更新骨骼矩阵
            RefreshBoneTransforms(ThisTickFunction);
        }
        else
        {
            // 多线程更新
            USkeletalMeshComponent::DispatchParallelTickPose(ThisTickFunction);
        }

        // 将标记为置为Dirty
        UActorComponent::MarkRenderDynamicDataDirty();
    }
}
```

```
// GameThread
USkeletalMeshComponent::RefreshBoneTransforms(FActorComponentTickFunction* TickFunction)
{
    // 初始化AnimEvaluationContext

    // 如果需要更新动画
    {
        // 动画初始化时，更新一次动画
        TickAnimation(0.f, false);
    }

    // 如果开启多线程更新动画
```

```
    if (bDoParallelEvaluation)
    {
        USkeletalMeshComponent::DispatchParallelEvaluationTasks();
        {
            // 交换TransformBuffer，以便蒙皮时主线程和渲染线程使用
            SwapEvaluationContextBuffers();

            // 创建FParallelAnimationEvaluationTask
            FParallelAnimationEvaluationTask::DoTask()
            {
                Comp->ParallelAnimationEvaluation();
            }

            // 创建FParallelAnimationCompletionTask
            FParallelAnimationCompletionTask::DoTask()
            {
                Comp->CompleteParallelAnimationEvaluation(bPerformPostAnimEvaluation);
            }
        }
    }
    // 否则
    {
        // 在主线程更新动画
        DoParallelEvaluationTasks_OnGameThread();
    }
}
```

```
// 动画更新线程
USkeletalMeshComponent::ParallelAnimationEvaluation();
{
    PerformAnimationProcessing();
    {
        UAnimInstance::ParallelUpdateAnimation();

        //输出这一帧骨骼的姿势（骨骼空间下）
        EvaluateAnimation(InSkeletalMesh, InAnimInstance, OutRootBoneTranslation, OutCurve, EvaluatedPose, Attributes);
        {
            UInAnimInstance::ParallelEvaluateAnimation(bForceRefpose, InSkeletalMesh, EvaluationData);
        }

        FinalizePoseEvaluationResult()
        {
            // 拷贝FCompactPose的数据到OutBoneSpaceTransforms中
            // 计算Root骨骼的位移
        }

        // 将骨骼的Transform从BoneSpace转换到组件空间下
        FillComponentSpaceTransforms();
    }

```

```
    // 插值
    ParallelDuplicateAndInterpolate();
}
```

动画蓝图更新

```
// GameThread
UAnimInstance::UpdateAnimation(float DeltaSeconds, bool
bNeedsValidRootMotion, EUpdateAnimationFlag UpdateFlag);
{
    UAnimInstance::PreUpdateAnimation(DeltaSeconds);
    {
        // 重置动画通知队列
        FAnimInstanceProxy::PreUpdate(DeltaSeconds);
        {
            // 准备一些在动画线程中会用的的数据
            // 如Skeleton、Component的transform数据等

            //对动画蓝图中的需要PreUpdate的每个AnimNode调用PreUpdate();
        }
    }

    // 动画蒙太奇更新
    UpdateMontage(DeltaSeconds);

    // 动画蓝图事件图表更新，主要负责计算动画图表需要的数据
    BlueprintUpdateAnimation(DeltaSeconds);

    // 初始化时,bShouldImmediateUpdate为true
    if (bShouldImmediateUpdate)
    {
        // 初始化时，GameThread更新一次动画
        ParallelUpdateAnimation();
        PostUpdateAnimation();
    }
}
```

```

// 动画更新线程
UAnimInstance::ParallelUpdateAnimation();
{
    FAnimInstanceProxy::UpdateAnimation();
    {
        // 初始化FAnimationUpdateContext
        // FAnimInstanceProxy
        // BlendWeight
        // DeltaTime

        // 此处的RootNode就是以AnimGraph为名的动画蓝图根节点
        UpdateAnimation_WithRoot(Context, RootNode, NAME_AnimGraph);
        {
            // ?
            CacheBones();

```

```
            // 多线程更新事件图表
            UAnimInstance::NativeThreadSafeUpdateAnimation();
            UAnimInstance::BlueprintThreadSafeUpdateAnimation();

            UpdateAnimationNode_WithRoot();
            {
                UpdateAnimationNode();
                {
                    InRootNode->Update_AnyThread(InContext);
                    {
                        FPoseLink::Update()
                        {
                            // LinkedNode是动画图表中具体的可以输入姿势的节点，如FAnimNode_StateMachine等
                            LinkedNode->Update_AnyThread(LinkContext);
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```
// 动画更新线程
UAnimInstance::ParallelEvaluateAnimation(bool bForceRefPose, const USkeletalMesh* InSkeletalMesh, FParallelEvaluationData& OutEvaluationData)
{
    // 创建并初始化FPoseContext
    // FAnimInstanceProxy
    // FCompactPose:记录姿势。（RequiredBone骨骼索引的数组）
    // FBlendedCurve

    FAnimInstanceProxy::EvaluateAnimation_WithRoot();
    {
        Evaluate_WithRoot();
        {
            InRootNode->Evaluate_AnyThread(Output);
            {
                FPoseLink::Evaluate(FPoseContext& Output);
                {
                    // LinkedNode是动画图表中具体的可以输入姿势的节点，如FAnimNode_StateMachine等
                    LinkedNode->Evaluate_AnyThread(Output);
                }
            }
        }
    }
}
```

```
// 动画更新线程
// 以Sequence_player为例

InRootNode->Update_AnyThread(InContext);
```

```
{
    FPoseLink::Update()
    {
        // LinkedNode是动画图表中具体的可以输入姿势的节点，如FAnimNode_StateMachine等
        FAnimNode_AssetPlayerBase::Update_AnyThread(LinkContext);
        {
            FAnimNode_SequencePlayerBase::UpdateAssetPlayer();
            {
                // ?
                FAnimNode_AssetPlayerBase::CreateTickRecordForNode();
                {

                }
            }
        }
    }
}

```

```
// 动画更新线程
// 以Sequence_player为例
InRootNode->Evaluate_AnyThread(Output);
{
    FPoseLink::Evaluate(FPoseContext& Output);
    {
        // LinkedNode是动画图表中具体的可以输入姿势的节点，如FAnimNode_StateMachine等
        FAnimNode_SequencePlayerBase::Evaluate_AnyThread(FPoseContext& Output);
        {
            //
            FAnimationPoseData AnimationPoseData(Output);
            UAnimSequence::GetAnimationPose();
            {
                UAnimSequence::GetBonePose();
                {
                    // 提取曲线数据
                    UAnimSequence::EvaluateCurveData();
                    // 提取骨骼变换数据，Pose
                    DecompressPose()
                }
            }
        }
    }
}
```

```
// 动画更新线程
// 以StateMachine为例
InRootNode->Initialize_AnyThread(Output);
{
    FPoseLink::Initialize();
    {
        FAnimNode_StateMachine::Initialize_AnyThread();
```

```
        {
            // 根据FBakedAnimationStateMachine的state创建StatePoseLinks
            // 设置StatePoseLink的LinkID，之后根据LinkID获取AnimNode

            // 初始化FAnimNode_TransitionResult，这个结构体包含了条件语句的代理函数，负责计算是否满足转换条件

            // 设置state
            SetState(Context, Machine->InitialState);
            {
                // 调用OnGraphStatesExited回调
                // 设置CurrentState

                // 当前State节点初始化
                // StatePoseLink链接的节点初始化

                // OnGraphStatesEntered调用
            }
        }
    }
}

```

```
// 动画更新线程
// 以StateMachine为例

// 找到可以转换的节点，进行转换

FAnimNode_StateMachine::Update_AnyThread()
{
    // 找到满足条件的转换PotentialTransition
    FAnimNode_StateMachine::FindValidTransition();
    {
        // 获取当前State的StateEntryRuleNode节点并执行其条件代理函数，获得是否满足转换条件的结果

        // 遍历当前State的所有ExitTransition，遍历的顺序优先级从高到低的顺序
        // 根据ExitTransition.CanTakeDelegateIndex获取条件判断代理节点FAnimNode_TransitionResult

        // 如果设置了同步组，判断是否满足同步组的条件

        // 或者如果有条件判断代理，则执行条件判断代理

        // 如果是bAutomaticRemainingTimeRule，判断当前节点动画剩余时间是否小于混出时间

        // 如果bCanEnterTransition为true，获取转换终点State，
        // 如果下一个State是Conduit，则再执行一次FindValidTransition(),找到满足条件的State
        // 否则用获得数据填充OutPotentialTransition，然后整个函数返回
        // 如果bCanEnterTransition为false，则继续
    }

    // 如果需要转换State：
```

```
    // 触发上一个转换的InterruptNotify(添加到通知队列中)
    // 触发当前状态的EndNotify(添加到通知队列中)
    // 触发下一个状态的StartNotify(添加到通知队列中)
    // 创建新的FAnimationActiveTransitionEntry，添加到ActiveTransitionArray中
    // 将当前状态设置为转换后的状态

    // 继续寻找可以转换的状态直到找不到或者超过最大寻找次数为止

    // 遍历ActiveTransitionArray
    FAnimationActiveTransitionEntry::Update();
    {
        // 根据DeltaTime和CrossfadeDuration更新混合参数
        // 输出是否过渡完成
    }

    // 过渡完成之后添加通知时间到通知队列中

    // 过渡过程
    // 调用节点的Update_AnyThread
    FAnimNode_StateMachine::UpdateTransitionStates()
    {
        // 标准混合模式，按权重更新混出节点和混入节点

        // 惯性化混合，只更新混入节点
    }

    // 删除ActiveTransitionArray数组中已经完成混合的Transition


    // 如果没有发生过Transition
    // 更新当前节点Update_AnyThread


}
```

```
// 动画更新线程
// 以StateMachine为例

FAnimNode_StateMachine::Evaluate_AnyThread()
{
    // ActiveTransitionArray.Num() > 0时，正在转换时

    // 根据混合模式调用不同的函数
    // 标准混合时
    EvaluateTransitionStandardBlend(Output, ActiveTransition,
bIntermediatePoseIsValid);
    {
       // 对混入节点 调用Evaluate_AnyThread，获取姿势

        // 当前节点的姿势、曲线与混入节点的姿势、曲线作混合

    }

    // 惯性化混合时
    EvaluateState(ActiveTransition.NextState, Output);
```

```
    {
        // 直接对混入节点作Evaluate_AnyThread，输出姿势
    }

    // 没发生转换时
    // Evaluate当前节点（Evaluate_AnyThread）
}
```

```
USkeletalMeshComponent::CompleteParallelAnimationEvaluation(bool bDoPostAnimEvaluation)
{
    //交换Buffer
    SwapEvaluationContextBuffers();
    PostAnimEvaluation(FAnimationEvaluationContext& EvaluationContext);
    {
        UAnimInstance::PostUpdateAnimation();
        {
            FAnimInstanceProxy::PostUpdate();
            {
                // 将通知队列加入到UAnimInstance的通知队列中
            }

            // 累计RooMotion变换
            // RootMotion处理
        }

        // MorphTarget曲线处理
        // 其他曲线值处理

        // 处理BlueprintPostEvaluateAnimation事件
        UAnimInstance::PostEvaluateAnimation();
        {
            FAnimInstanceProxy::PostEvaluate();
        }

        // 更新物理动画数据

        USkeletalMeshComponent::FinalizeAnimationUpdate();
        {
            USkeletalMeshComponent::FinalizeBoneTransform();
            {
                //处理动画通知事件

USkeletalMeshComponent::ConditionallyDispatchQueuedAnimEvents();
                {
                    UAnimInstance::DispatchQueuedAnimEvents();
                }

                // 更新子Component的位置
                USceneComponent::UpdateChildTransforms();

                // Need to send new bounds to
                MarkRenderTransformDirty();
```

```
                // New bone positions need to be sent to render thread
                MarkRenderDynamicDataDirty();
            }
        }
    }
}

```

渲染(蒙皮)

```
USkinnedMeshComponent::CreateRenderState_Concurrent(FRegisterComponentContext* Context);
{
    // 创建MeshObject，保存蒙皮数据，是游戏线程与渲染线程传递数据的对象
    // 区分GPUSkin和CPUSkin，默认GPUSkin
    MeshObject = ::new FSkeletalMeshObjectGPUSkin(this, SkelMeshRenderData, SceneFeatureLevel);
    {
        // 创建FSkeletalMeshLODRenderData对应的FSkeletalMeshObjectLOD

        InitResources();
        {
            FSkeletalMeshObjectLOD::InitResources();
            {
                // 从FSkeletalMeshLODRenderData中获取SkinWeightBuffer，ColorBuffer信息

                // FSkeletalMeshLODRenderData获取VertexBuffer信息，以便后续初始化使用GPUSkinVertexFactory时使用
                GPUSkinVertexFactories.InitVertexFactories(VertexBuffers, LODData.RenderSections, InFeatureLevel);
                {
                    // 为每个section调用一次
                    CreateVertexFactory(VertexFactories, VertexBuffers, InFeatureLevel);
                    {
                        //根据Influence的类型创建TGPUSkinVertexFactory实例，并且添加到数组中
                        //

                        // RenderThread

                        InitGPUSkinVertexFactoryComponents();
                        {
                            // 初始化FGPUSkinDataType对象
                            // FGPUSkinDataType对象绑定了位置，法线，顶点颜色等信息

                            // 初始化ShaderData
                            // 绑定BoneIndex
                            // 绑定SkinWeight
                        }

                        // 为GPUSkinVertexFactory设置Data
```

```
                        GPUSkinVertexFactory::InitResource()
                    }
                }
            }
        }

    // 创建渲染线程的资源

 UPrimitiveComponent::CreateRenderState_Concurrent(FRegisterComponentContext
* Context);
    {
        //渲染Dirty标记设置
        UActorComponent::CreateRenderState_Concurrent();
        // 在渲染线程上创建游戏线程对象的代理
        GetWorld()->Scene->AddPrimitive(this);
        FScene::AddPrimitive(Primitive);
        {
            Primitive->CreateSceneProxy();
        }
    }

    // 更新MeshObject动态渲染数据
}
```

蒙皮实现概述

蒙皮过程就是模型顶点跟随对应骨骼的运动的过程。首先我们得了解几个空间：

- 世界空间
  - 最终模型顶点坐标会转换到这个空间下交由GPU去渲染
- 模型空间
  - 顶点初始位置是相对于模型空间的，即顶点buffer中的信息是定义在模型空间下的
- 骨骼空间
  - 动画中骨骼的Transform数据是定义在骨骼空间下的

还得了解A-Pose(T-Pose)，即模型和动画的初始动作，骨骼的初始位置，在UE中叫做`Reference Pose`，在Unity中叫做BindPose

动画师在制作模型、骨骼时，都会有一个初始Pose，顶点与骨骼的蒙皮信息都是在这个Pose下定义的，也就是说后续动画如何改变骨骼的位置，对应顶点与骨骼的相对位置应该一直保持不变。动画中每帧的数据存储了骨骼在骨骼空间下的变换，所以一般引擎动画数据中都会存储一个专门的矩阵，用来先将模型空间下顶点的坐标信息转换到骨骼空间下。采集完动画中的骨骼变换信息后，先要将每根骨骼的变换转换到模型空间下，只需将每根骨骼乘以其父骨骼的变换即可。下面将以上过程公式化

下列公式中应m表示模型空间，b表示`BindPose(Reference Pose)`，l 表示骨骼空间, t 表示时刻

V_b^m 表示模型空间下顶点在`BindPose`时的坐标

V_b^l 表示在骨骼空间下顶点在`BindPose`时的坐标

$M_b^m(j)$ 表示在模型空间下骨骼在`BindPose`时的变换矩阵

则在`BindPose`下顶点在骨骼空间的坐标

$$V^l = M^m(j)^{-1} \quad V^m \qquad (1)$$

$$v_b = M_b(j) \cdot v_b \tag{1}$$

M_j^m 表示时刻t时，骨骼j在模型空间下的变换

$$M_J^m(t) = \prod_{j=J}^{0}. M_p^l(t) \tag{2}$$

则蒙皮后在时刻t，顶点V在模型空间下的位置

$$V^m(t) = M_J^m(t) \cdot V_b^l \tag{3}$$

$$V^m(t) = \prod_{j=J}^{0}. M_p^l(t) \cdot M_b^m(j)^{-1} \cdot V_b^m \tag{4}$$

则蒙皮矩阵为

$$K_j = \prod_{j=J}^{0}. M_p^l(t) \cdot M_b^m(j)^{-1} \tag{5}$$

下文中的`RefToLocal`矩阵就是$M_b^m(j)^{-1}$,一般由引擎计算与存储下来。

```
// RenderThread
// shader binding
void FGPUSkinVertexFactoryShaderParameters::Bind(const FShaderParameterMap&
ParameterMap)
{
    PerBoneMotionBlur.Bind(ParameterMap,TEXT("PerBoneMotionBlur"));
    BoneMatrices.Bind(ParameterMap,TEXT("BoneMatrices"));
    PreviousBoneMatrices.Bind(ParameterMap,TEXT("PreviousBoneMatrices"));
    InputWeightIndexSize.Bind(ParameterMap, TEXT("InputWeightIndexSize"));
    InputWeightStream.Bind(ParameterMap, TEXT("InputWeightStream"));
    NumBoneInfluencesParam.Bind(ParameterMap,
TEXT("NumBoneInfluencesParam"));
}

//
void FGPUSkinVertexFactoryShaderParameters::GetElementShaderBindings()
{
    if (BoneMatrices.IsBound())
    {
        FRHIShaderResourceView* CurrentData =
ShaderData.GetBoneBufferForReading(false).VertexBufferSRV;
        ShaderBindings.Add(BoneMatrices, CurrentData);
    }
}
```

```
// GameThread
USkinnedMeshComponent::SendRenderDynamicData_Concurrent();
{
    FSkeletalMeshObjectGPUSkin::Update();
    {
        // 创建DynamicData并且初始化
        // 更新变换数据
```

```
 FDynamicSkelMeshObjectDataGPUSkin::InitDynamicSkelMeshObjectDataGPUSkin();
        {
            // 计算蒙皮矩阵Kj
            UpdateRefToLocalMatrices();
            {
                // 动画更新后的组件空间下的骨骼变换
                const TArray<FTransform>& ComponentTransform = InMeshComponent->GetComponentSpaceTransforms();
                // 将顶点转换到骨骼空间下的矩阵
                const TArray<FMatrix44f>* RefBasesInvMatrix = &ThisMesh->GetRefBasesInvMatrix();
            }

            // Morph Target更新

            // 布料模拟数据更新
        }

        // 添加更新骨骼矩阵的Command到渲染线程ENQUEUE_RENDER_COMMAND

 FSkeletalMeshObjectGPUSkin::UpdateDynamicData_RenderThread(FDynamicSkelMeshObjectDataGPUSkin* DynamicData)
    }
}
```

```
// RenderThread
FSkeletalMeshObjectGPUSkin::UpdateDynamicData_RenderThread(FDynamicSkelMeshObjectDataGPUSkin* DynamicData);
{
    // 释放内存
    ProcessUpdatedDynamicData()
    {
        // Morph Target处理

        FGPUBaseSkinVertexFactory::FShaderDataType::UpdateBoneData();
        {
            // 将BoneMatrix数据传入到GPU Buffer中
        }
    }
}
```

```
// GpuSkinVertexFactory.ush


// 骨骼变换矩阵
#define FBoneMatrix float3x4

#if GPUSKIN_USE_BONES_SRV_BUFFER

// The bone matrix buffer stored as 4x3 (3 float4 behind each other), all chunks of a skeletal mesh in one, each skeletal mesh has it's own buffer
STRONG_TYPE Buffer<float4> BoneMatrices;
```

```
// The previous bone matrix buffer stored as 4x3 (3 float4 behind each other), all chunks of a skeletal mesh in one, each skeletal mesh has it's own buffer
STRONG_TYPE Buffer<float4> PreviousBoneMatrices;

#endif

// Shader输入结构体
struct FVertexFactoryInput
{
    float4  Position        : ATTRIBUTE0;
    // 0..1
    HALF3_TYPE  TangentX        : ATTRIBUTE1;
    // 0..1
    // TangentZ.w contains sign of tangent basis determinant
    HALF4_TYPE  TangentZ        : ATTRIBUTE2;

    // BoneIndex和BoneWeight等数据
#if GPUSKIN_UNLIMITED_BONE_INFLUENCE
    uint    BlendOffsetCount    : ATTRIBUTE3;
#else
    uint4   BlendIndices    : ATTRIBUTE3;
    uint4   BlendIndicesExtra   : ATTRIBUTE14;
    float4  BlendWeights    : ATTRIBUTE4;
    float4  BlendWeightsExtra   : ATTRIBUTE15;
#endif // GPUSKIN_UNLIMITED_BONE_INFLUENCE


#if NUM_MATERIAL_TEXCOORDS_VERTEX
    // If this changes make sure to update LocalVertexFactory.usf
#if NUM_MATERIAL_TEXCOORDS_VERTEX > 0
    float2  TexCoords0 : ATTRIBUTE5;
#endif
#if NUM_MATERIAL_TEXCOORDS_VERTEX > 1
    float2  TexCoords1 : ATTRIBUTE6;
#endif
#if NUM_MATERIAL_TEXCOORDS_VERTEX > 2
    float2  TexCoords2 : ATTRIBUTE7;
#endif
#if NUM_MATERIAL_TEXCOORDS_VERTEX > 3
    float2  TexCoords3 : ATTRIBUTE8;
#endif

    #if NUM_MATERIAL_TEXCOORDS_VERTEX > 4
        #error Too many texture coordinate sets defined on GPUSkin vertex input. Max: 4.
    #endif
#endif

    // MORPH数据
#if GPUSKIN_MORPH_BLEND
    // NOTE: TEXCOORD6,TEXCOORD7 used instead of POSITION1,NORMAL1 since those semantics are not supported by Cg
    /** added to the Position */
    float3  DeltaPosition   : ATTRIBUTE9;   //POSITION1;
```

```
    /** added to the TangentZ and then used to derive new TangentX,TangentY, .w contains the weight of the tangent blend */
    float3  DeltaTangentZ   : ATTRIBUTE10;  //NORMAL1;
#endif

#if GPUSKIN_MORPH_BLEND || GPUSKIN_APEX_CLOTH
    uint VertexID : SV_VertexID;
#endif

    /** Per vertex color */
    float4 Color : ATTRIBUTE13;

    // Dynamic instancing related attributes with InstanceIdOffset : ATTRIBUTE16
    VF_GPUSCENE_DECLARE_INPUT_BLOCK(16)
};

// Morph动画顶点数据计算
/**
* Adds the delta position from the combined morph targets to the vertex position
*/
float3 MorphPosition( FVertexFactoryInput Input, FVertexFactoryIntermediates Intermediates )
{
    return Intermediates.UnpackedPosition + Input.DeltaPosition;
}

// 将Buffer中的数据拼接为矩阵
FBoneMatrix GetBoneMatrix(int Index)
{
#if GPUSKIN_USE_BONES_SRV_BUFFER
    float4 A = BoneMatrices[Index * 3];
    float4 B = BoneMatrices[Index * 3 + 1];
    float4 C = BoneMatrices[Index * 3 + 2];
    return FBoneMatrix(A,B,C);
#else
    return Bones.BoneMatrices[Index];
#endif
}

// 根据权重和BoneIndex计算影响顶点的矩阵

FBoneMatrix CalcBoneMatrix( FVertexFactoryInput Input )
{
#if GPUSKIN_UNLIMITED_BONE_INFLUENCE
    int NumBoneInfluences = Input.BlendOffsetCount & 0xff;
    int StreamOffset = Input.BlendOffsetCount >> 8;
    int WeightsOffset = StreamOffset + (InputWeightIndexSize * NumBoneInfluences);

    FBoneMatrix BoneMatrix = FBoneMatrix(float4(0,0,0,0), float4(0,0,0,0), float4(0,0,0,0));
    for (int InfluenceIdx = 0; InfluenceIdx < NumBoneInfluences; InfluenceIdx++)
```

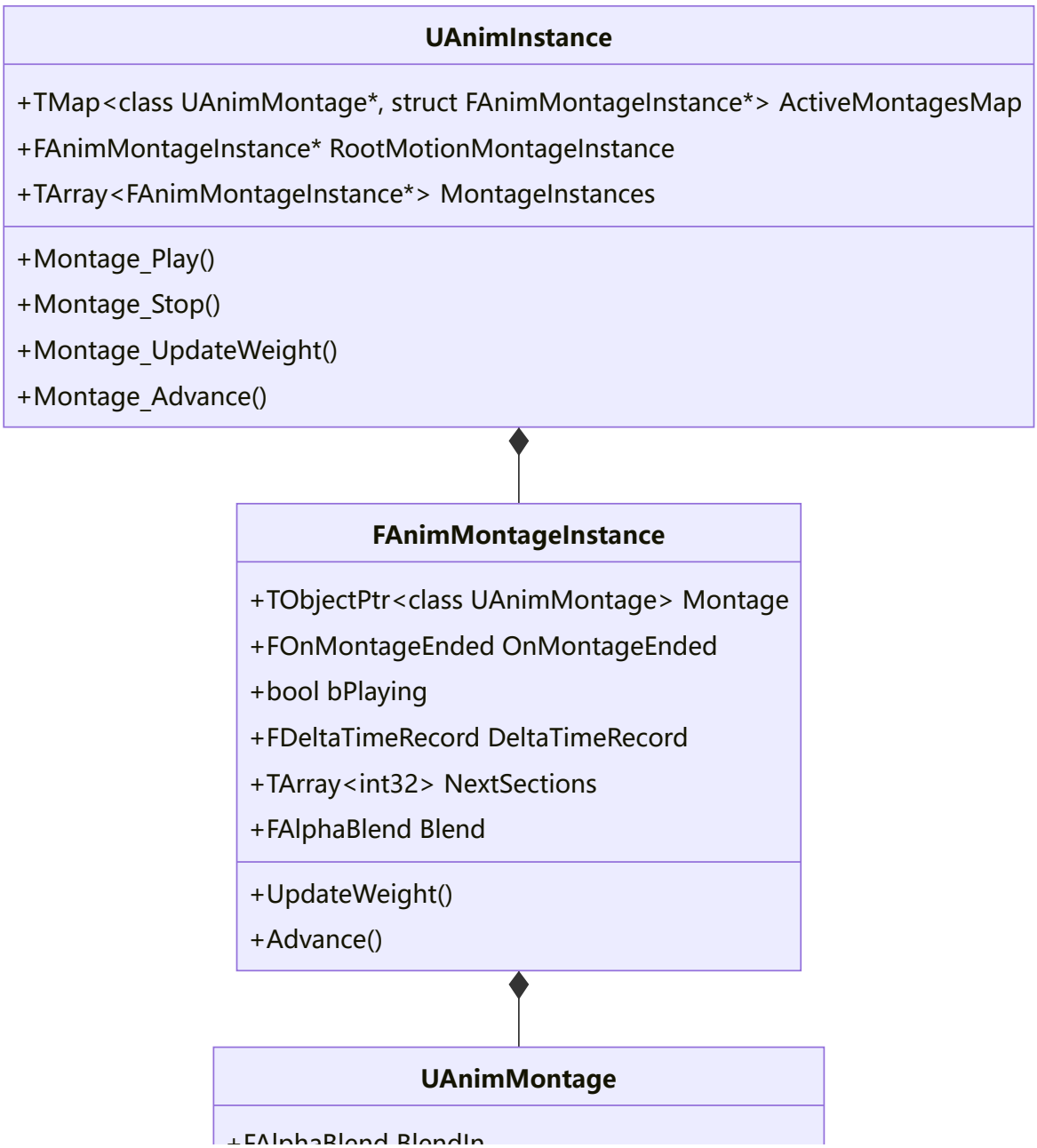
```
    {
        int BoneIndexOffset = StreamOffset + (InputWeightIndexSize * InfluenceIdx);
        int BoneIndex = InputWeightStream[BoneIndexOffset];
        if (InputWeightIndexSize > 1)
        {
            BoneIndex = InputWeightStream[BoneIndexOffset + 1] << 8 | BoneIndex;
            //@todo-lh: Workaround to fix issue in SPIRVEmitter of DXC; this block must be inside the if branch
            float BoneWeight = float(InputWeightStream[WeightsOffset + InfluenceIdx]) / 255.0f;
            BoneMatrix += BoneWeight * GetBoneMatrix(BoneIndex);
        }
        else
        {
            //@todo-lh: Workaround to fix issue in SPIRVEmitter of DXC; this block must be inside the if branch
            float BoneWeight = float(InputWeightStream[WeightsOffset + InfluenceIdx]) / 255.0f;
            BoneMatrix += BoneWeight * GetBoneMatrix(BoneIndex);
        }
    }
#else // GPUSKIN_UNLIMITED_BONE_INFLUENCE
    FBoneMatrix BoneMatrix = Input.BlendWeights.x * GetBoneMatrix(Input.BlendIndices.x);
    BoneMatrix += Input.BlendWeights.y * GetBoneMatrix(Input.BlendIndices.y);

#if !GPUSKIN_LIMIT_2BONE_INFLUENCES
    BoneMatrix += Input.BlendWeights.z * GetBoneMatrix(Input.BlendIndices.z);
    BoneMatrix += Input.BlendWeights.w * GetBoneMatrix(Input.BlendIndices.w);
    if (NumBoneInfluencesParam > MAX_INFLUENCES_PER_STREAM)
    {
        BoneMatrix += Input.BlendWeightsExtra.x * GetBoneMatrix(Input.BlendIndicesExtra.x);
        BoneMatrix += Input.BlendWeightsExtra.y * GetBoneMatrix(Input.BlendIndicesExtra.y);
        BoneMatrix += Input.BlendWeightsExtra.z * GetBoneMatrix(Input.BlendIndicesExtra.z);
        BoneMatrix += Input.BlendWeightsExtra.w * GetBoneMatrix(Input.BlendIndicesExtra.w);
    }
#endif//GPUSKIN_LIMIT_2BONE_INFLUENCES
#endif // GPUSKIN_UNLIMITED_BONE_INFLUENCE
    return BoneMatrix;
}

// 计算顶点shader需要用到的的数据，其中包括GPUSkin用到的BoneMatrix
FVertexFactoryIntermediates GetVertexFactoryIntermediates(FVertexFactoryInput Input)
{
    FVertexFactoryIntermediates Intermediates;
```

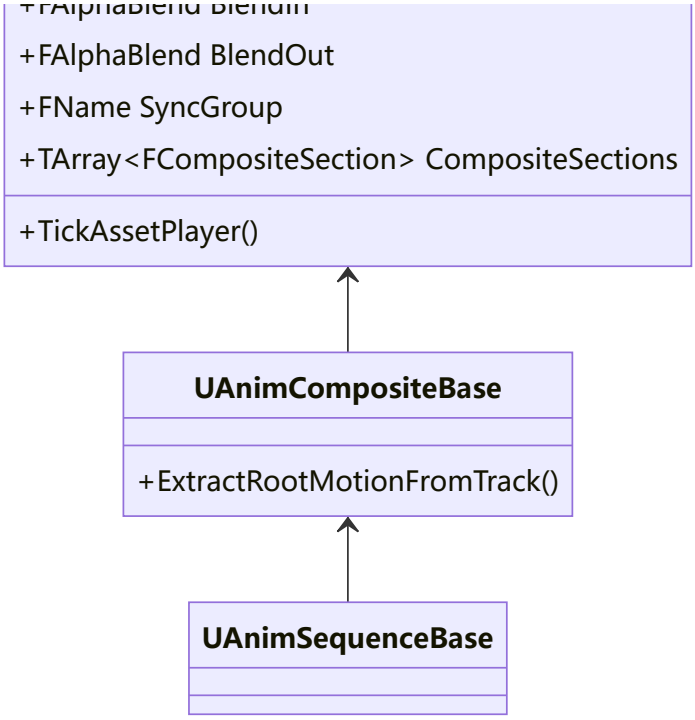
```
    Intermediates.SceneData             = VF_GPUSCENE_GET_INTERMEDIATES(Input);
    Intermediates.InvNonUniformScale    = GetInstanceData(Intermediates).InvNonUniformScale;
    Intermediates.DeterminantSign       = GetInstanceData(Intermediates).DeterminantSign;
    Intermediates.LocalToWorld          = GetInstanceData(Intermediates).LocalToWorld;
    Intermediates.WorldToLocal          = GetInstanceData(Intermediates).WorldToLocal;
    Intermediates.PrevLocalToWorld      = GetInstanceData(Intermediates).PrevLocalToWorld;
    Intermediates.UnpackedPosition      = UnpackedPosition(Input);

#if GPUSKIN_APEX_CLOTH
    SetupClothVertex(Input.VertexID, Intermediates.ClothVertexInfluences);
    if( IsSimulatedVertex(Intermediates.ClothVertexInfluences[0]) )
    {
        Intermediates.SimulatedPosition = ClothingPosition(Intermediates.ClothVertexInfluences, false);
#if GPUSKIN_APEX_CLOTH_PREVIOUS
        Intermediates.PreviousSimulatedPosition = ClothingPosition(Intermediates.ClothVertexInfluences, true);
#else
        Intermediates.PreviousSimulatedPosition = Intermediates.SimulatedPosition;
#endif
    }
    else
    {
        Intermediates.PreviousSimulatedPosition = Intermediates.SimulatedPosition = float4(Intermediates.UnpackedPosition, 0.0f);
    }

#endif

    Intermediates.BlendMatrix = CalcBoneMatrix( Input );

    // Fill TangentToLocal
    Intermediates.TangentToLocal = SkinTangents(Input, Intermediates);

    // Swizzle vertex color.
    Intermediates.Color = Input.Color FCOLOR_COMPONENT_SWIZZLE;

    return Intermediates;
}

// 顶点位置蒙皮
/** transform position by weighted sum of skinning matrices */
float3 SkinPosition( FVertexFactoryInput Input, FVertexFactoryIntermediates Intermediates )
{
#if GPUSKIN_MORPH_BLEND
    float3 Position = MorphPosition(Input, Intermediates);
```

```
#else
    float3 Position = Intermediates.UnpackedPosition;
#endif

    // Note the use of mul(Matrix,Vector), bone matrices are stored transposed
    // for tighter packing.
    Position = mul(Intermediates.BlendMatrix, float4(Position, 1));

    return Position;
}
```

蒙太奇更新

类图





流程

```
// 播放
UAnimInstance::Montage_Play()
{
    UAnimInstance::Montage_PlayInternal()
    {
        // 创建并初始化FAnimMontageInstance，添加到记录的数组中
        FAnimMontageInstance* NewInstance = new FAnimMontageInstance(this);
    }
}

// 更新
UAnimInstance::UpdateAnimation()
{
    Montage_UpdateWeight(DeltaTime);
    {
        // 遍历所有的FAnimMontageInstance
        FAnimMontageInstance::UpdateWeight()
        {
            Blend.Update(DeltaTime);
        }
    }

    Montage_Advance(DeltaSeconds);
    {
        // 遍历所有FAnimMontageInstance
        FAnimMontageInstance::Advance()
        {

```

```
        }
    }
}
```