

グランツーリスモにおけるインタラクティブサウンドデザイン

日本音響学会第156回(2026年秋季)研究発表会 招待講演

○皆川孝志, △竹内大祐, △木村雅男, △秋田竜也(株式会社ポリフォニー・デジタル)



グランツーリスモ(GT)シリーズ



1997



1999



2001



2004



2010



2013



2017

最新作「グランツーリスモ7」

- 実車録音を基礎としたリアルな自動車サウンド
- 3Dオーディオ（Ambisonics、オブジェクトベースオーディオ）対応



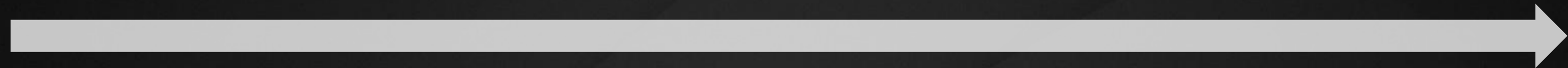
- エンジン音制作ワークフロー
- エンジン音シンセサイザー
- 反射音エフェクト

エンジン音制作ワークフロー

録音

編集

実装



エンジン音制作ワークフロー

録音

編集

実装



- 録音対象のクルマ・録音施設を手配
- エンジン音や効果音をさまざまな場所から録音



録音場所・方式

クルマを固定して録音

- ダイナモメーター
 - ハブ
 - シャシー



クルマを走らせて録音

- サーキット走行



ハブダイナモメーター

- タイヤの回転軸(ハブ)を計測機に繋ぐ方法
- ノイズが少ない



シャシーダイナモメーター

- ローラー上にタイヤを乗せる方法
- タイヤノイズが多い





サーキット走行

- 吸盤、テープ、結束バンドを用いてマイクを固定
- サーキット上走行し、走行中の音を録音





STI

ATORII

HYAMAUCHI T.IGUCHI

TOKAI RKA

MOTUL

MAP TOOLS

HOON

日本放送株式会社

STC

STI

Keeper
COATING FOR SMART CAR LIFE

61

DENSO SUBARU
BRZ

www.e-saa.co.jp

スバルロジスティクス

FILM KIKI

DUNLOP

zf.com/jp

fourcia clarion

NHN ニッパ

ThreeBond

KENWOOD

R&D SPORT

EES

IRIDIUM POWER

Panasonic

GUNROCK
CHUYODA

PIRELLA

EES

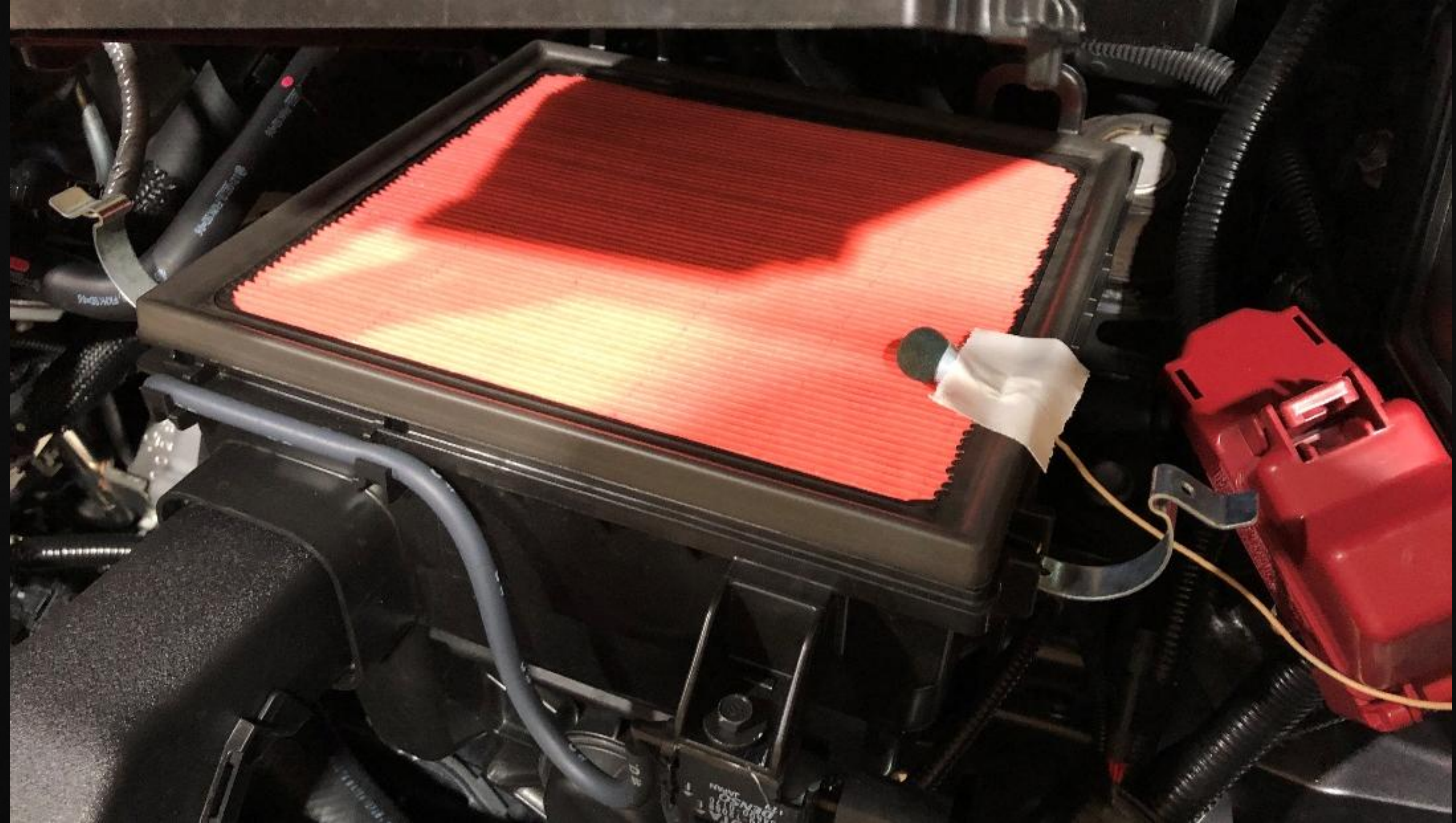
録音ターゲット



GRAN TURISMO 7
THE REAL DRIVING SIMULATOR



GRAN TURISMO 7
THE REAL DRIVING SIMULATOR





GRAN TURISMO 7
THE REAL DRIVING SIMULATOR









GRAN TURISMO 7
THE REAL DRIVING SIMULATOR





GRAN TURISMO 7
THE REAL DRIVING SIMULATOR

車室内インパルス応答の録音および活用

- 自車サウンドのミキシングにて活用
 - 「車室内らしさ」の演出
- 収録環境に応じて録音手法を選択
 - 時間や機材などの制約が少ない： Exponential Sine Sweepを使用
 - 制約が厳しい： 風船などを利用



Dry



DynRes: [3840, 2160]

[Course]
Code: c052
WeatherId: 8748
SkyId: 1228
BuildId: 7918557
BaseBuildId:

エンジン音制作ワークフロー

編集

実装

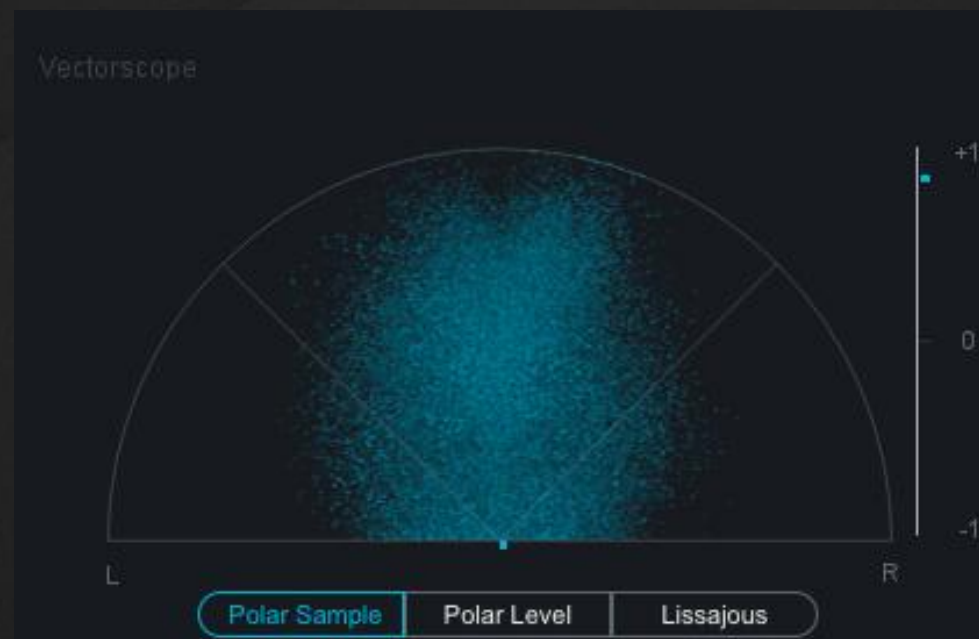
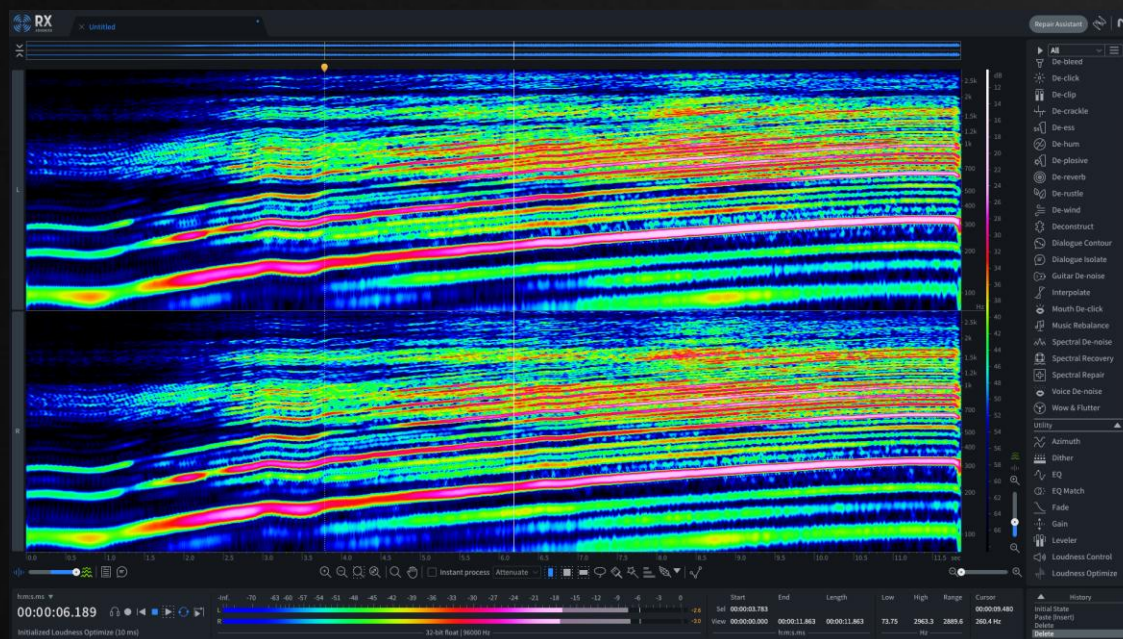


- 録音した素材を実装に最適な状態に整える



録音データの編集

- 不要な部分の切り取り、音質調整などの整音作業を行う
 - ノイズ除去
 - EQ調整
 - ステレオイメージ調整
- エンジン音の音色を尊重し、必要最低限にとどめる



エンジン音制作ワークフロー

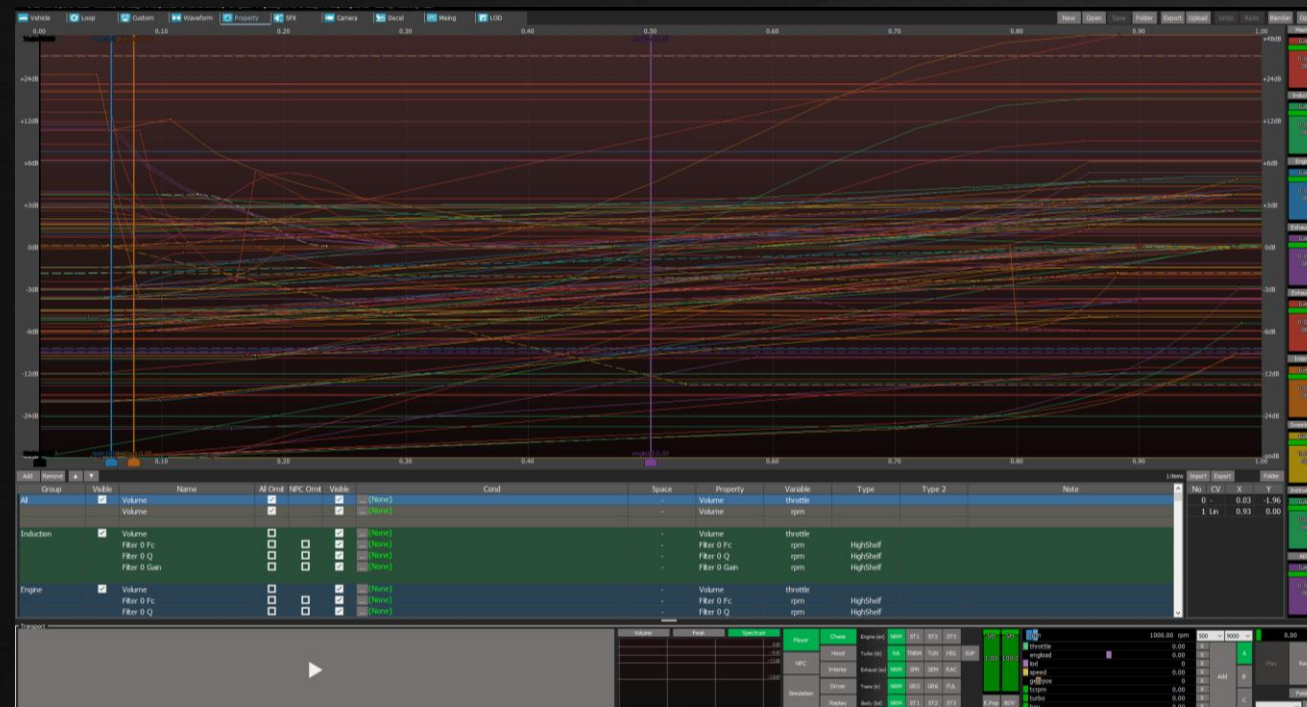
実装



実装ツールを用いて
ゲーム環境でミキシングを行う

エンジン音再生システム

- Gran Turismo Engine Sound (GTES)
- 録音、編集した音声データを組み込み、再生
- ゲーム内の各種パラメータと連動し、動的レンダリング
 - クルマ挙動、カメラパラメータ
- PC上のGTES Toolsとゲームランタイムを接続してサウンドデザインを行う

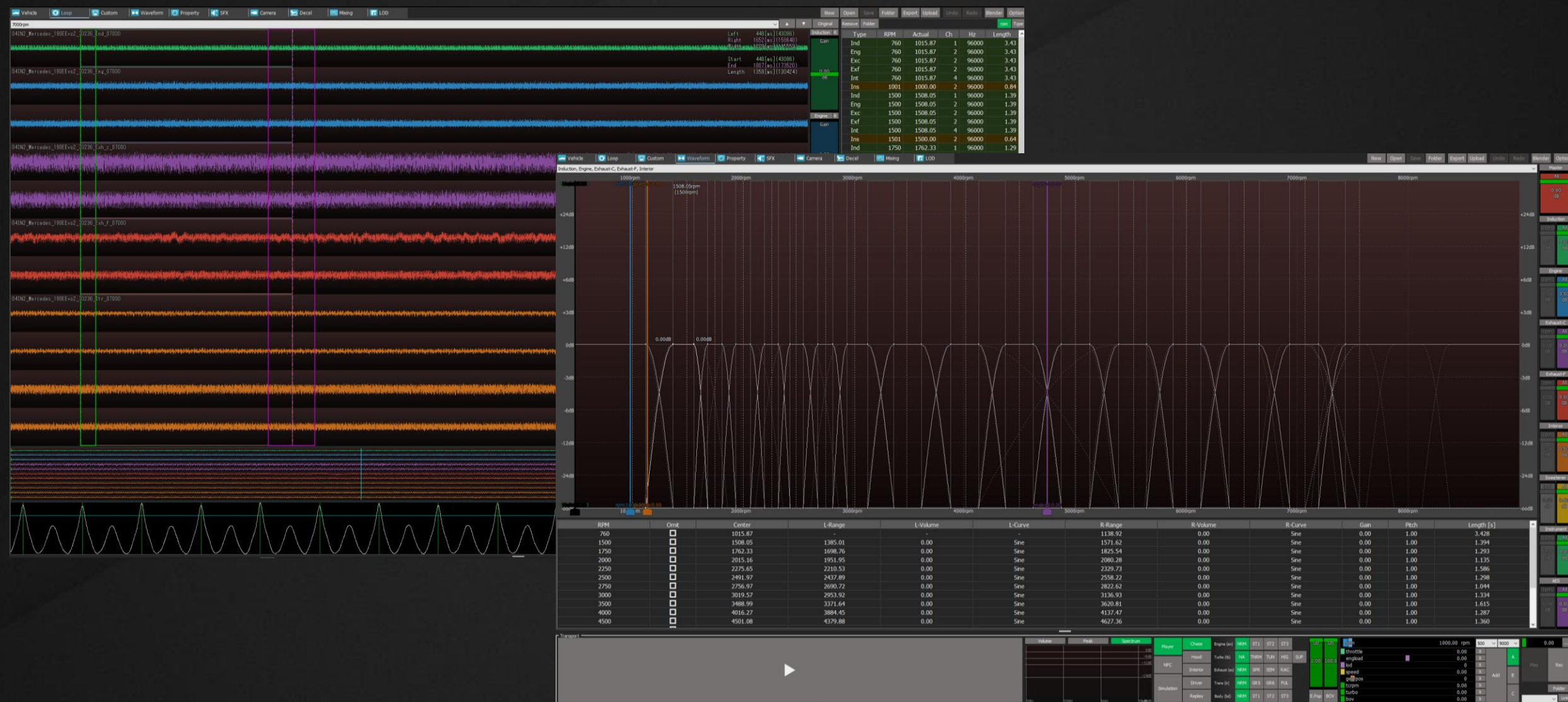






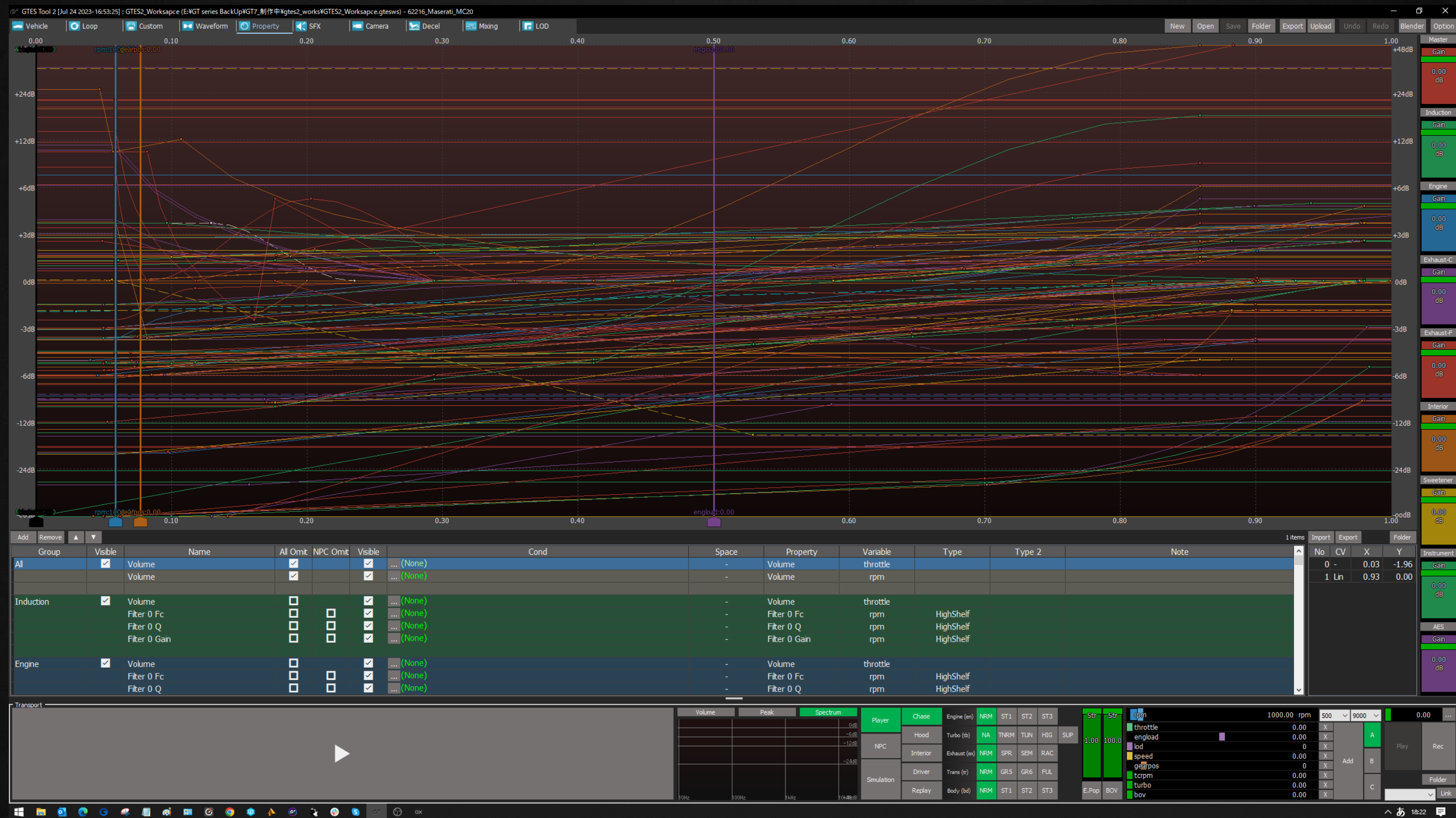
ループ波形登録

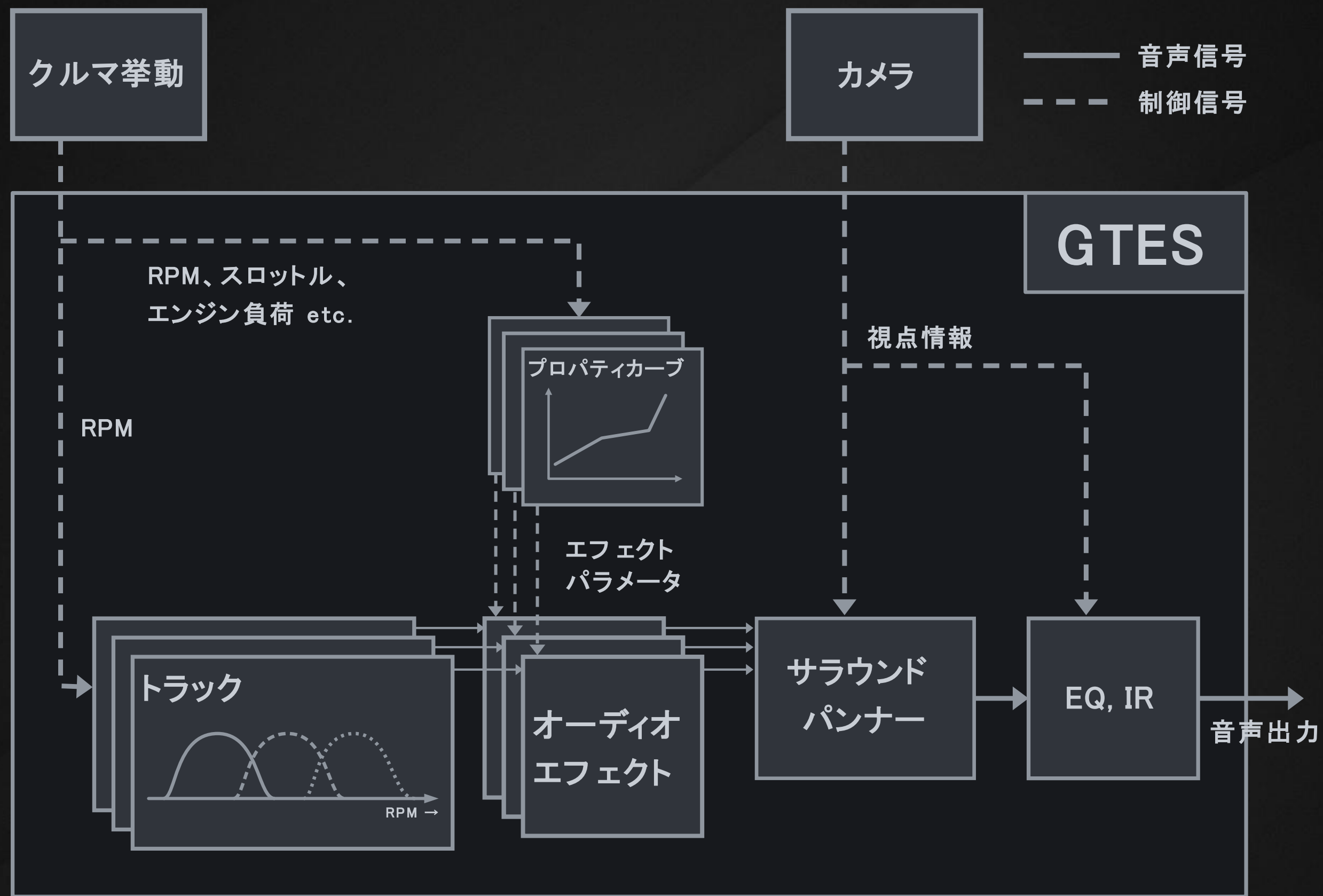
- エンジン音波形のピッチ推定により対応する回転数を算出
- エンジン回転数軸上でのループ波形の位置が決まる
- 回転数に応じた正確なエンジン音の再生





プロパティカーブ編集





カメラ視点ごとのサウンドデザイン

Vehicle Loop Custom Waveform Property SFX Camera Decel Mixing LOD

New Open Save Folder Export Upload Undo Redo Blender Option

Chase

Induction S Engine S Exhaust-C S Exhaust-F S Interior S Sweetener S Instrument S AES S EQ

Gain -16.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 30.00

Gain -9.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 50.00

Gain -16.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 50.00

Gain 1.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 70.00

Gain -∞ dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -∞ dB A: 0.00 I: 100.00 W: 50.00

Gain -8.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 60.00

Gain -8.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Normal EQ

100.0 0.38.0 -23.00 dB

Hood

Induction S Engine S Exhaust-C S Exhaust-F S Interior S Sweetener S Instrument S AES S EQ

Gain -17.50 dB A: 180.00 I: 25.00 W: 100.00

Gain -2.00 dB A: 180.00 I: 20.00 W: 100.00

Gain -0.00 dB A: 180.00 I: 75.00 W: 100.00

Gain -10.00 dB A: 180.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -∞ dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -2.50 dB A: 0.00 I: 25.00 W: 100.00

Gain -3.00 dB A: 0.00 I: 20.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Normal EQ

100.0 0.30.0 -26.00 dB

Interior

Induction S Engine S Exhaust-C S Exhaust-F S Interior S Sweetener S Instrument S AES S EQ

Gain -12.00 dB A: 180.00 I: 55.00 W: 100.00

Gain -5.00 dB A: 180.00 I: 50.00 W: 100.00

Gain -8.00 dB A: 180.00 I: 75.00 W: 100.00

Gain -15.00 dB A: 180.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 2.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -7.00 dB A: 0.00 I: 30.00 W: 100.00

Gain -4.50 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Normal EQ

100.0 0.35.0 -26.00 dB

Driver

Induction S Engine S Exhaust-C S Exhaust-F S Interior S Sweetener S Instrument S AES S EQ

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 1.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Normal EQ

100.0 0.0 0.00 dB

Replay

Induction S Engine S Exhaust-C S Exhaust-F S Interior S Sweetener S Instrument S AES S EQ

Gain -18.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -8.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -1.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -∞ dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain -5.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 7.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Gain 0.00 dB A: 0.00 I: 100.00 W: 100.00

Normal EQ

100.0 0.0 -8.00 dB

Transport

Volume Peak Spectrum

Player Chase

Engine (en) NRM ST1 ST2 ST3

Turbo (tb) NA TNRM TUN HIG SUP

Exhaust (ex) NRM SPR SEM RAC

Trans (tr) NRM GR5 GR6 FUL

Body (bd) NRM ST1 ST2 ST3

Str Str

1000.00 rpm 500 9000

0.00

throttle engload lod speed gearpos tcrpm turbo bov

0.00 0.00 0 0.00 0 0.00 0.00

X X X X X X X

Add

A B C

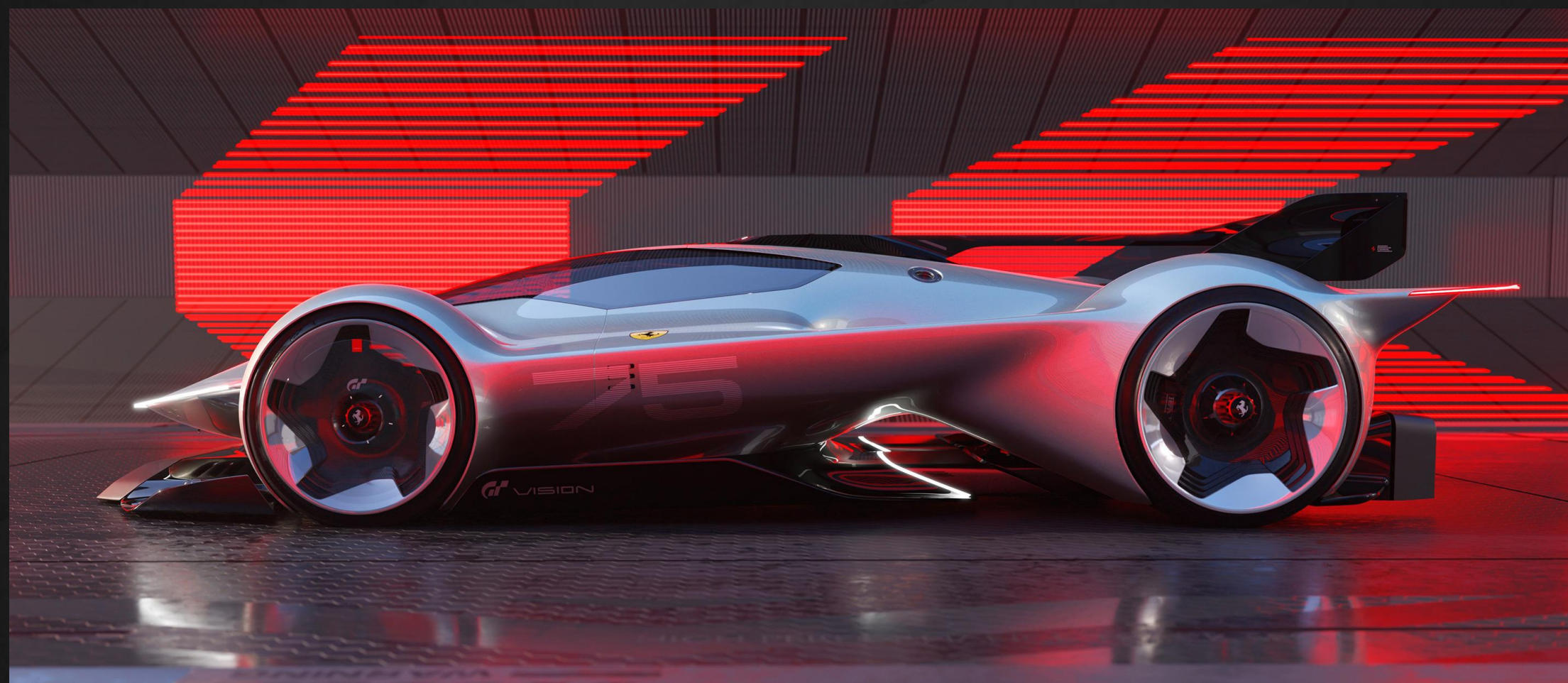
Play Rec

Folder Link

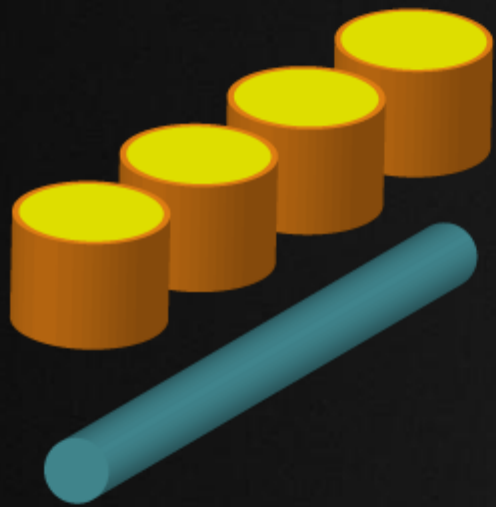
- エンジン音制作ワークフロー
- エンジン音シンセサイザー
- 反射音エフェクト

エンジン音シンセサイザーの開発動機

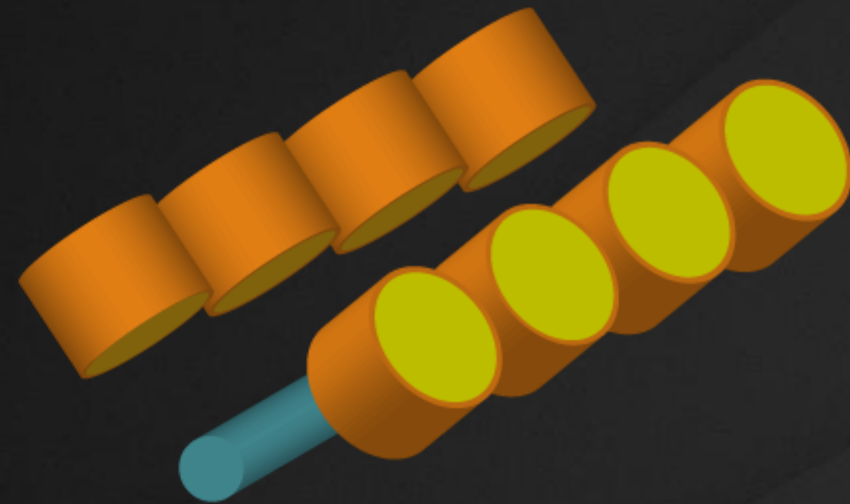
- あらゆるものをシミュレートしたい
 - エンジン音も物理ベースでつukれないか
- 録音困難なクルマをどうやって再現するか
 - 「ビジョン グランツーリスモ」(近未来のコンセプトカー)
 - 動かせないクルマ、失われたクルマ…



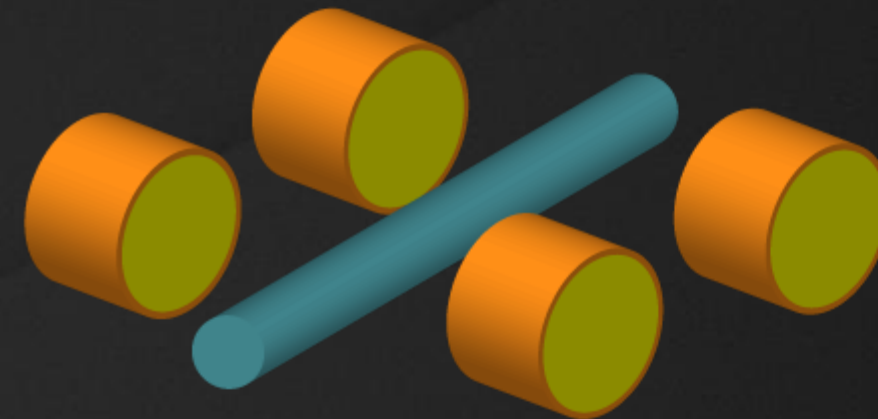
エンジンの型式



直列4気筒



V型8気筒

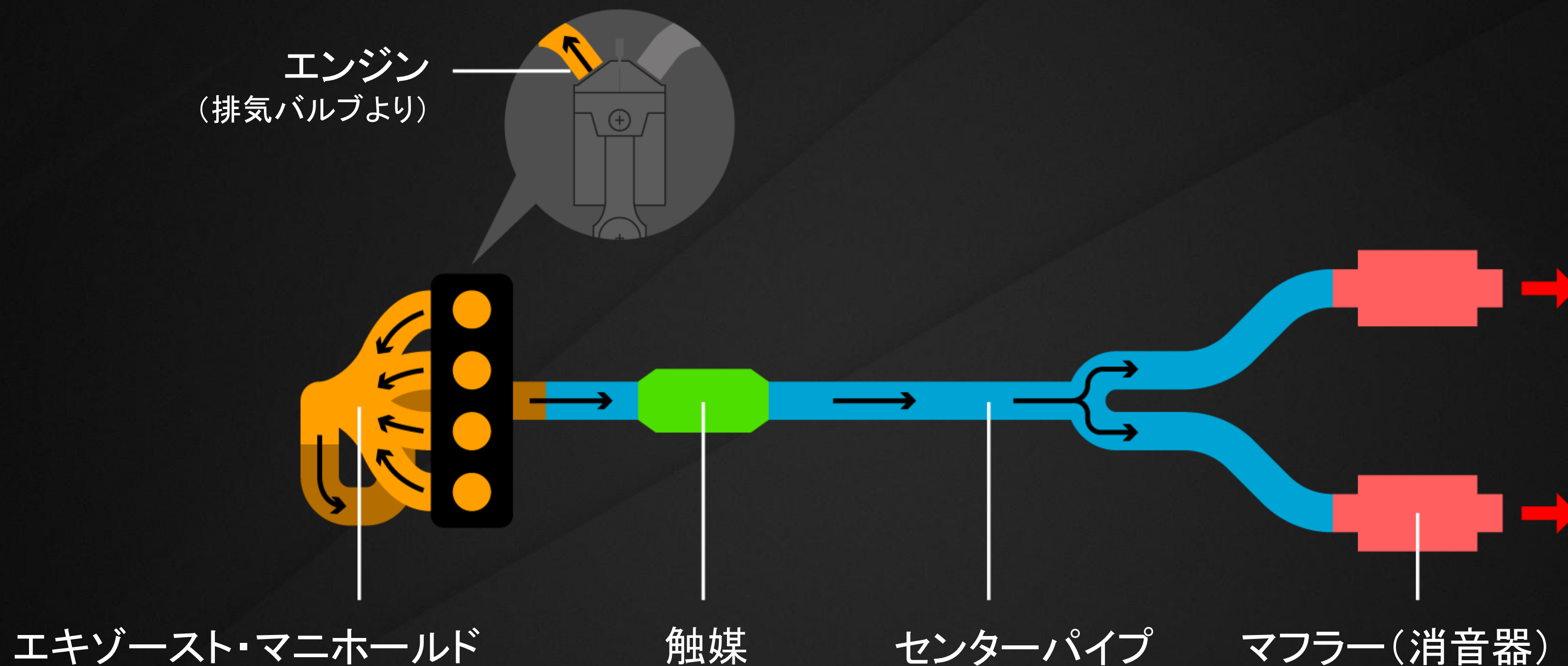


水平対向4気筒



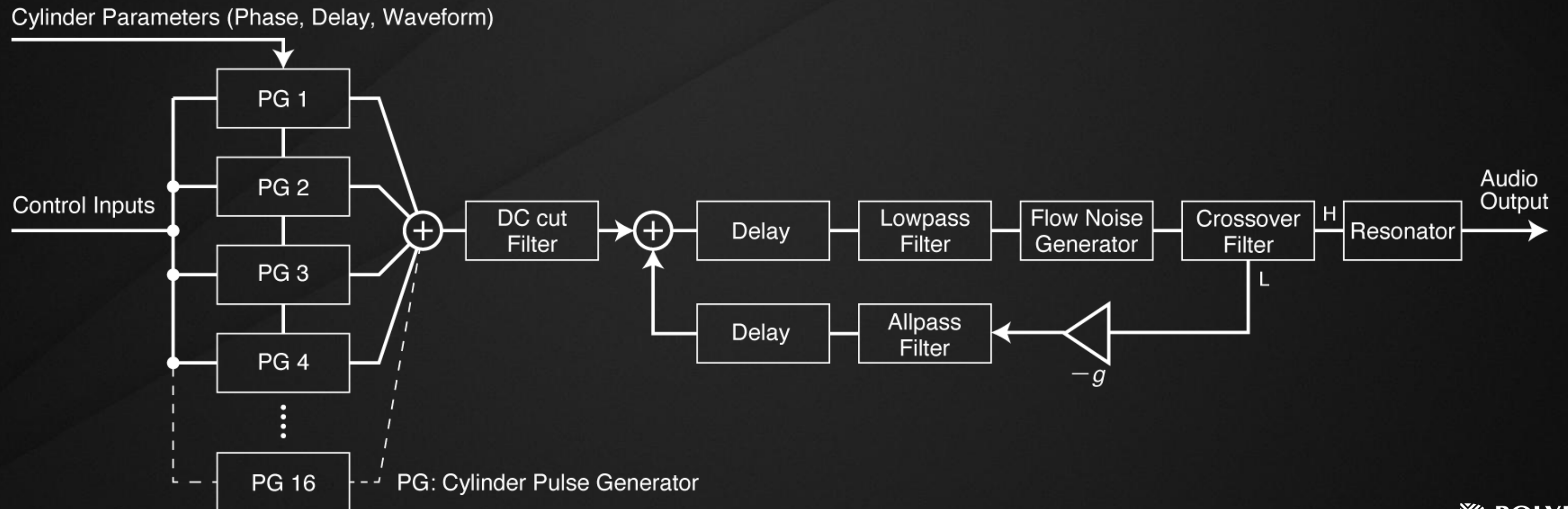
ロータリーエンジン

エンジンの排気系



シミュレーションモデル

- エンジン回転に同期して排気パルスを出力
- エンジン固有の遅延パターンの追加
- デジタルウェーブガイドによる排気系内の音の伝搬と共鳴の表現
- GTESTトラックとして利用可能



エンジン種別ごとの音の違いの表現

- 直列三気筒

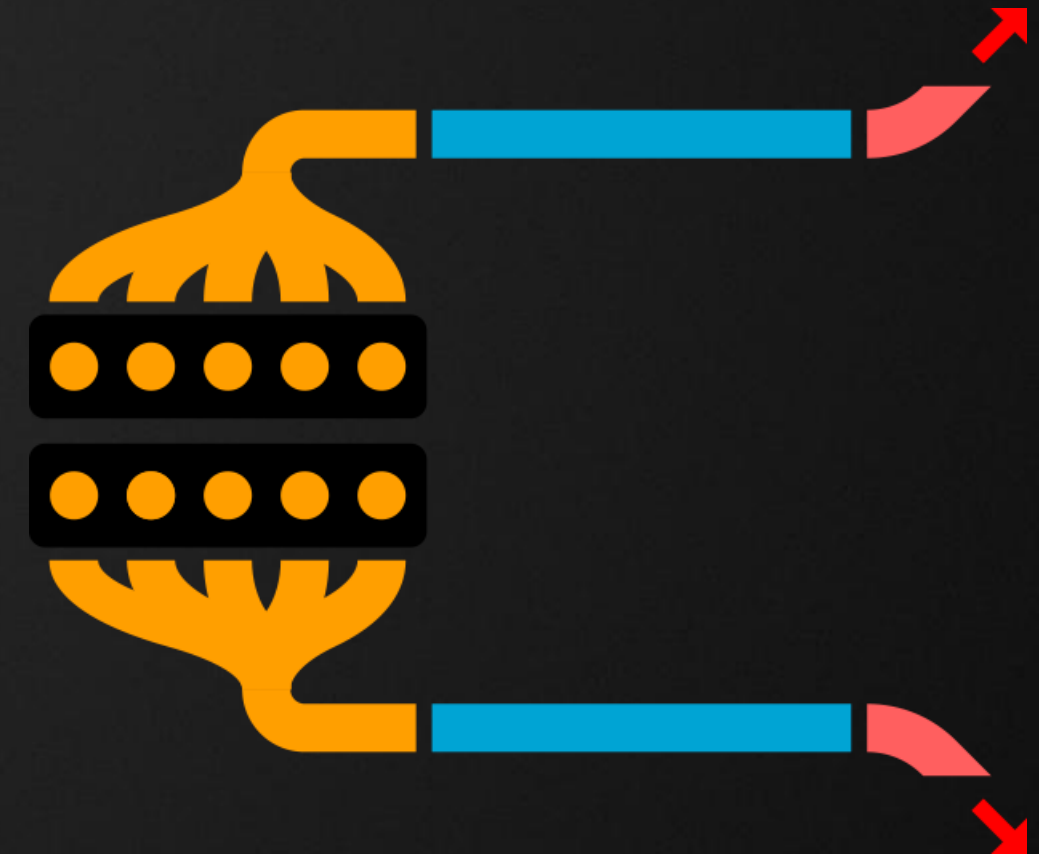


- コンパクトカーや軽自動車など
- 3次倍音を含む



- V10

- スーパーカー、1990-2000年代のフォーミュラカー
- 5次、10次倍音を含む



- エンジン音制作ワークフロー
- エンジン音シンセサイザー
- 反射音エフェクト

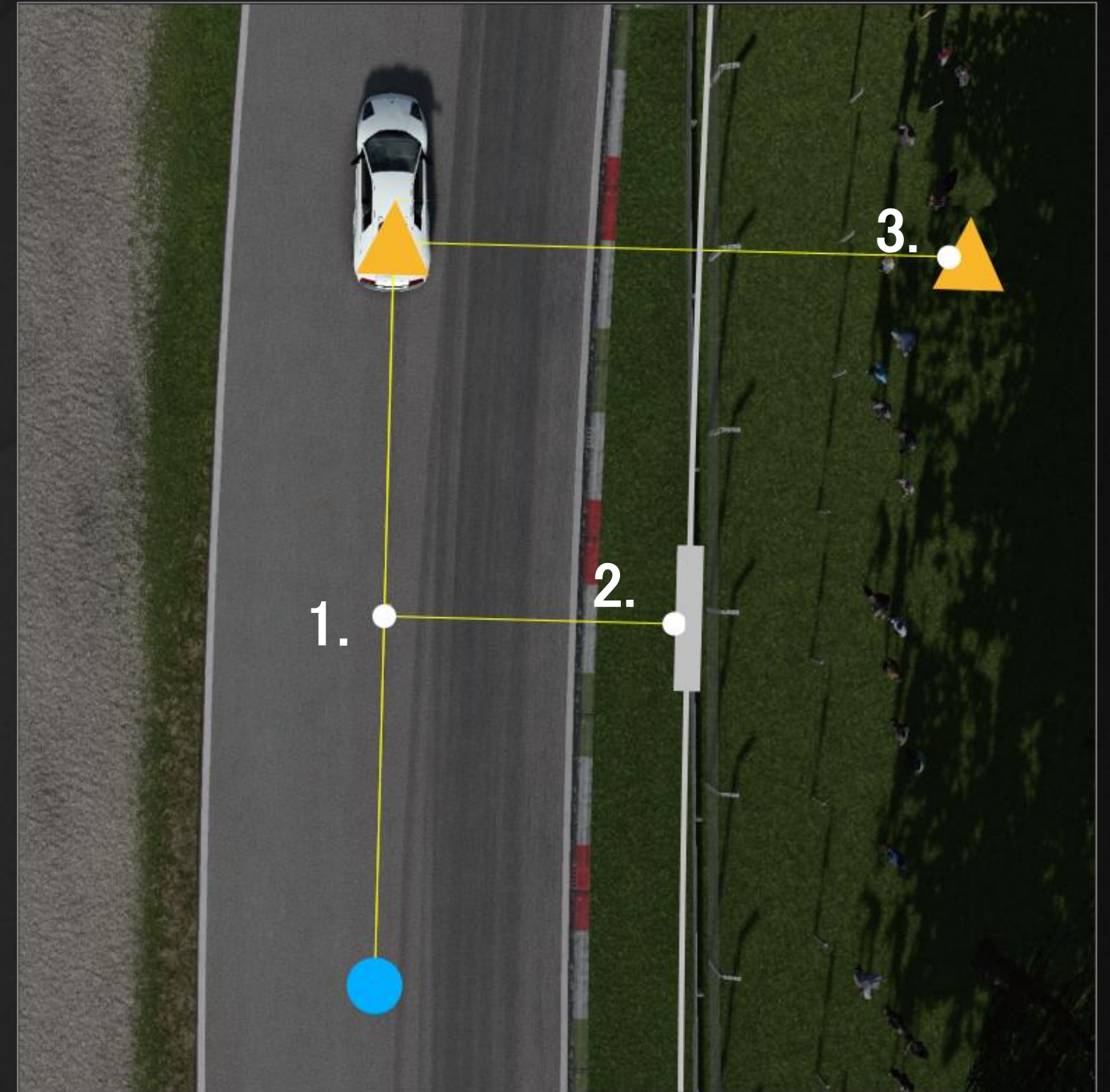
初期反射音エフェクト

目的

- サーキット上でのエンジン音の反射の再現
- 3Dパンニングされた初期反射音による臨場感の向上
- 反射音のドップラー効果による複雑な音場の再現

鏡像音源の計算

1. リスナーとクルマの中点を算出
2. 対応するコリジョンモデルを取得
3. コリジョンモデルの法線に対して鏡像の各種空間属性計算、壁の素材からフィルタ情報を取得

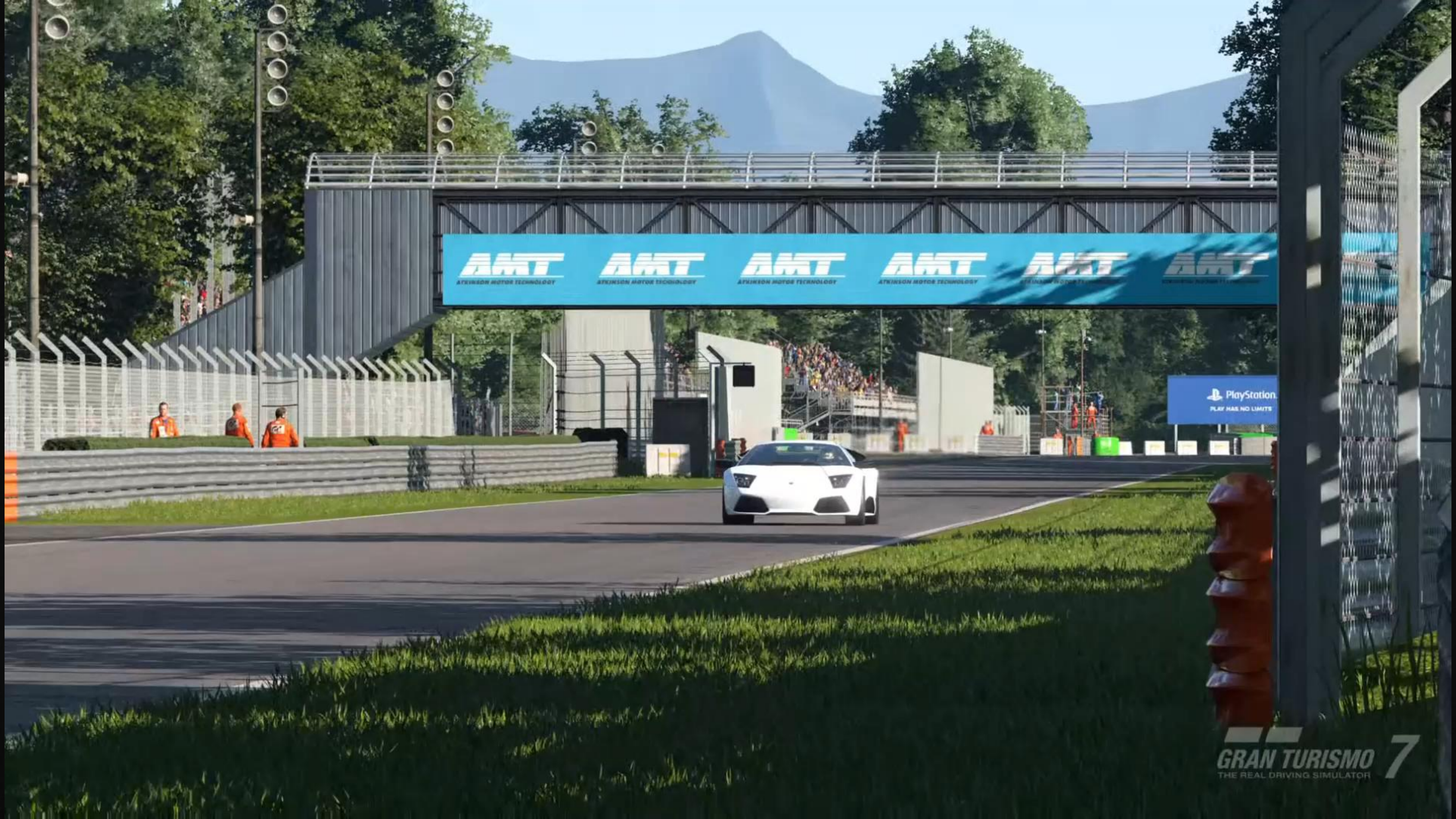


鏡像音源のレンダリング

鏡像の空間属性

- 位置(空間配置、距離減衰・遅延)
 - 速度(反射音のドップラー効果)
 - 姿勢(指向性)
-
- 音の不連続性回避のための各種空間属性の平滑化
 - ループ再生開始位置をランダムに選ぶ
 - コムフィルタ、フランジングを回避



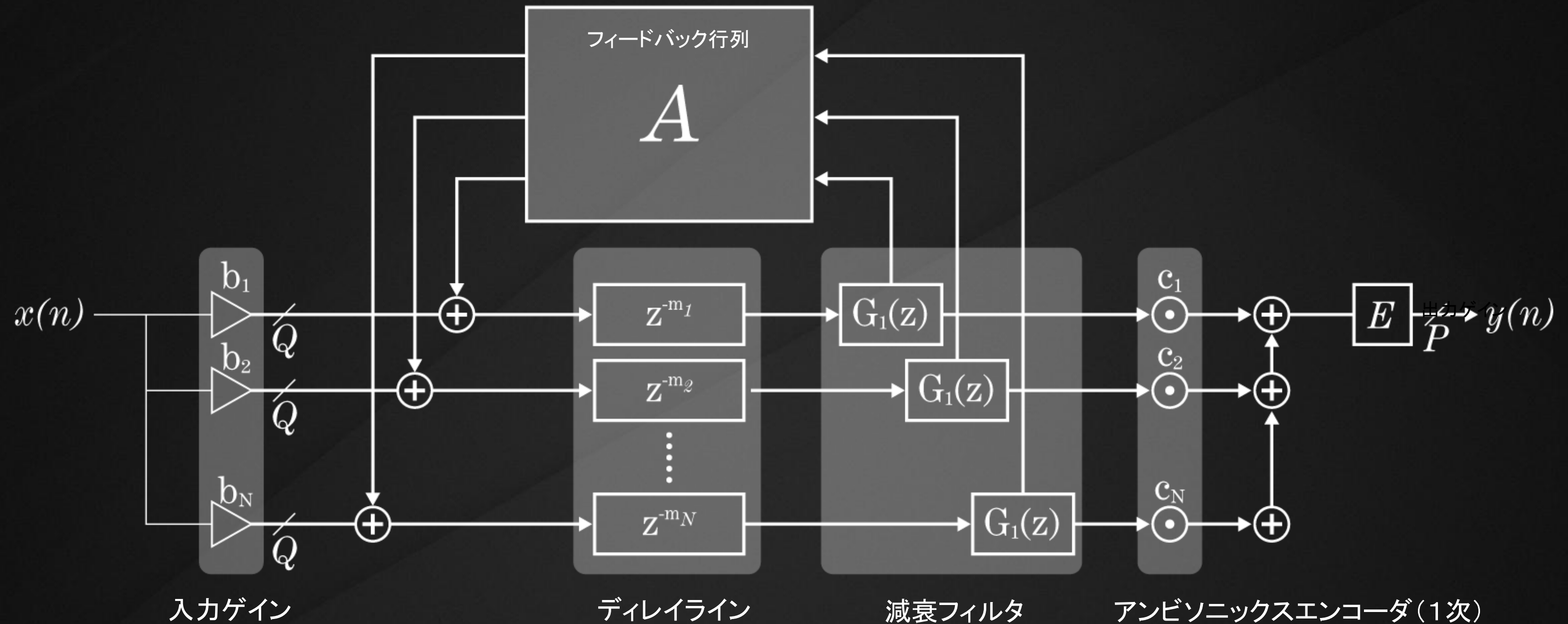


後期反射音エフェクト

- 屋外：録音した屋外のインパルス応答の畳み込みを行う
- トンネルなどの準閉塞空間：方向別リバーブによる人口リバーブの付加を行う

方向別リバーブのアーキテクチャ

Directional Feedback Delay Network (Directional FDN, DFDN)^{[1],[2]}を参考に実装



Q : 仮想スピーカ数

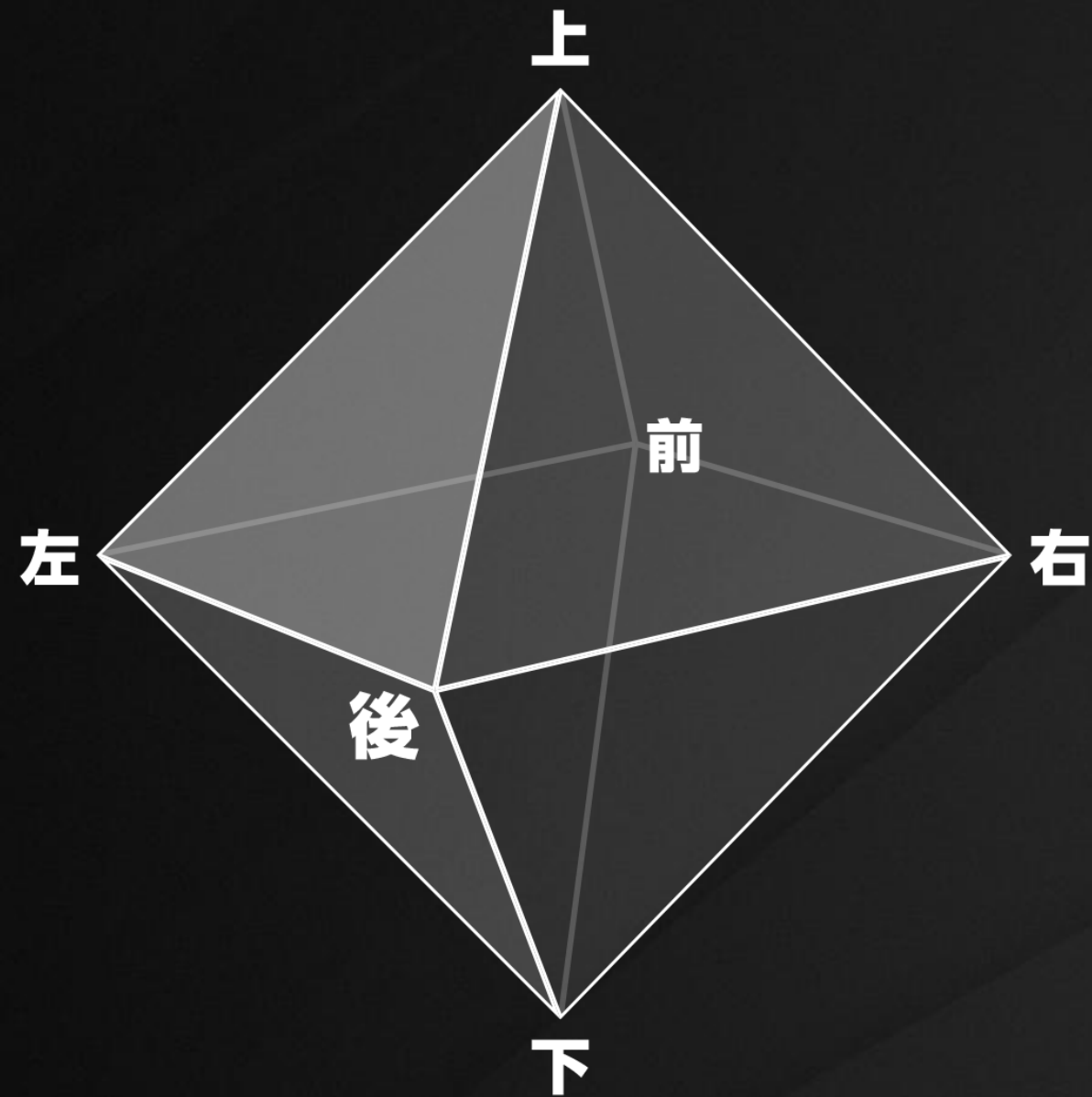
P : 出力チャンネル数

N : 仮想スピーカごとのディレイライン数

[1] Alary, Benoit, Archontis Politis, Sebastian Schlecht, and Vesa Välimäki. 2019. "Directional Feedback Delay Network." Journal of the Audio Engineering Society 67 (10): 752–62.

[2] Alary, Benoit, and Archontis Politis. 2020. "Frequency-Dependent Directional Feedback Delay Network." In ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 176–80.

仮想スピーカについて



- 正八面体の各頂点に上下左右前後に対応する仮想スピーカを配置
- 各仮想スピーカに対応するリバーブ信号を計算
 - 鏡像の情報を再利用してリバーブタイムなどのパラメータを計算
 - よりインタラクティブかつダイナミックな残響表現
- 1 次アンビソニックス信号にエンコードして出力

1 POSITION LAP
/ 1 1

1 Takashi  

13:05.600

2.6 m/s

1

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 GRAN TURISMO®
THE REAL DRIVING SIMULATOR

 POLYPHONY™
DIGITAL

13:05.600

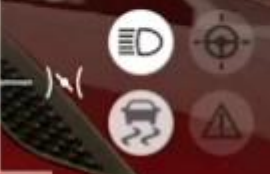


000,050.6



0 1

km/h AT



Radar

まとめ

- エンジン音制作ワークフローの紹介
 - エンジン音の録音方法
 - 再生システム
- エンジン音シンセサイザーの紹介
 - 録音が難しいクルマのための物理ベース合成手法
- 反射音エフェクトの紹介
 - 初期反射、後期反射のレンダリング手法