「はやぶさ2」ハードウェアシミュレータに係るレイトレーシングソフトウェアの開発

三浦　昭，武井悠人，山口智宏，
高橋忠輝，佐伯孝尚
宇宙航空研究開発機構

楽観できない「はやぶさ2」ミッション

3. 小惑星到着に備えて

- 小惑星リュウグウに探査機が接近することは初めてであり、さらに事前に把握できている情報が少ない。

  ※「はやぶさ」のときは、事前にレーダーによってイトカワが観測されていた＝形状や自転軸について信頼できる情報があった

- 「はやぶさ」では、2回のタッチダウンをしたが、2回とも予定通りにはできなかった。

⇩

「はやぶさ」の経験があるとは言え、全く楽観はできない

⇩

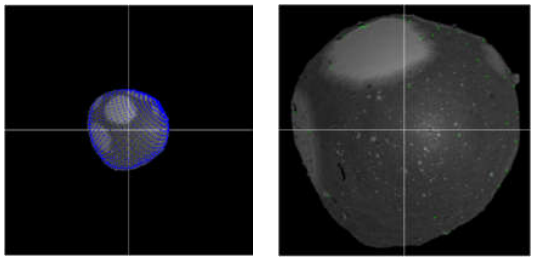
小惑星到着に備えて検討を進めている

※「はやぶさ」では、「こんなこともあろうかと･･･」

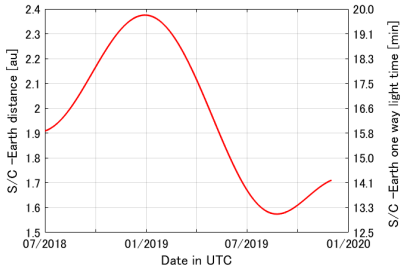
はやぶさ2プロジェクト “2018年の小惑星リュウグウ到着にむけて　小惑星探査機「はやぶさ2」の近況”, 2017年12月14日 記者説明会資料

ハードウェアシミュレータ（HIL）

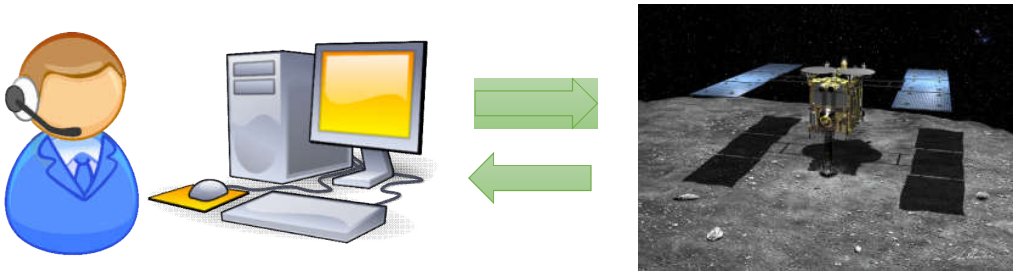
Hardware-in-the-Loop Simulator (HIL)
- Toward Real-time Integrated Operation (RIO) Training



Real-time Manual Shape/GCP Matching for GCP-NAV Descent



Critical Operations under Large Communication Delay



Consistency among Ground Operator Behavior, Operation Procedure, Ground Tools, and Spacecraft Behavior

A Hardware-in-the-Loop Simulator (HIL) capable of realistic asteroid image generation

Purpose
- RIO Training Campaign (4Q 2017 – 1Q 2018)
- Trouble shooting
- Operation procedure validation

Advantage ☺
- Minimum cost by reusing GM/EM/PFM
- Electrically equivalent to Flight Model
- Flight software installable

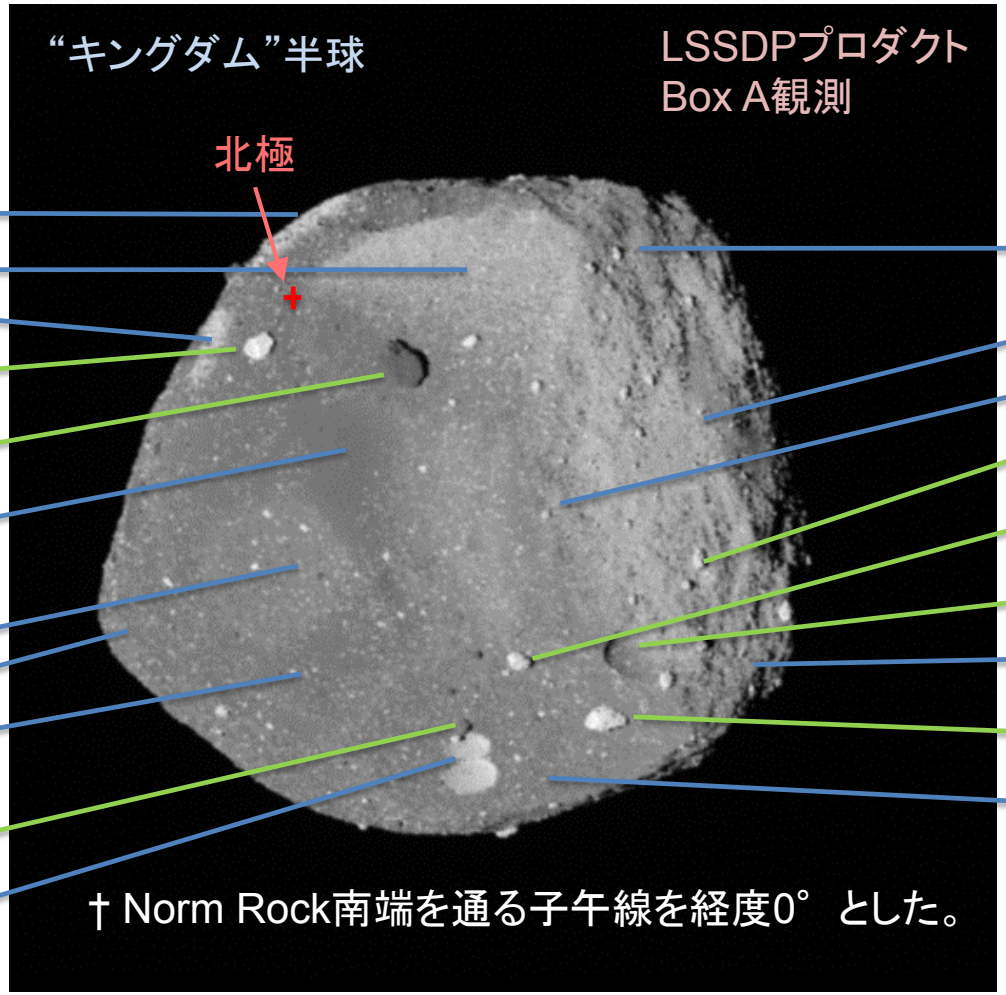
Drawbacks ☹
- Cannot reverse/speed-up simulation
- Not all components simulated

Yuto Takei et al., “A Hardware-in-the-Loop Simulator for Deep Space Touchdown Operation Training of Hayabusa2”, 68th International Astronautical Congress, Adelaide, Australia, Sep.2017

着陸地点選定訓練

4. LSS訓練：ONC画像

C. ... Crater
M. ... Montes
P. ... Planitia
R. ... Rock



高度 20 kmから
直径：～800 m

はやぶさ2プロジェクト “2018年の小惑星リュウグウ到着にむけて　小惑星探査機「はやぶさ2」の近況”, 2017年12月14日 記者説明会資料

模擬画像生成の必要性

- 事例
  - リアルタイムの運用訓練
  - 着陸地点選定訓練
  - etc.
- 画像生成装置に求められる機能・性能
  - リアルタイム性
  - 高精細，高精度
    - 小惑星全体を，10cm程度の精度で模擬する
    - ONC-W相当: 高度100m程度の分解能
  - 様々な光学機器の模擬
    - ONC-W1, ONC-W2, LIDAR, 理学用カメラ等
    - 歪み
  - etc.

画像生成装置（HILIGS）の概要

Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulator - Design of Asteroid Image Generator

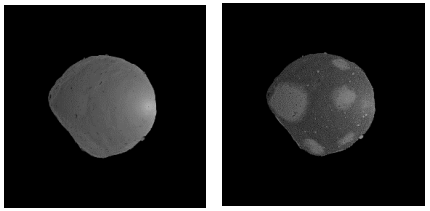
Inputs

- S/C Attitude Quaternion (J2000EQ → Σsc)
- Ryugu Position wrt Sun (J2000EQ)
- Earth Position wrt Ryugu (J2000EQ)
- Sun Position wrt Ryugu (J2000EQ)
- Epoch (MJD)
- S/C Position wrt Ryugu (Σhp)
- S/C Position wrt Ryugu (J2000EQ)
- –Zsc Direction Vector (J2000EQ)
- S/C Velocity wrt Ryugu (Σhp)

Asteroid Image Generator

Outputs

- Degraded Asteroid CG



- Precise Asteroid CG
- LIDAR Data (Spacecraft - Surface Distance)
- Doppler Data

Specification

- Lay-tracing method for CG generation
- 5 million polygons for Degraded Asteroid Model
- 0.4 billion polygons for Precise Asteroid Model
- Geological information considered in Precise Model

Design Compromise

- “Input data transfer“ is asynchronous to “Output data calculation” (due to budget limitation)

Yuto Takei et al., “A Hardware-in-the-Loop Simulator for Deep Space Touchdown Operation Training of Hayabusa2”, 68th International Astronautical Congress, Adelaide, Australia, Sep.2017

画像生成装置への入力

- JSON形式
  - { “名前”: 値, “名前”: 値, …}
- 主要なパラメータ
  - 探査機
    - 位置（小惑星相対），姿勢
  - カメラ
    - モード，露光時間
  - 小惑星
    - 位置（太陽相対，地球相対），自転情報
  - 時刻
  - etc.

画像生成装置からの出力

- 小惑星CG（簡易版）
  - 小惑星形状モデル（簡易版）: 100万ポリゴン～
  - 画素値計算: Hapkeモデル（簡易版）
  - 高速レンダリング
    - 応答速度の目安（例）: 0.1s
- 小惑星CG（詳細版）
  - 小惑星形状モデル（詳細版）: ～4億ポリゴン
  - 画素値計算: 理学データ，理学ライブラリとのインタフェース
  - 高精細レンダリング
    - オーバーサンプリング
- LIDAR（測距）情報
- いずれも，レイトレーシングのアルゴリズムを採用

レイトレーシングのメリット・デメリット

- メリット
  - 影の描写に長けている
    - 小惑星の地形同士の影
    - 探査機の影
  - 歪みの付加が容易
    - 歪み除去関数を用いて、直接歪んだ画像を生成できる
- デメリット
  - 遅い
    - 画素ごとにレイ（視線）を追跡
    - オブジェクト毎に総当たりで衝突判定

模擬画像生成の必要性

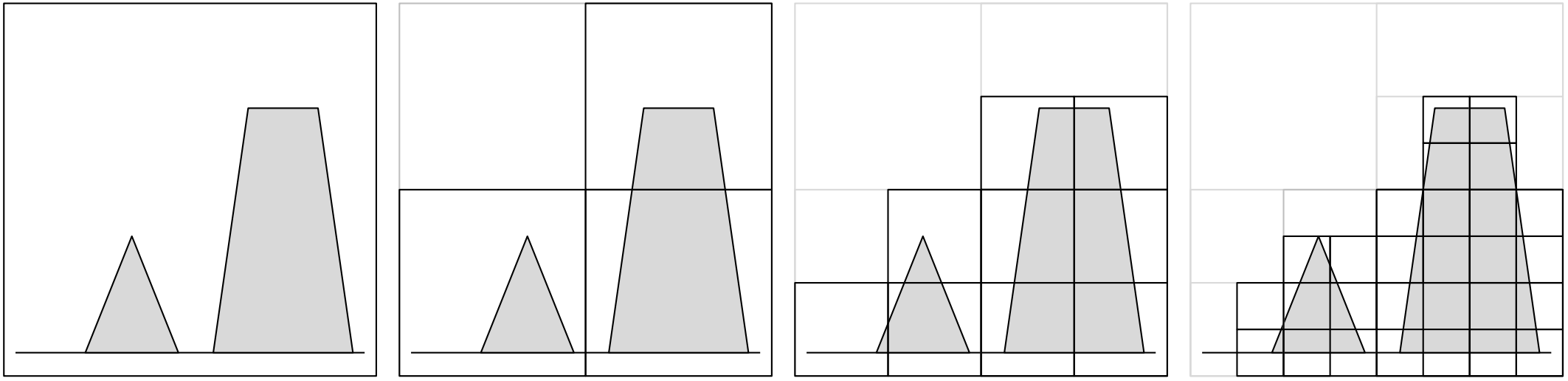
- 事例
  - リアルタイムの運用訓練
  - 着陸地点選定訓練
  - etc.
- **画像生成装置に求められる機能・性能**
  - **リアルタイム性**
  - 高精細，高精度
    - 小惑星全体を，10cm程度の精度で模擬する
    - ONC-W相当: 高度100m程度の分解能
  - 様々な光学機器の模擬
    - ONC-W1, ONC-W2, LIDAR, 理学用カメラ等
    - 歪み
  - etc.

レイトレーシングの高速化

- Voxel分割
  - 分割の階層化
    - e.g., 100万ポリゴン: 10階層程度
  - オブジェクト空間での事前分割
    - レンダリング時のVoxel分割が不要
  - キャッシュファイル
    - Voxel分割の処理時間短縮
- 並列処理（OpenMP）
  - （画像生成装置の場合）20コア
- クライアント・サーバ方式
  - データ読み込み時間の省略

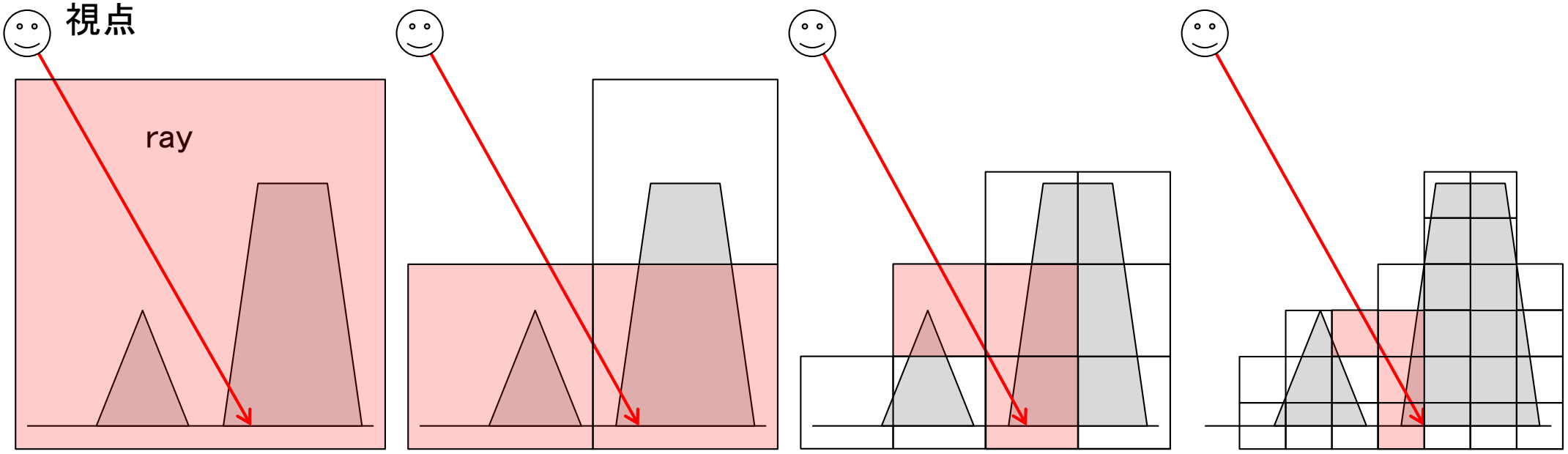
Voxel分割

- レイの追跡に先立って
  - オブジェクト（シーン）を包含するvoxelを作成
  - Voxelを細分化しつつ，そこに含まれるオブジェクトを探索
  - オブジェクトが含まれないvoxelは作成しない
  - 簡単のため，voxelを四角形で例示



Voxel分割

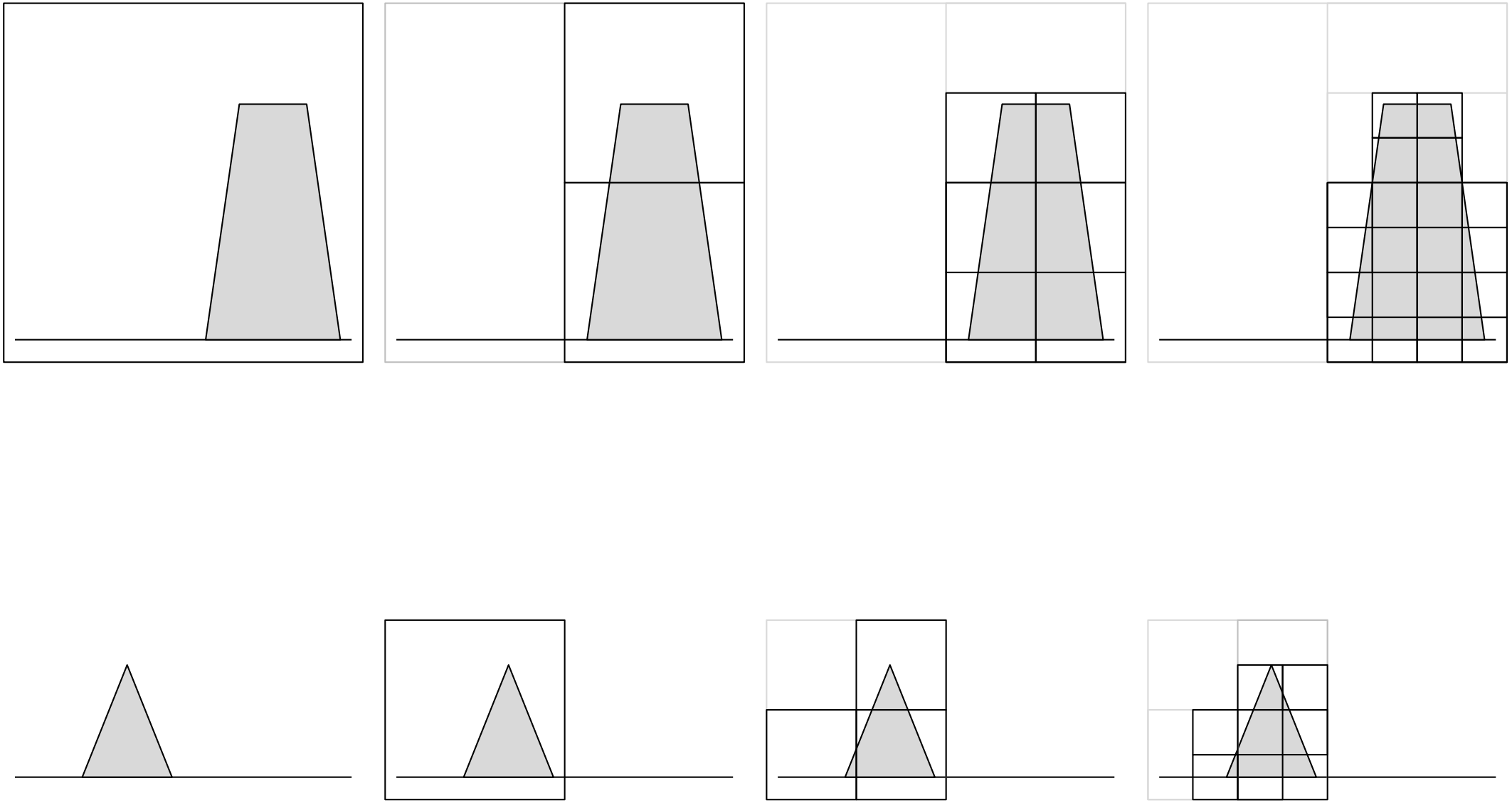
- レイの追跡
  - それぞれのレイにヒットしたvoxelのみ追跡
  - 階層的に追跡
- プリミティブ数（n）が多いと，効果的
  - 実行時間は、概ねO(log n)



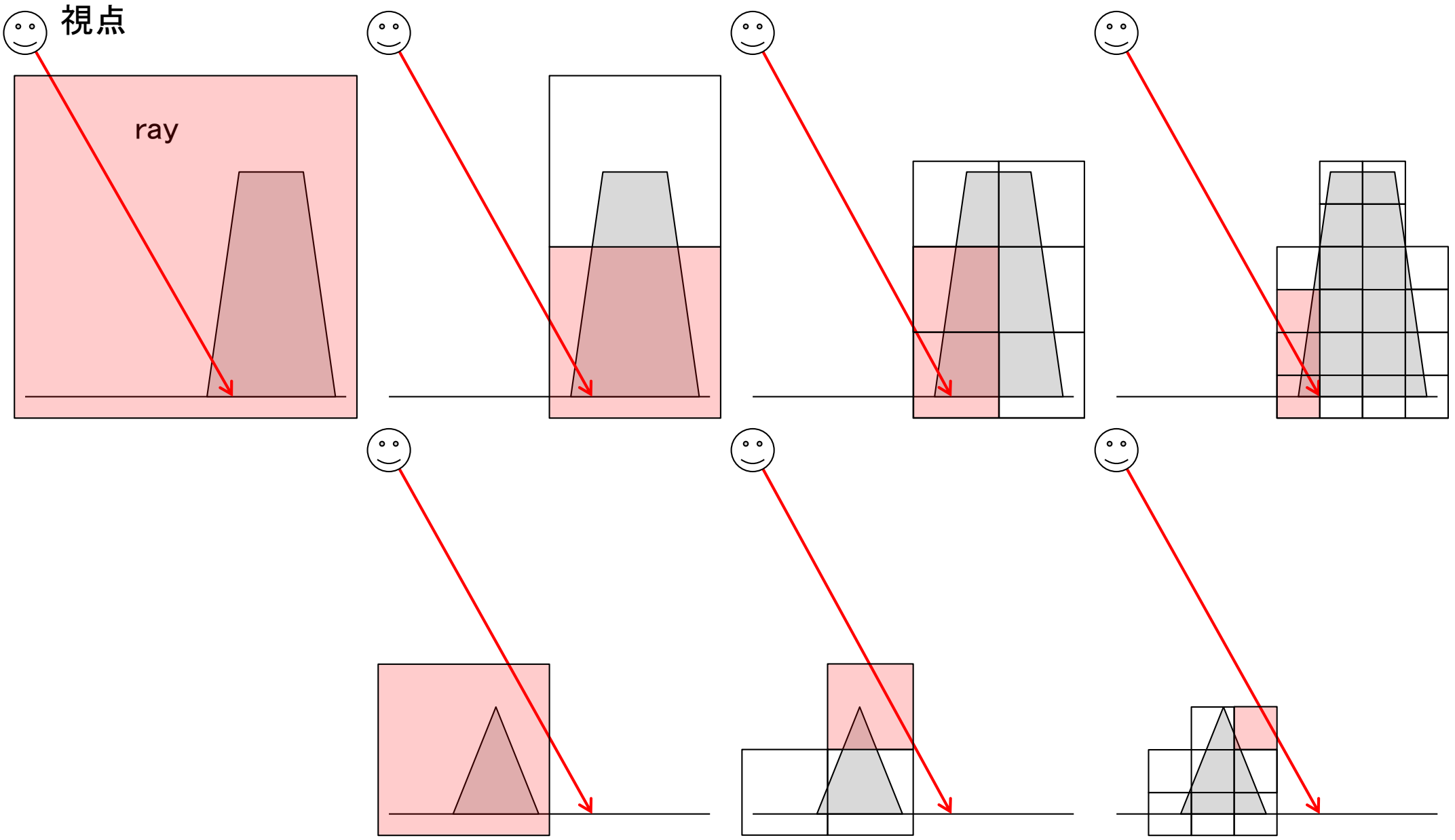
Voxel分割: 分割方法

- シーン毎に分割
  - 一般のCGソフト
  - レンダリングの度にVoxel分割を実施
  - レイを追跡するVoxel群は，シーン毎に1つ
- オブジェクト毎に分割
  - 分割作業はオブジェクトの読込時のみ
  - レイを追跡するVoxel群はオブジェクト数に比例
- 画像生成装置における手法: オブジェクト毎に分割
  - 画像生成装置のオブジェクトは，原則として2つ（少ない）
    - 小惑星
    - 探査機
  - →Voxel分割のコストより，複数回の追跡を選択

Voxel分割（オブジェクト毎）

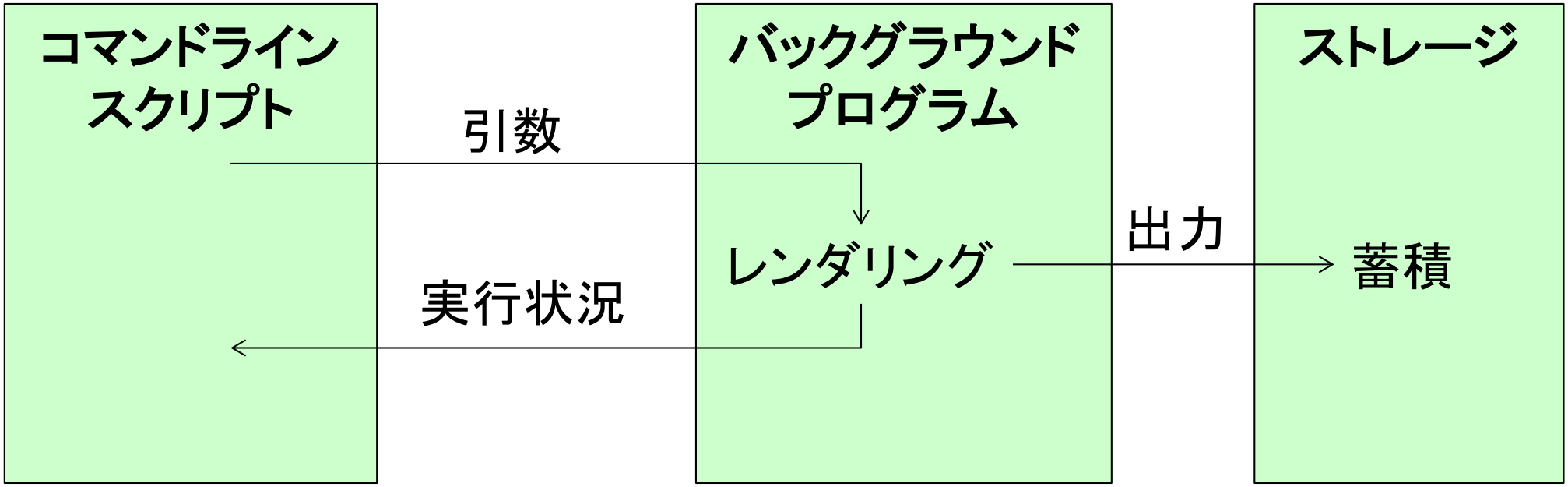


Voxel分割（オブジェクト毎）



クライアント・サーバ

- バックグラウンドプログラム
  - 常駐
  - レンダリングに必要なデータを常備
    - 形状データ
    - Voxel分割
  - TCP/IPでコマンド（引数）を受け取ってレンダリング



バックグラウンドプログラム（サーバ）

- 起動時
  - 各種パラメータ（JSON）の読込
  - 形状データの読込
    - Voxel分割データ（キャッシュ）の読込
      - 初回はVoxel分割データの生成，キャッシュの保存
  - 理学データの読込（オプション）
- 定常作業（クライアントからの要求に応じて）
  - 起動時に読み込んだデータを再利用
    - レンダリングに必要な前処理が不要
  - JSONパラメータの受け取り
  - データ生成
  - データ保存

コマンドラインスクリプト

- レンダリングの指示のみ
- 各種パラメータをJSON形式で指定

模擬画像生成の必要性

- 事例
  - リアルタイムの運用訓練
  - 着陸地点選定訓練
  - etc.
- **画像生成装置に求められる機能・性能**
  - リアルタイム性
  - **高精細，高精度**
    - **小惑星全体を，10cm程度の精度で模擬する**
    - **ONC-W相当: 高度100m程度の分解能**
  - 様々な光学機器の模擬
    - ONC-W1, ONC-W2, LIDAR, 理学用カメラ等
    - 歪み
  - etc.

高精細化

- （どちらかというと）速度より精度
- 大容量主記憶
  - ポリゴンデータ，Voxel分割データ，地質データ等（詳細版）
  - ～4億ポリゴン
    - 主記憶128GB+
    - Voxel分割階層数: 12
      - 最適: 14階層前後?
      - 消費メモリとのトレードオフ
- 理学データの反映（オプション）
  - データの読込
  - 画素値計算用関数（ライブラリ）の呼び出し

Voxel分割: サイズ比較

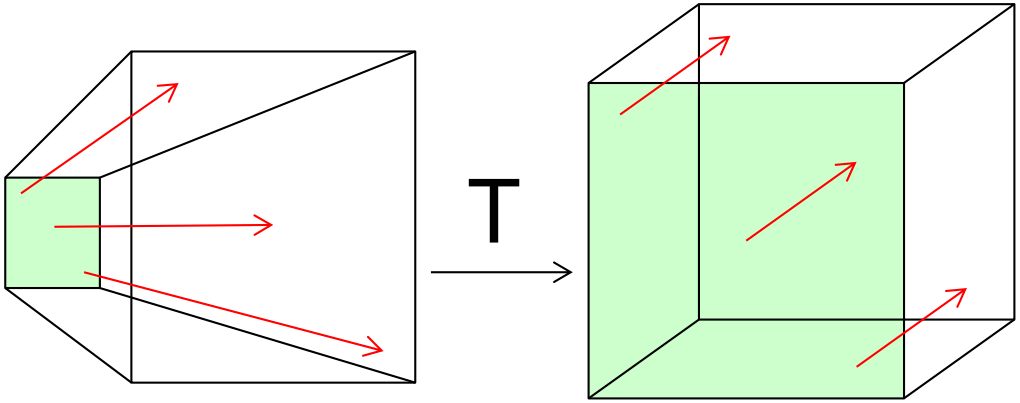
	ポリゴン数	階層数	Voxel数	キャッシュサイズ
例1	1.3M	10	1.5M	194MB
例2	1.3M	11	5.9M	731MB
例3	1.3M	12	23.4M	2,834MB
例4	369M	12	25.8M	5,520MB

模擬画像生成の必要性

- 事例
  - リアルタイムの運用訓練
  - 着陸地点選定訓練
  - etc.
- **画像生成装置に求められる機能・性能**
  - リアルタイム性
  - 高精細，高精度
    - 小惑星全体を，10cm程度の精度で模擬する
    - ONC-W相当: 高度100m程度の分解能
  - **様々な光学機器の模擬**
    - **ONC-W1, ONC-W2, LIDAR, 理学用カメラ等**
    - **歪み**
  - etc.

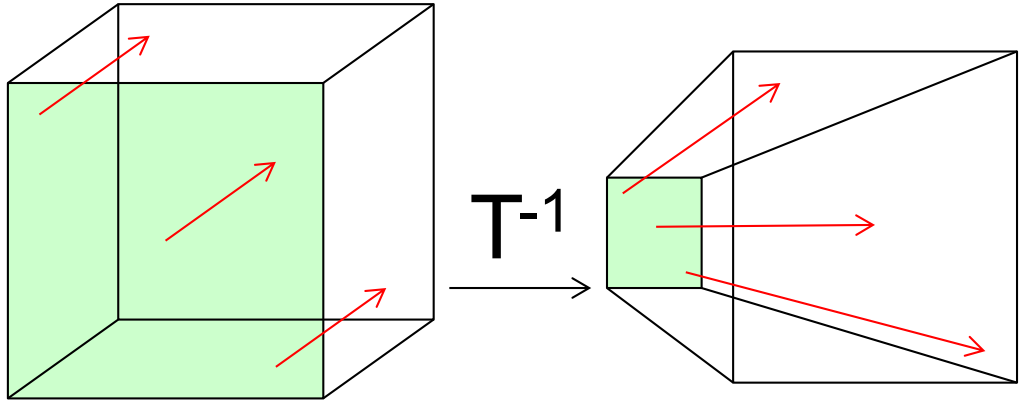
光学機器の模擬

- 視野計算，アラインメント
  - OpenGLに準じた行列（4x4）定義
  - （OpenGLを用いた簡易プレビューとの連携）



実視野　　正規化視野空間

OpenGL: オブジェクトの座標値を、実視野空間から正規化視野空間に変換
→Z-Buffering



正規化視野空間　　実視野

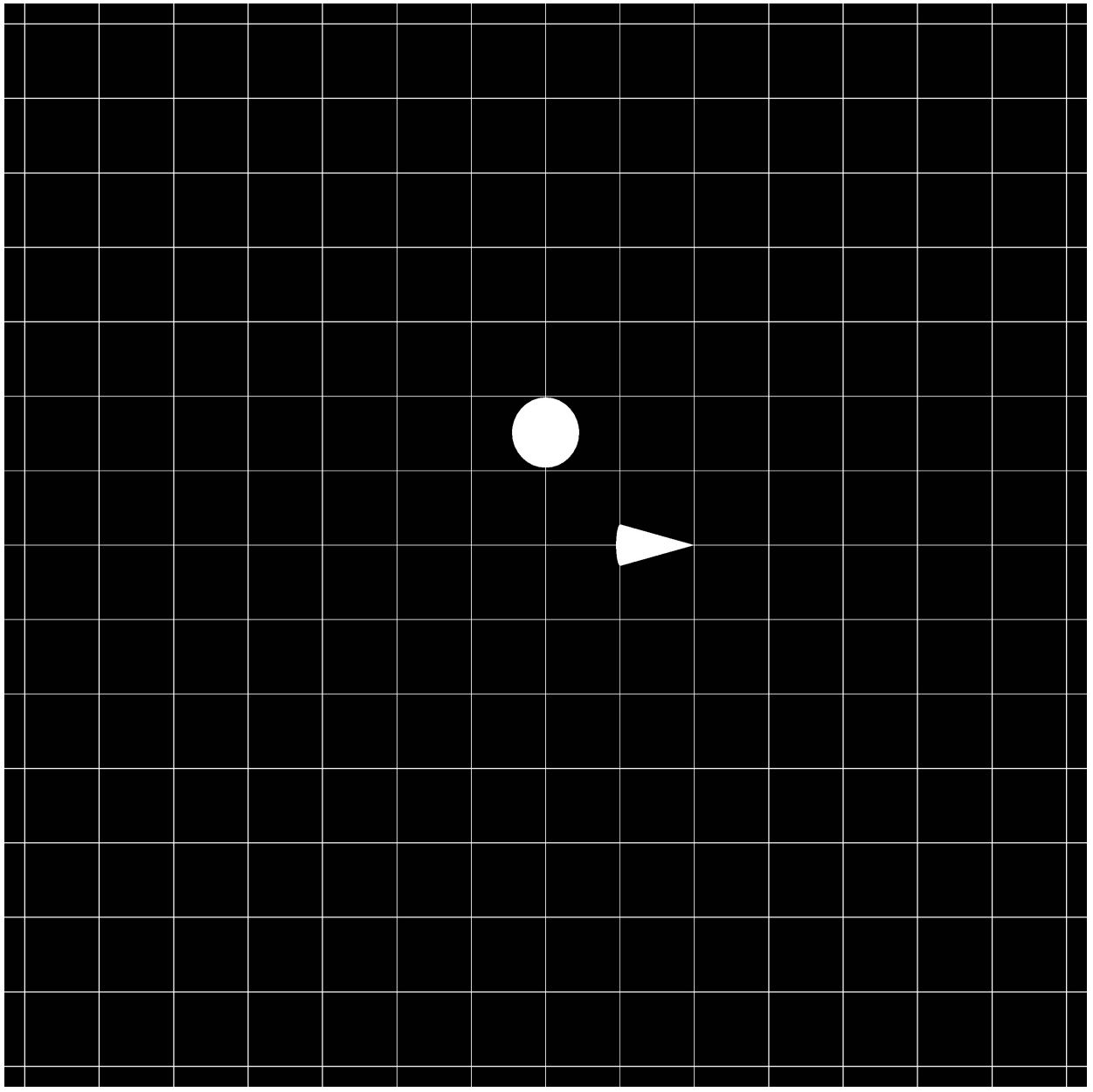
画像生成装置:レイの座標値を、正規化視野空間から実視野空間に変換
→レイトレーシング

歪の付加

- 歪み除去関数（例）
  - 2次元のスクリーン（CCD等）座標系に対して
  - 例: $R(r) = r * (A*r^4 + B*r^2 + C)$
  - r: 歪み付き画像でのピクセル位置（中心からの距離）
  - $R(r)$: 歪を除去した画像でのピクセル位置
- 一般的な歪み付加
  - レンダリング後の（歪の無い）画像に対して
  - 歪み除去関数の逆関数を用いる
- レイトレーシングの歪み付加
  - レンダリング前の座標値に対して
  - 歪み除去関数を用いる

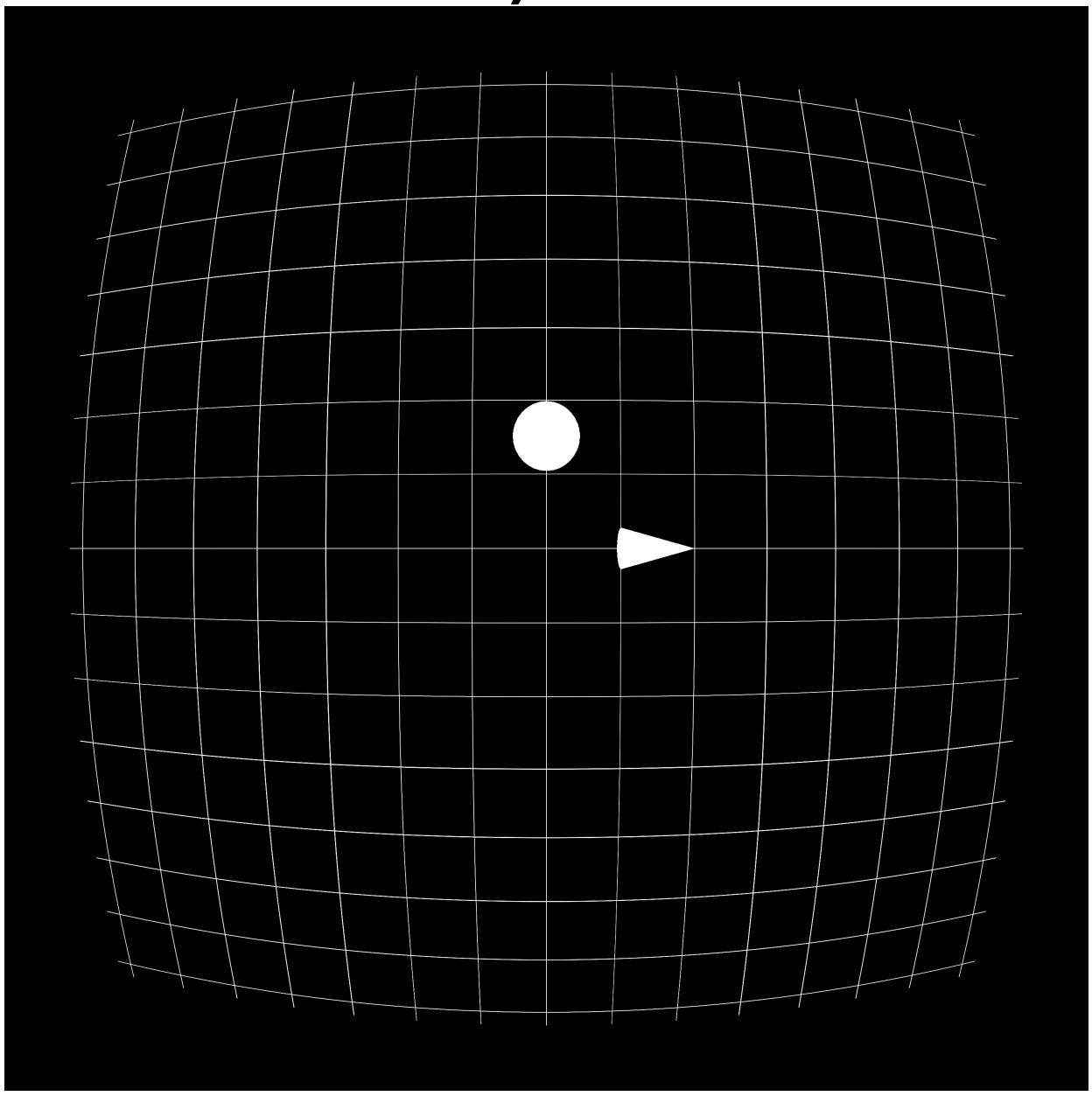
歪の付加

- 歪み無し



歪の付加

- 例: $R(r) = r * (0*r^4 + 0.2*r^2 + 1)$
- 樽型歪み



まとめ

- レイトレーシング
- リアルタイム性
  - Voxel分割
  - 並列処理
  - クライアント・サーバ
- 高精細，高精度
  - 大容量主記憶
  - 理学データ、画素値計算用関数（ライブラリ）への対応
  - オーバーサンプリング
- 様々な光学機器の模擬
  - 視野、アラインメント: 4x4行列
  - 歪み除去関数