

# コンピュータビジョン —核融合研究におけるダスト 3次元解析—

大同大学情報学部 竹内義則  
名古屋大学情報科学研究科 大瀧雄貴

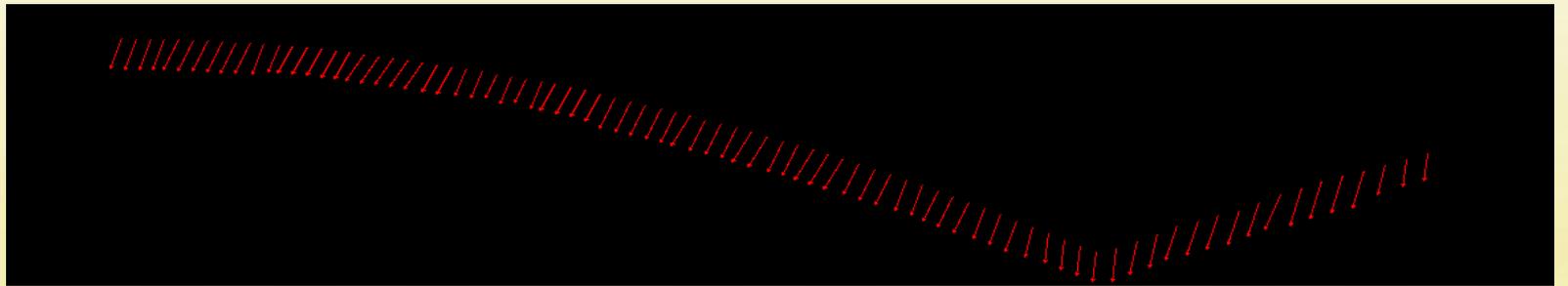
# 自己紹介

- 略歴

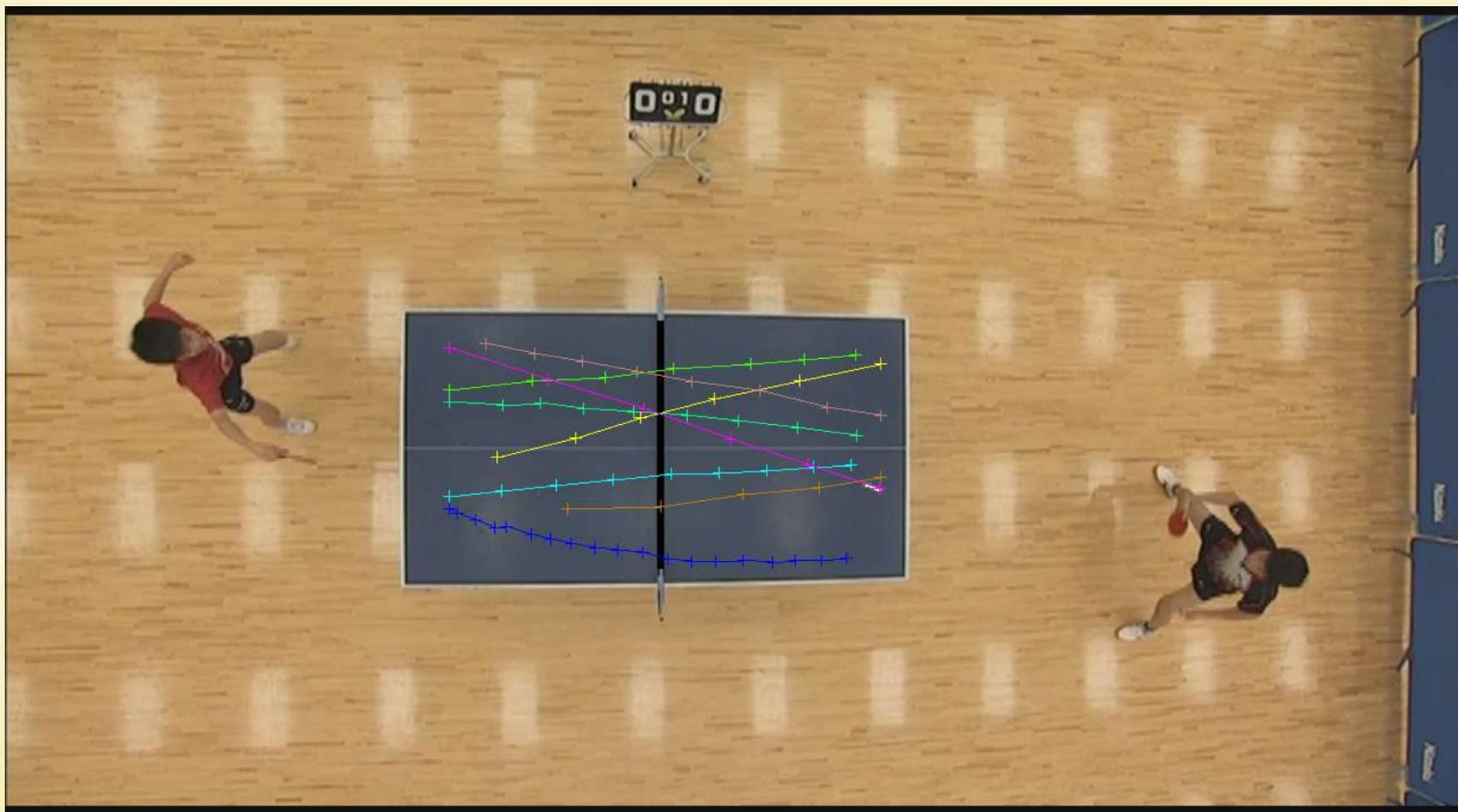
- 2000年4月 名古屋大学助手
- 2004年7月 名古屋大学助教授
- 2012年4月 大同大学准教授

- 研究テーマ

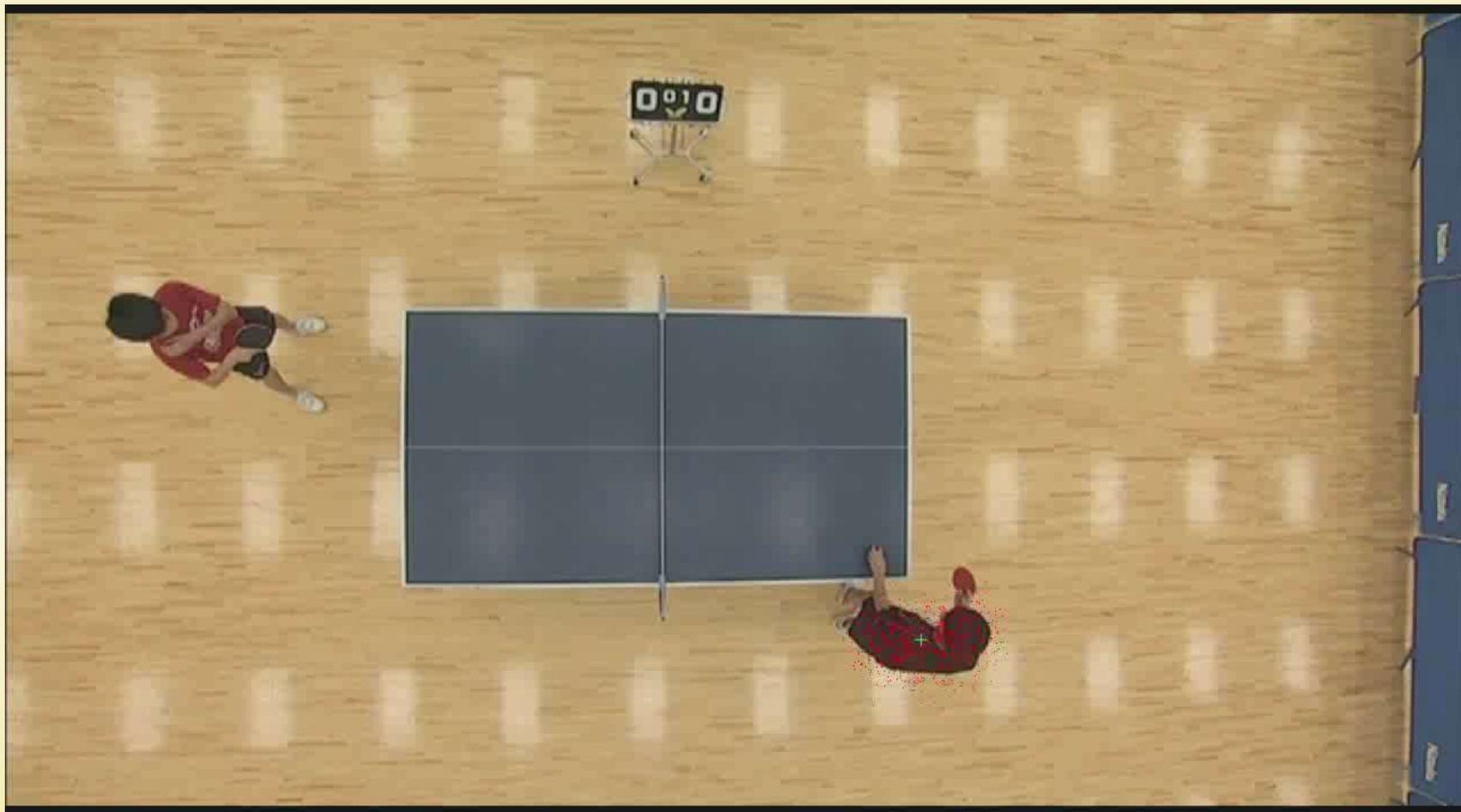
- 視覚情報処理
  - 初期視覚系の数理モデル
  - 卓球ボールの回転の計測, ボール・選手の追跡
- 聴覚情報処理
  - 音源定位, 音源分離
- 障害者支援
  - 視覚障害者支援
  - 聴覚障害者支援



# 卓球ボールの追跡



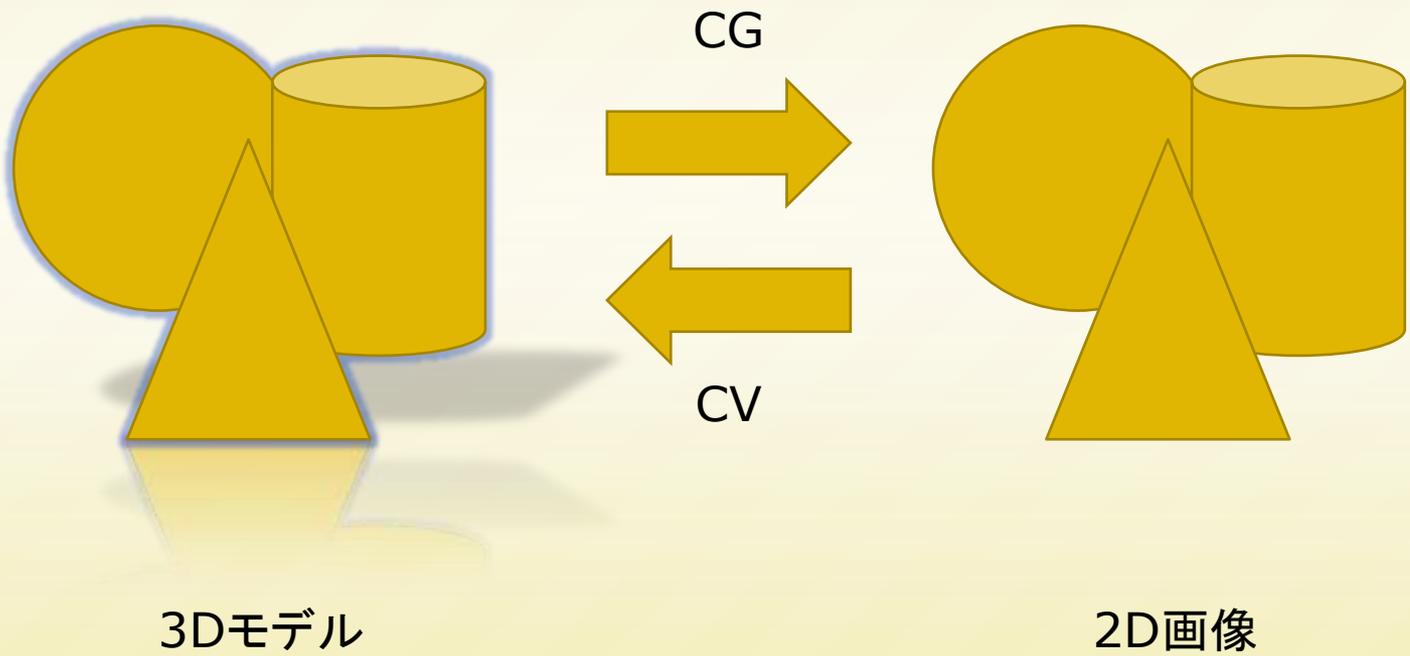
# 卓球選手の追跡



# ダストの3次元解析

- 2010～2011ごろ，ダストの3次元計測に関する共同研究の立ち上げ
- 2012～ 大瀧君（名古屋大学大学院生）  
「核融合炉におけるステレオ高速度カメラを用いたダストの3次元軌跡解析」

# コンピュータビジョン

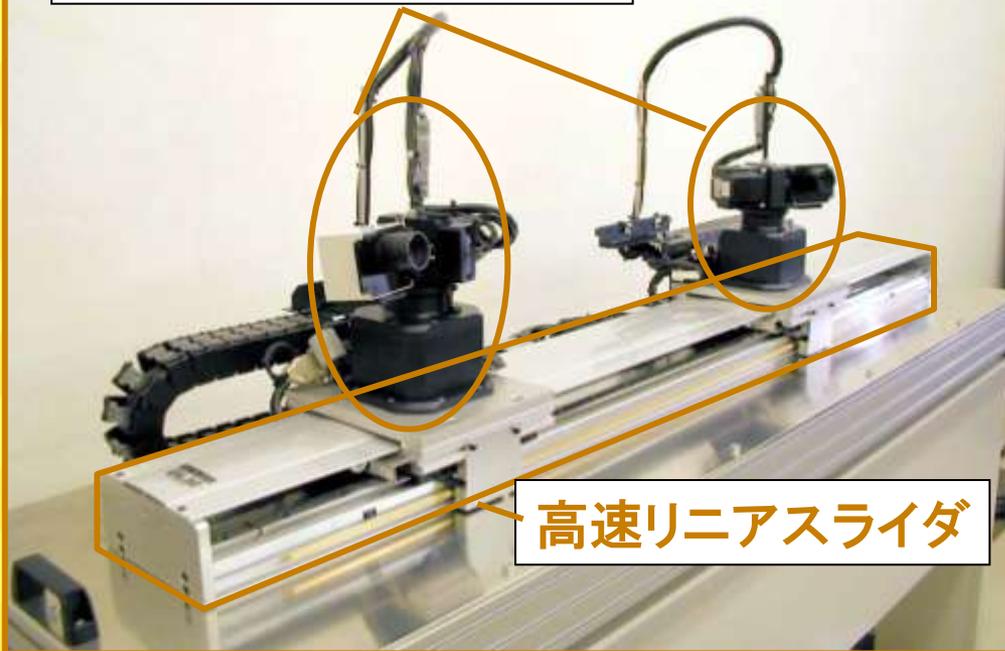


# Shape from X

- Stereo
  - ステレオ視の視差を利用
- Motion
  - 動きの情報を利用
- Texture
  - 模様の見え方を利用
- Shading
  - 陰影の情報を利用
- Focus
  - 焦点の情報を利用

# 追従型ステレオビジョンシステム

## 超高速ビジョンシステム



高速リニアスライダ

## 高速リニアスライダ

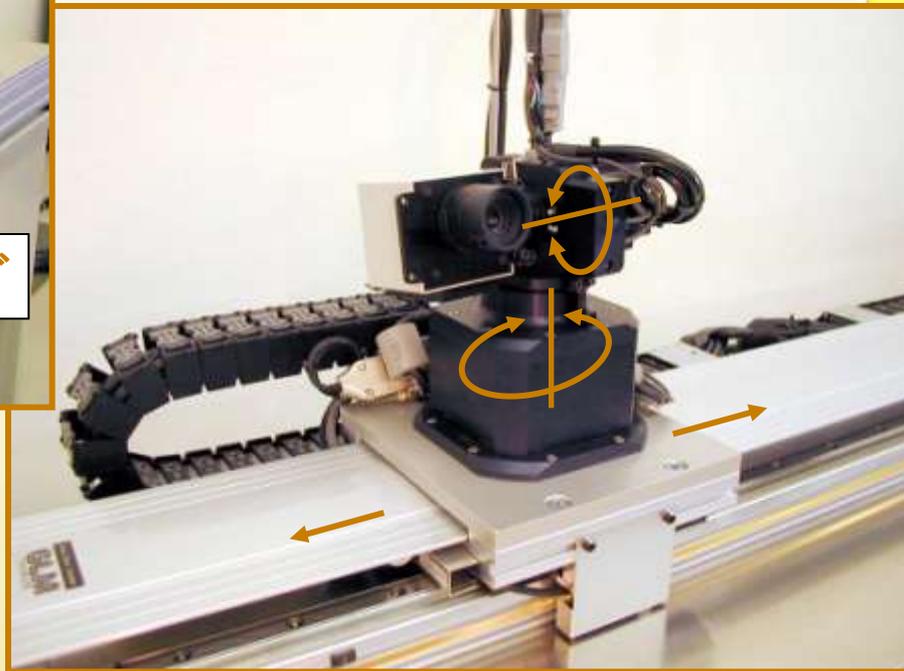
カメラの水平位置と基線長を変更

- ・全長 1.5m
- ・最大速度 2m/s

## 超高速ビジョンシステム

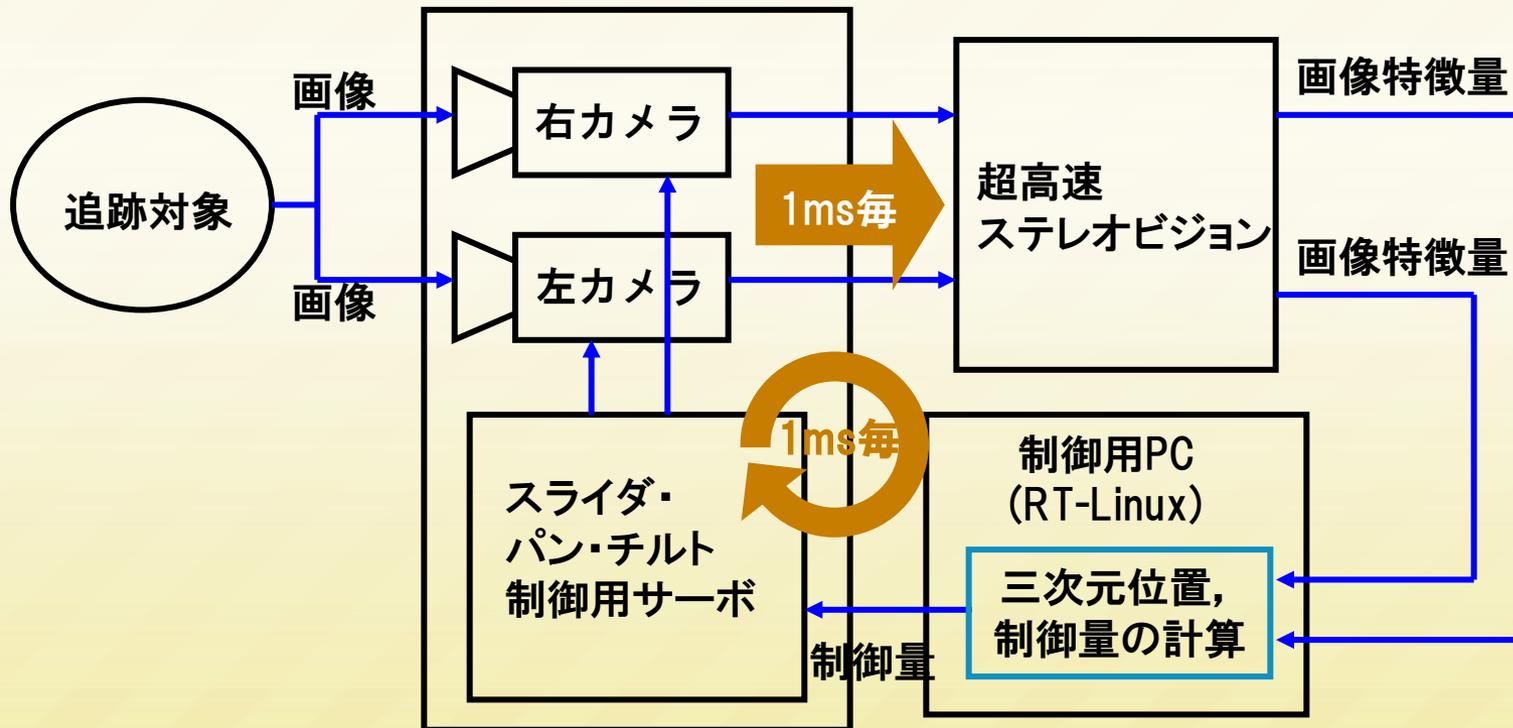
1ms間隔で画像を取り込み、並列処理による  
画像特徴量の計算

- ・画像サイズ 128x128pixels
- ・階調 グレースケール256階調
- ・フレームレート 1kHz



# 処理の流れ

- ビジュアルフィードバック制御
- リアルタイム制御





# 本研究の特徴

- 物体を追跡しつつ3次元計測を行う。
  - 物体がカメラ画像に大きく投影されている時
    - ・ 標準ステレオマッチング(左右パン, チルト角 $0^\circ$ )で形状復元
    - ・ スライダの水平移動で追跡
  - 物体がカメラ画像に小さく投影されている時
    - ・ 物体を注視するようにパン, チルトを制御し物体の重心位置を三角測量
    - ・ パン, チルト, スライダを用いて追跡
  - 三次元計測誤差が最小になるように基線長を制御する.

# 奥行き測定誤差の原因

- 三角測量，形状復元の奥行き測定に誤差が生じる。

## 原因

- エンコーダの分解能
  - パン・チルト：1エンコーダ分 $9.6 \times 10^{-5}$ rad
  - スライダ：1エンコーダ分 $1\mu\text{m}$
- カメラの1pixel分の大きさ
  - 1pixel=0.04mm, 0.005rad

基線長を変更して精度を上げる。

# 奥行き測定誤差の範囲（正面の誤差）

カメラの1pixel分の角度( $\Delta\theta$ )を考える.

$$\theta = \arctan\left(\frac{2D}{L}\right)$$

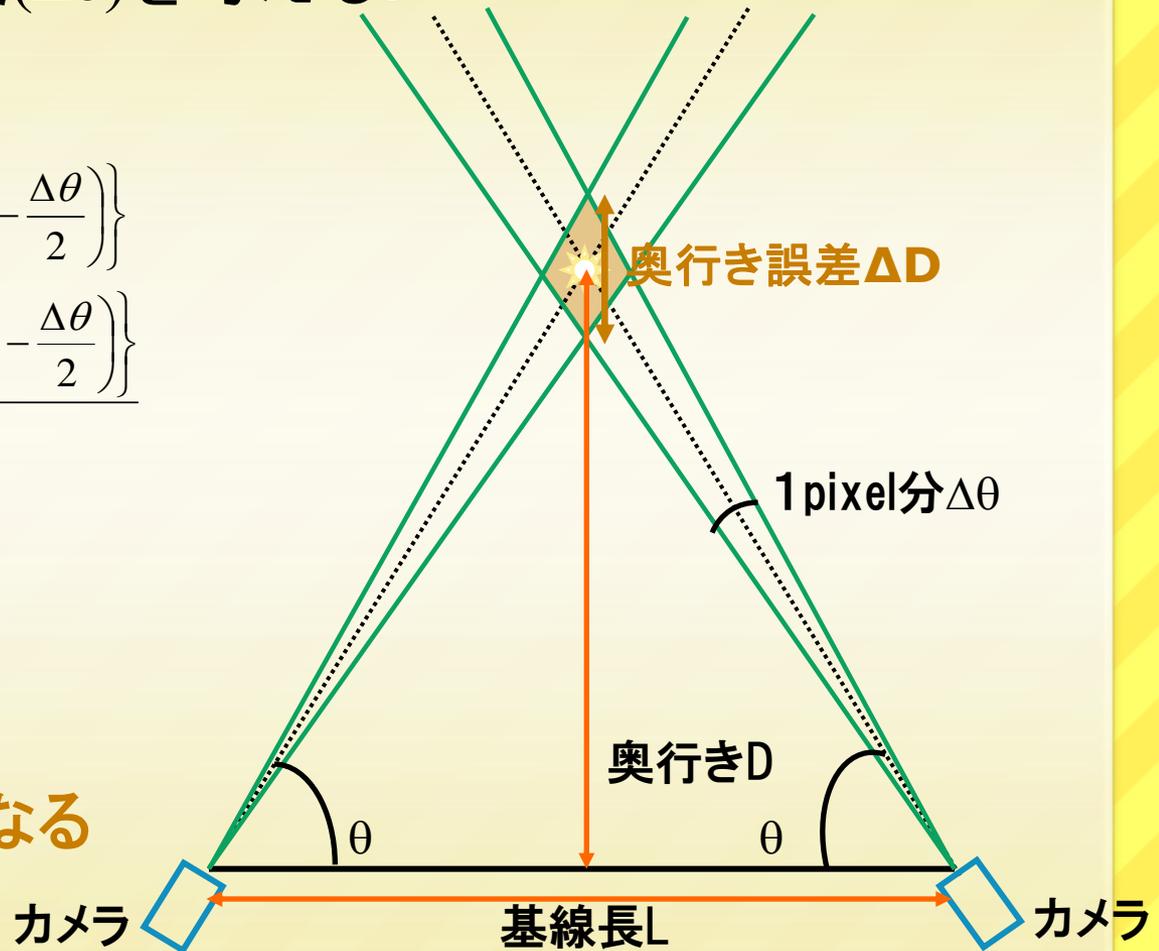
$$\Delta D = \frac{L}{2} \left\{ \tan\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \tan\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right\}$$

$$\frac{\Delta D}{\Delta\theta} = \frac{L}{2} \frac{\left\{ \tan\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \tan\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right\}}{\Delta\theta}$$

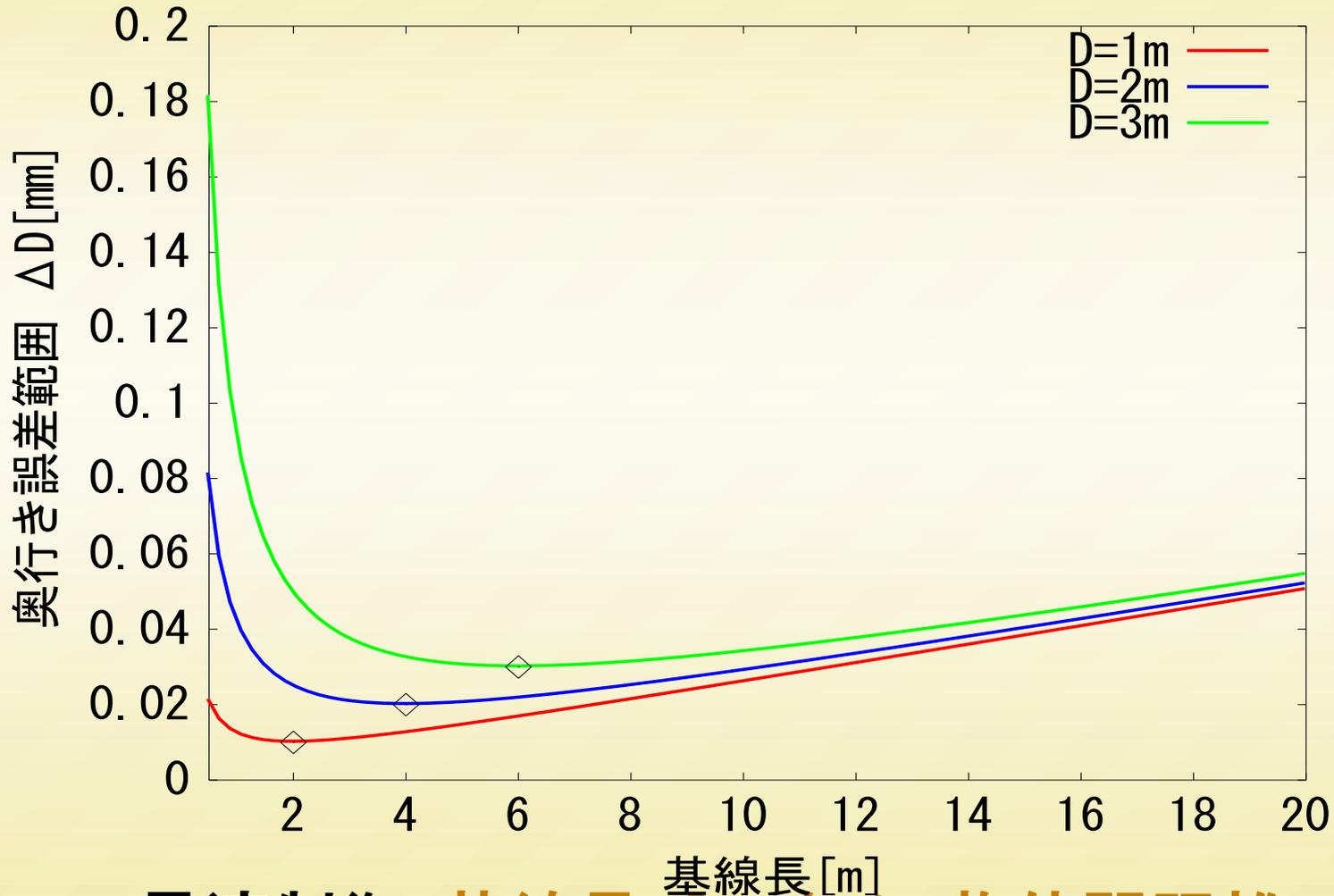
$\Delta\theta$ が微小だとすると

$$\frac{\partial D}{\partial \theta} = \frac{L}{2} (\tan \theta)' = \frac{2D}{\sin 2\theta}$$

よって  $\theta = 45^\circ$  の時,  
奥行き誤差は最小となる



# 基線長の決定方法



最適制御: 基線長 = 2 × カメラ物体間距離

# 奥行き推定の評価実験

本手法の基線長制御での奥行き推定評価を行った。

- 光源を奥行き400mmの位置に固定する。
- 基線長を500mmから900mmまで50mm間隔で変更して  
奥行き計算を行った。
- 各基線長で20回試行。

# 奥行き推定結果

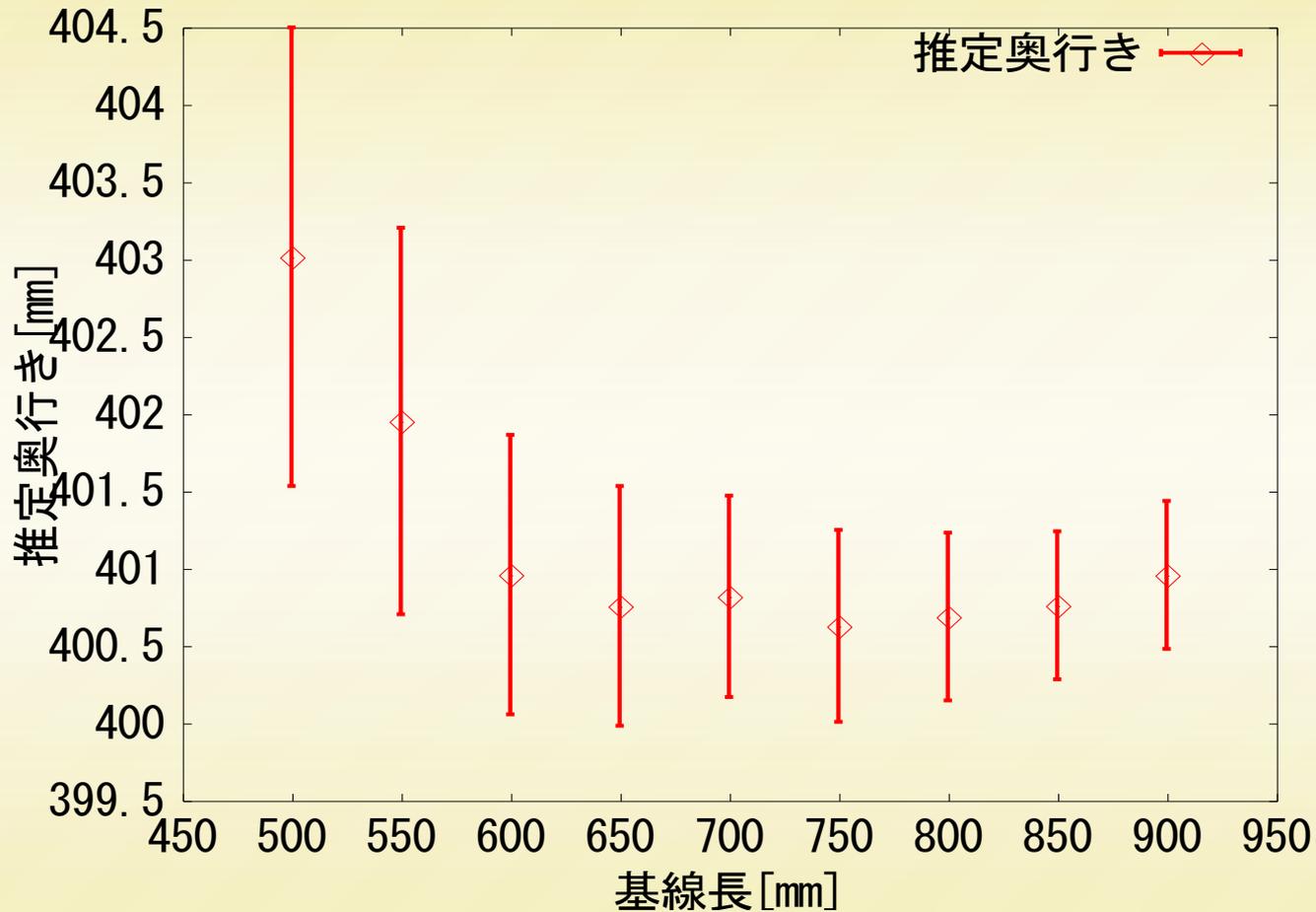


図:各基線長での奥行き推定結果

# 基線長の決定方法

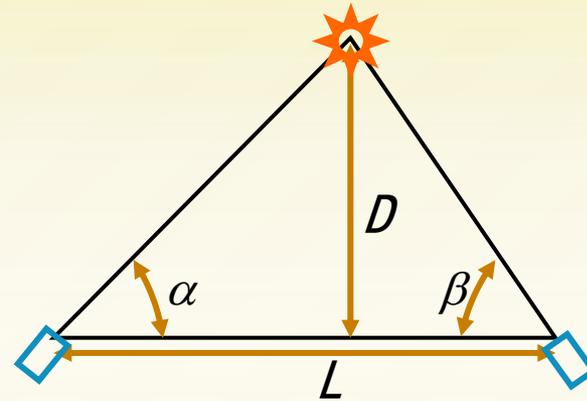
- スライダの制限で正対視できない場合

$$D = L \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \alpha} = L \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2(\alpha + \beta)}$$

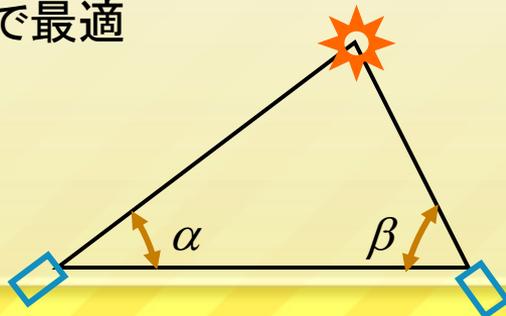
誤差  $\frac{\partial D}{\partial \alpha}$  を最小にする

→  $\sin(\alpha + \beta)$  を最大にする



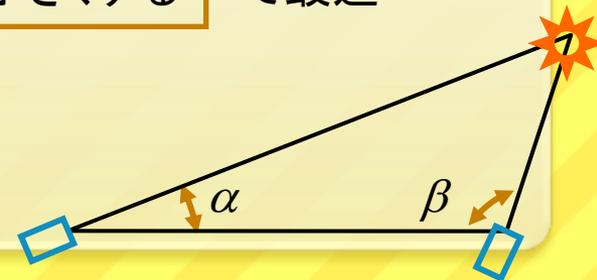
(i)  $45^\circ < \beta < 90^\circ$  の時

$\alpha = 90^\circ - \beta$  で最適



(ii)  $90^\circ \leq \beta < 180^\circ$  の時

$\alpha$  をできるだけ小さくする で最適



# 奥行き測定誤差の範囲(標準ステレオ配置)

カメラの1pixel分の大きさ( $\Delta x$ )を考える.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{f}{x}\right)$$

$$\theta_{upper} = \tan^{-1}\left(\frac{f}{x - \Delta x/2}\right)$$

$$\theta_{lower} = \tan^{-1}\left(\frac{f}{x + \Delta x/2}\right)$$

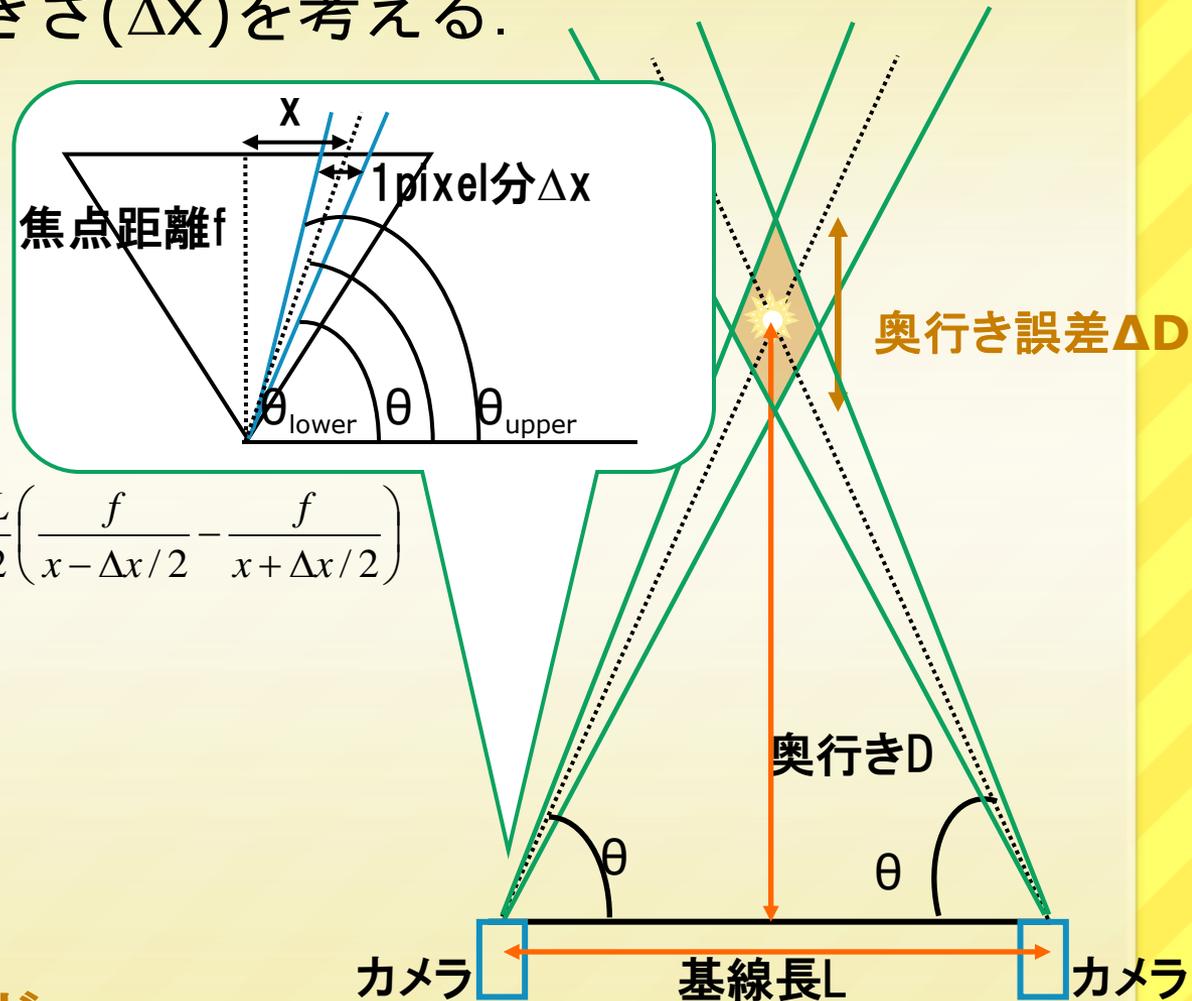
$$\Delta D = \frac{L}{2} \{ \tan(\theta_{upper}) - \tan(\theta_{lower}) \} = \frac{L}{2} \left( \frac{f}{x - \Delta x/2} - \frac{f}{x + \Delta x/2} \right)$$

$$\frac{\Delta D}{\Delta x} = \frac{L}{2} \frac{\left( \frac{f}{x - \Delta x/2} - \frac{f}{x + \Delta x/2} \right)}{\Delta x}$$

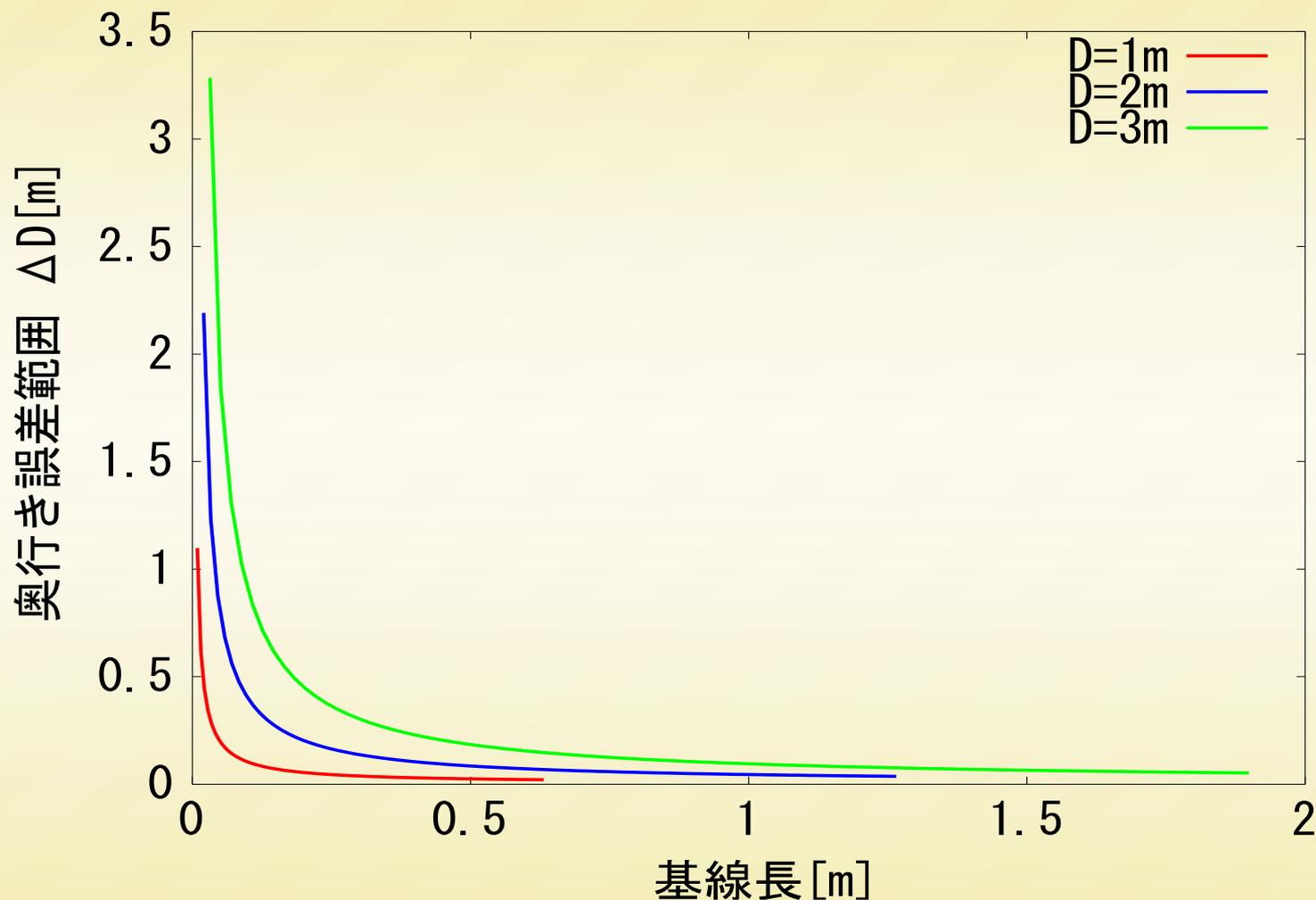
$\Delta x$ が微小だとすると

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{Lf}{2} \left( \frac{1}{x^2} \right) = \frac{Lf}{2} \cdot \frac{-1}{x^2}$$

よってxが大きいほど、  
奥行き誤差は小さくなる



# 基線長の決定方法(形状復元)



**最適制御: 基線長=物体を見失わない最長距離**

# 可変基線長制御の評価実験

提案した基線長決定方法の評価を行った。

- モータ駆動の車の玩具に光源を固定し，半径44cmの円状のコースを走らせた。
- 対象物体の重心位置を推定
- 比較した基線長制御方法
  - 提案手法
  - 基線長400mm固定
  - 基線長400mm水平移動
  - 基線長840mm固定



# 提案手法



# 基線長400mm固定



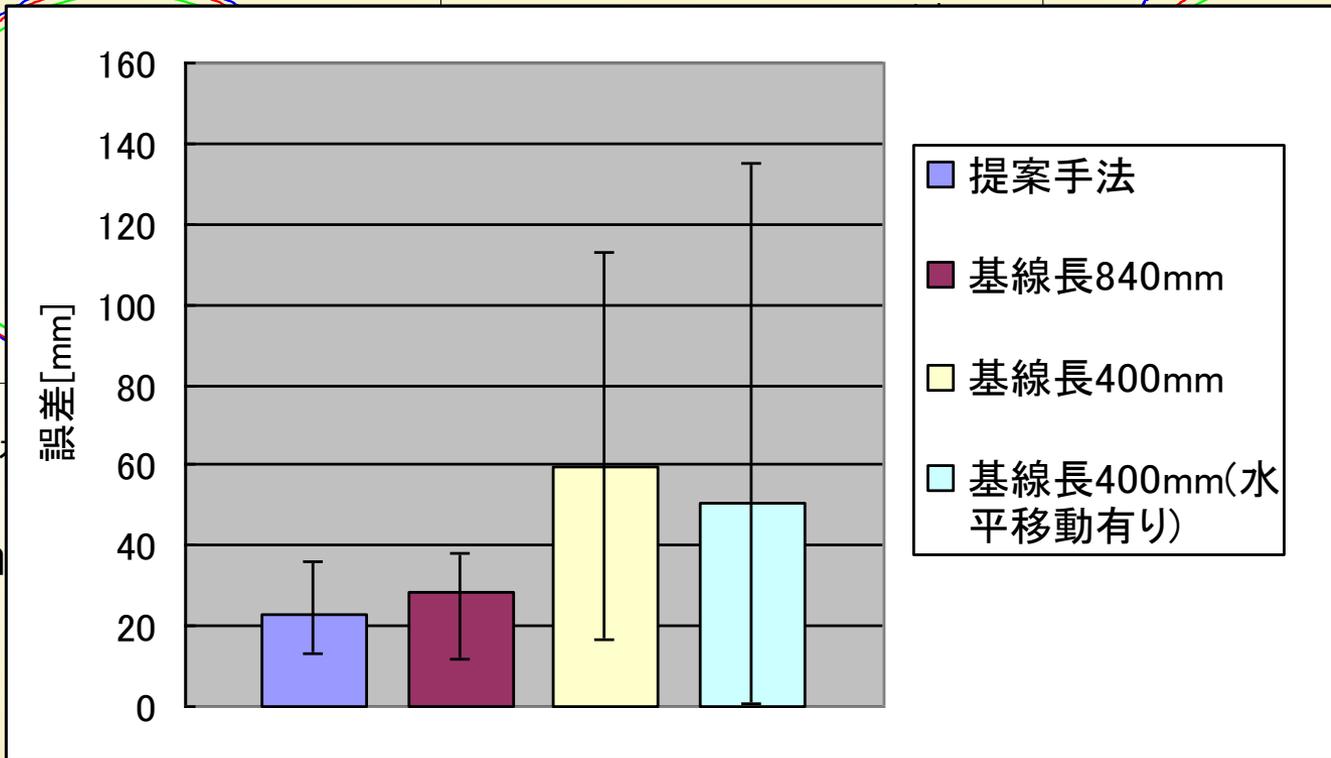
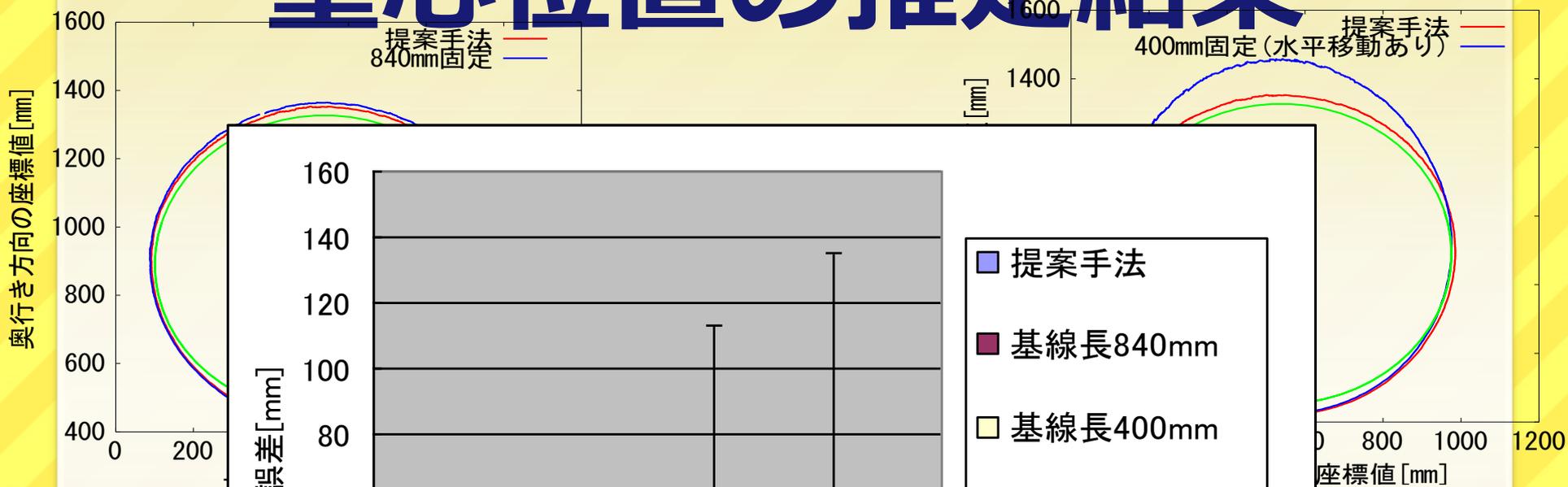
# 基線長400mm水平移動



# 基線長840mm固定

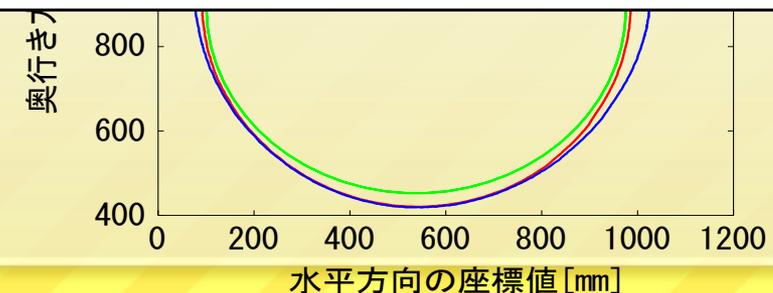


# 重心位置の推定結果



提案手法と  
基線長840mm

提案手法と  
基線長400mm  
(水平移動あり)

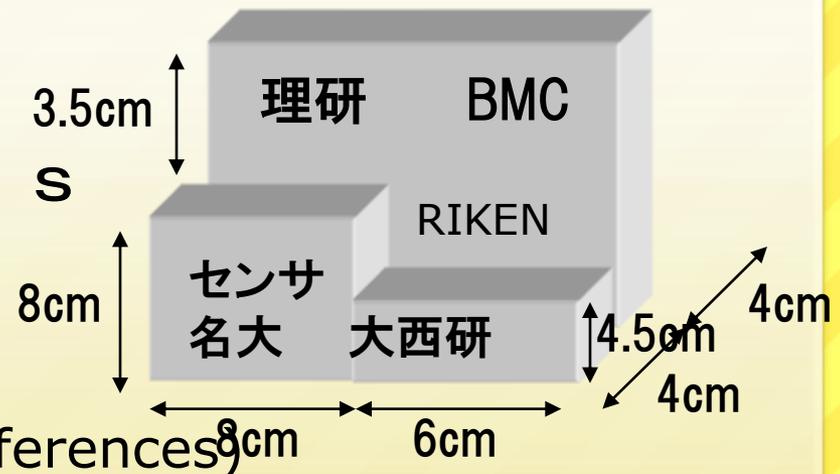


提案手法と  
基線長400mm固定

# 形状復元の実験

固定物体の形状復元実験を行った。

- 対象物体は平面で奥行きに段差のあるものを使用し，表面にテクスチャとして文字を貼った。
- 対象物体の奥行きは700mm，850mm，1200mm。
- エリアベースマッチング
- 探索範囲：10 pixels
- 探索ウィンドウ：5×5
- 評価値：SAD



(Sum of Absolute Differences)

対象物体の寸法

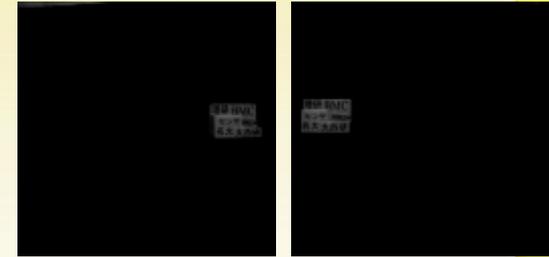
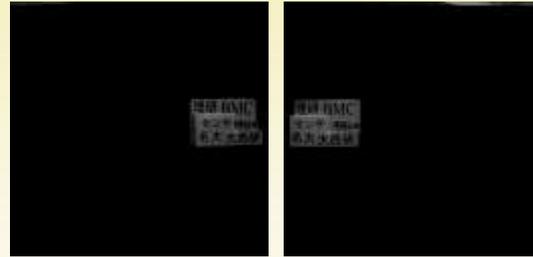
# 形状復元結果

700mm

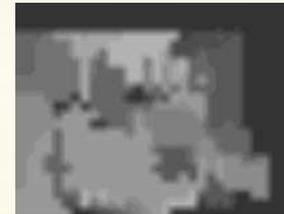
850mm

1200mm

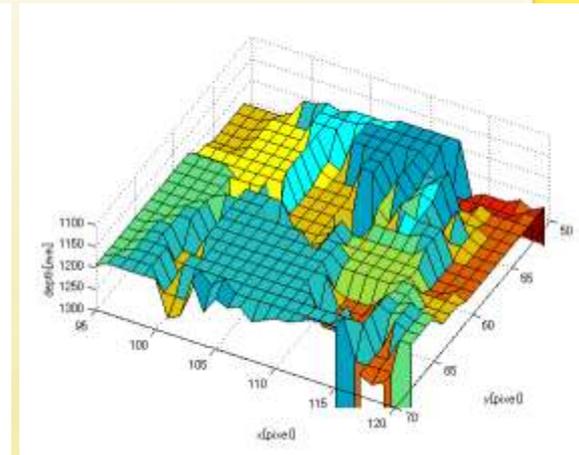
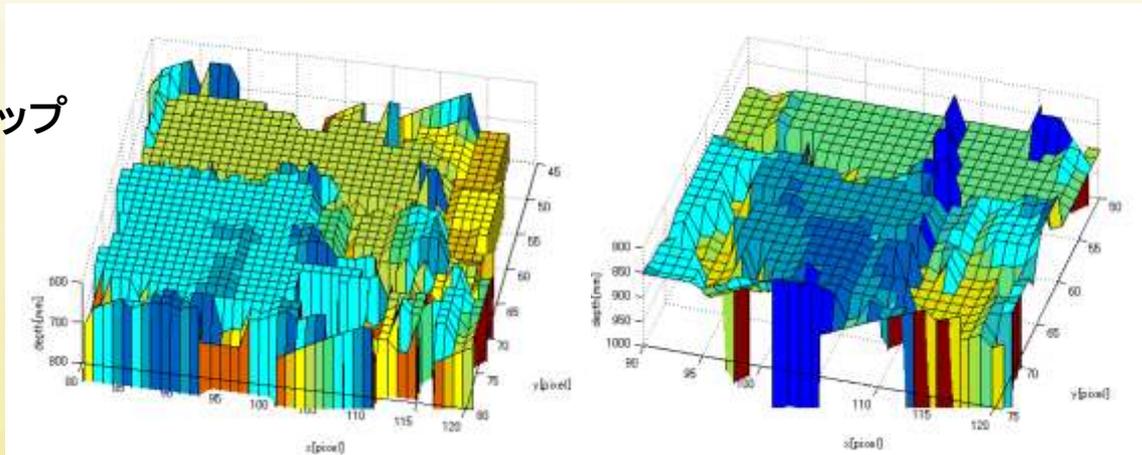
左右  
原画像



視差画像



奥行きマップ

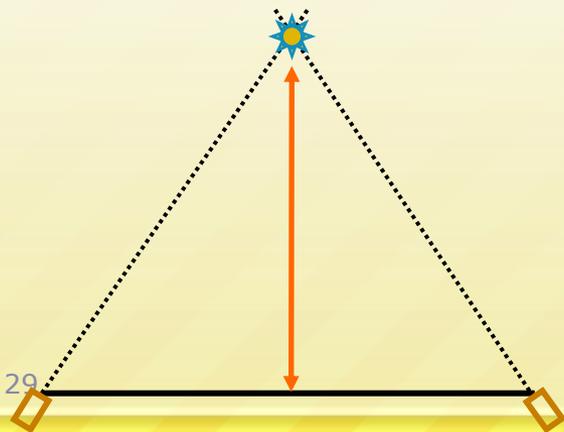


# 移動物体の重心位置推定・形状復元の統合実験

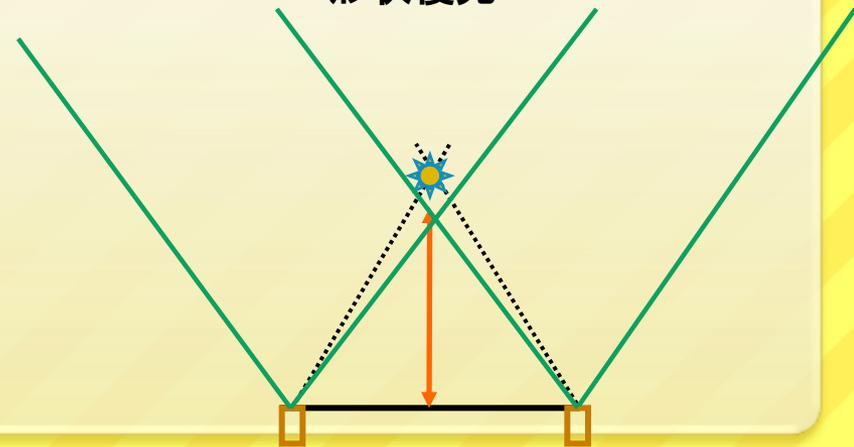
## 形状復元と重心位置推定を統合した実験

- 人形を天井から吊り下げ，振り子運動をさせる。
- 背景に暗幕を置き，高輝度の領域を対象として抽出する。
- 画像上の物体が大きい時，形状復元を行い，小さい時，重心の3次元位置計測をする。

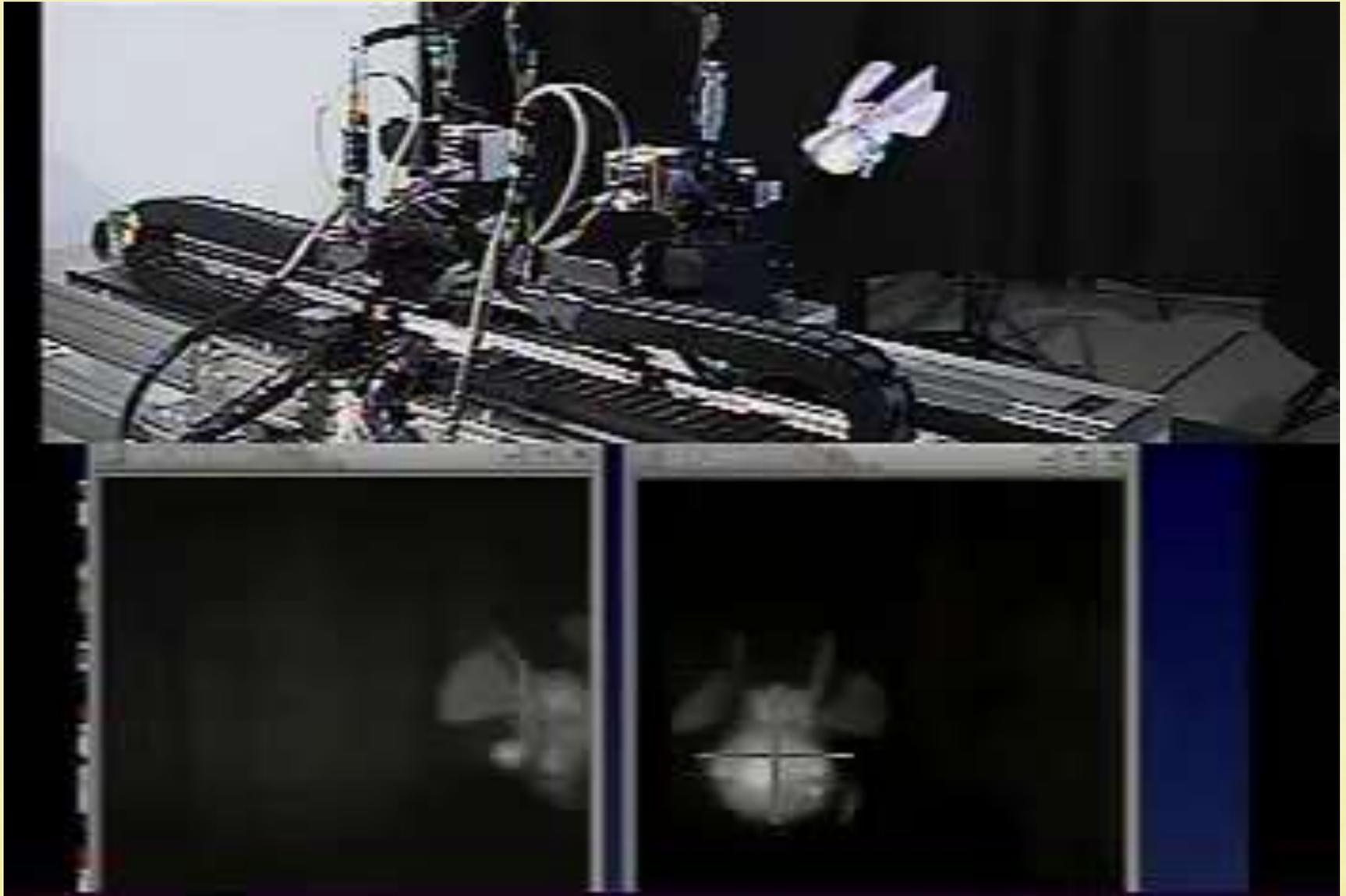
重心位置計算



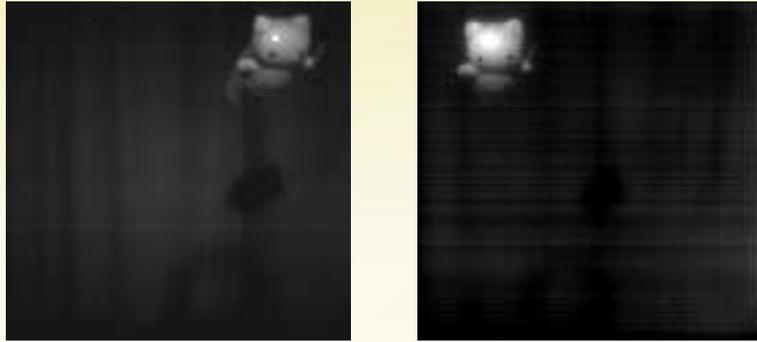
形状復元



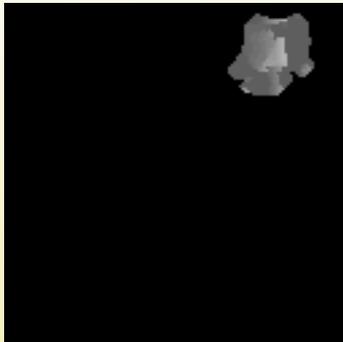
# 人形の追跡と形状復元・重心位置推定



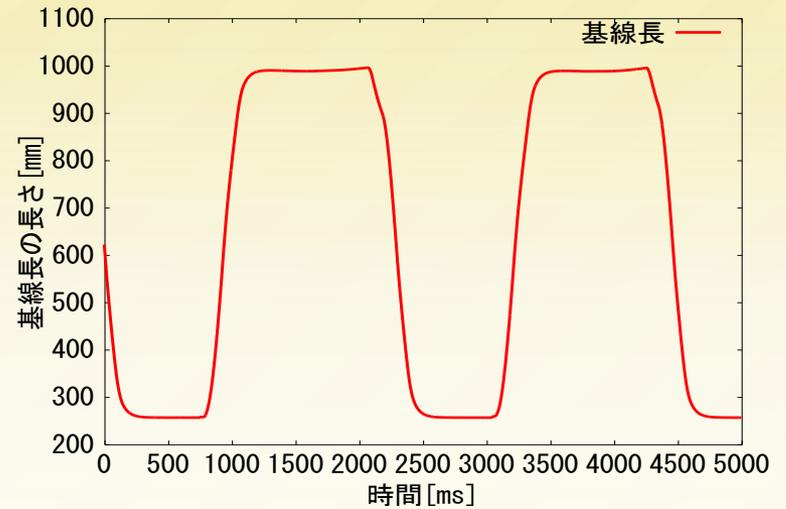
# 形状復元・重心位置推定結果



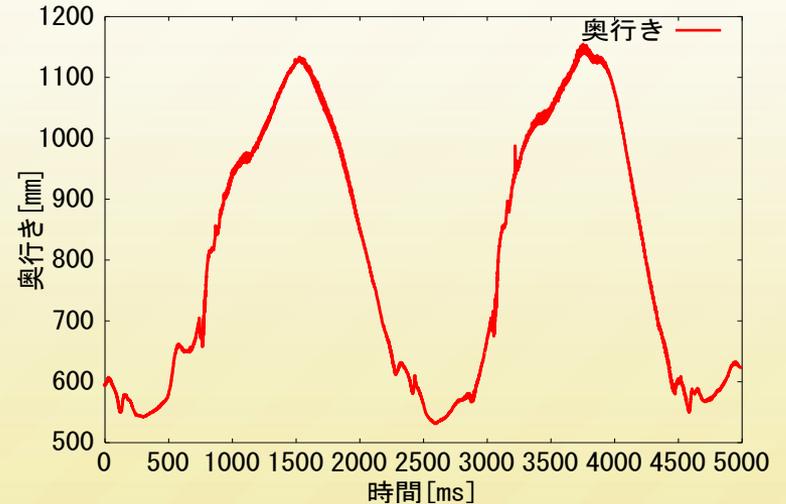
左右原画像



視差画像



基線長の変化



推定した物体重心の奥行き

# 考察

- 可変基線長決定方法の評価
  - 正確に三次元位置の計算
  - 提案手法が最も精度よい
- 超高速ビジョンシステムを用いた物体の形状復元
  - テクスチャがはっきりしている部分は精度よく形状復元が可能
- 形状復元と重心位置推定を切り替えての物体追跡
  - 形状復元の処理は高速に行え，追跡に支障なし
  - リニアスライダの制限から，物体が視野から外れてしまうことがあった。

# まとめ・今後の課題

## まとめ

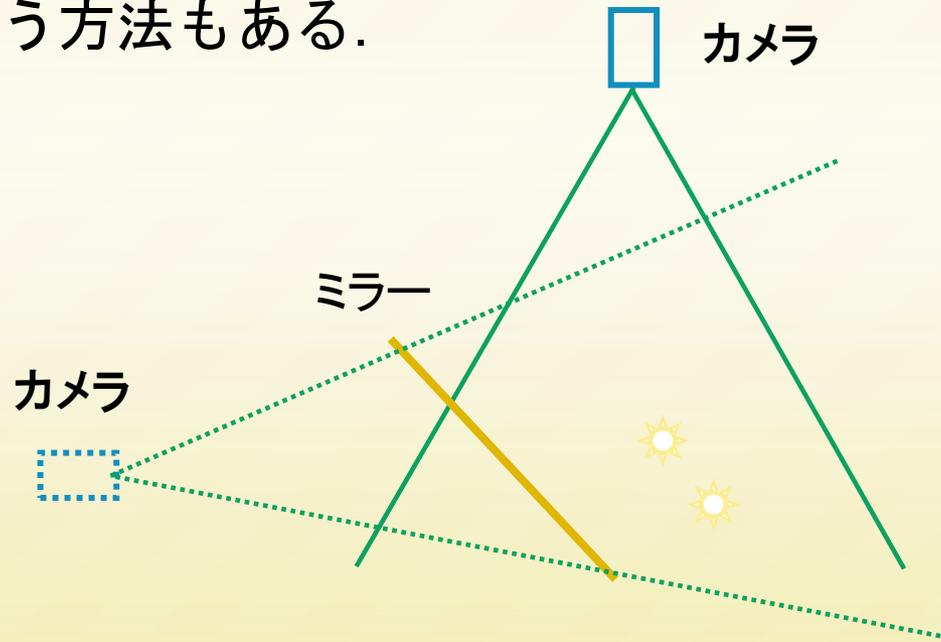
- 追従型ステレオビジョンシステムの提案
- 基線長決定方法の提案
- 本システムを用いた，移動物体の追跡と，形状復元・重心位置推定

## 今後の課題

- カメラを輻輳させてのステレオマッチング
- オクルージョン問題への対応
- より多様な物体への対応

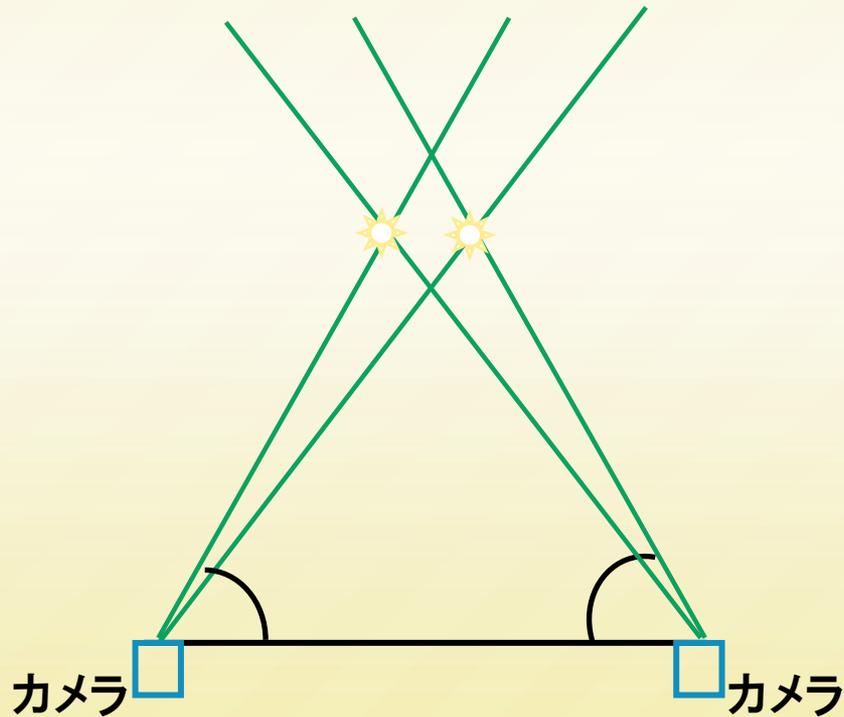
# 核融合炉内のステレオビジョン

- 90度の角度で観測すると精度が良い。
  - 観測箇所が限られているので、難しい
  - なるべく離れたほうがよい。
  - ミラーを使う方法もある。



# ダストの場合

- エピポーラ線上に2点以上存在する



# ステレオカメラヘッド

## 超高速ビジョンシステム

フレームレート1kHz

128 × 128画素

8bits階調

各画素に1対1の演算素子

## 超高速ステレオヘッド

6自由度

回転軸の交点が光学中心に一致

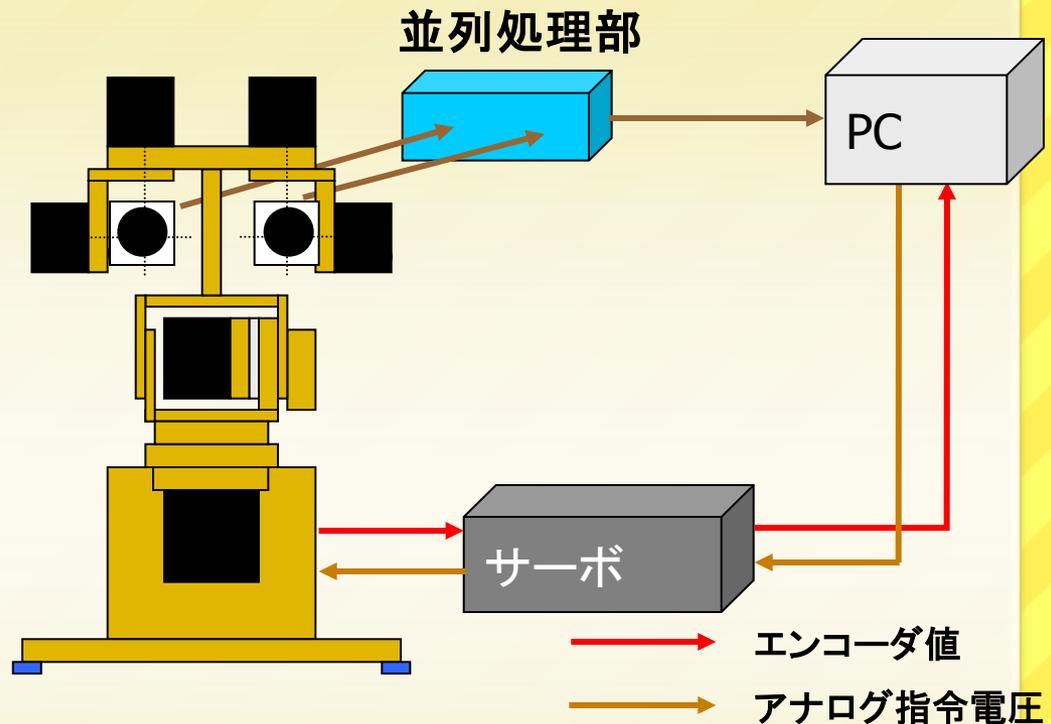


表 超高速ステレオヘッドのモータ仕様

回転軸	範囲(deg)	回転速度(rps)
頭部のパン	180	1
頭部のチルト	60	1
眼のパン	60	50
眼のチルト	60	50

1msの周期で実行

# 制御周期とフレームレートによる追従性の比較実験

## 目的

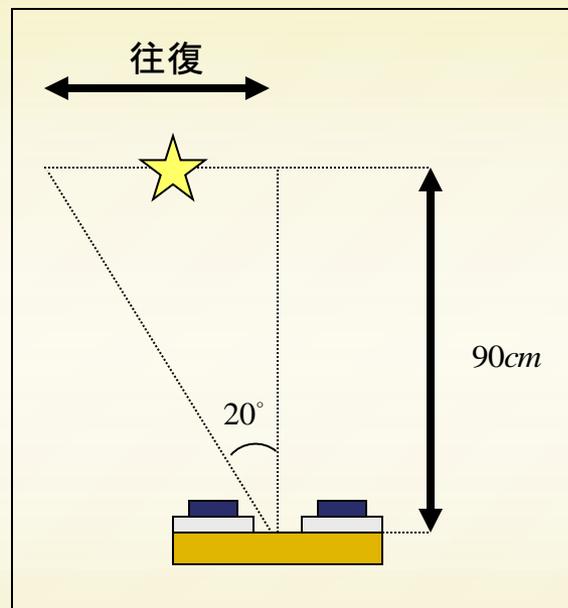
1kHzのフレームレートによる高速な追従を確認する

## 追跡対象

視角20°, 周期1Hzで水平方向に往復運動（奥行き90cm）

## 比較する制御周期とフレームレート

方法	制御周期	フレームレート
方法1	1ms	1kHz
方法2	1ms	30Hz
方法3	33ms	30Hz



## 頭部と眼球の協調方法

対象に**正対**するように制御

### 眼球

画像中央に捉える

$$\Delta\theta_{pan}^{eye} = \tan^{-1}\left(\frac{x}{f}\right) \quad \Delta\theta_{tilt}^{eye} = \tan^{-1}\left(\frac{y}{f}\right)$$

### 頭部

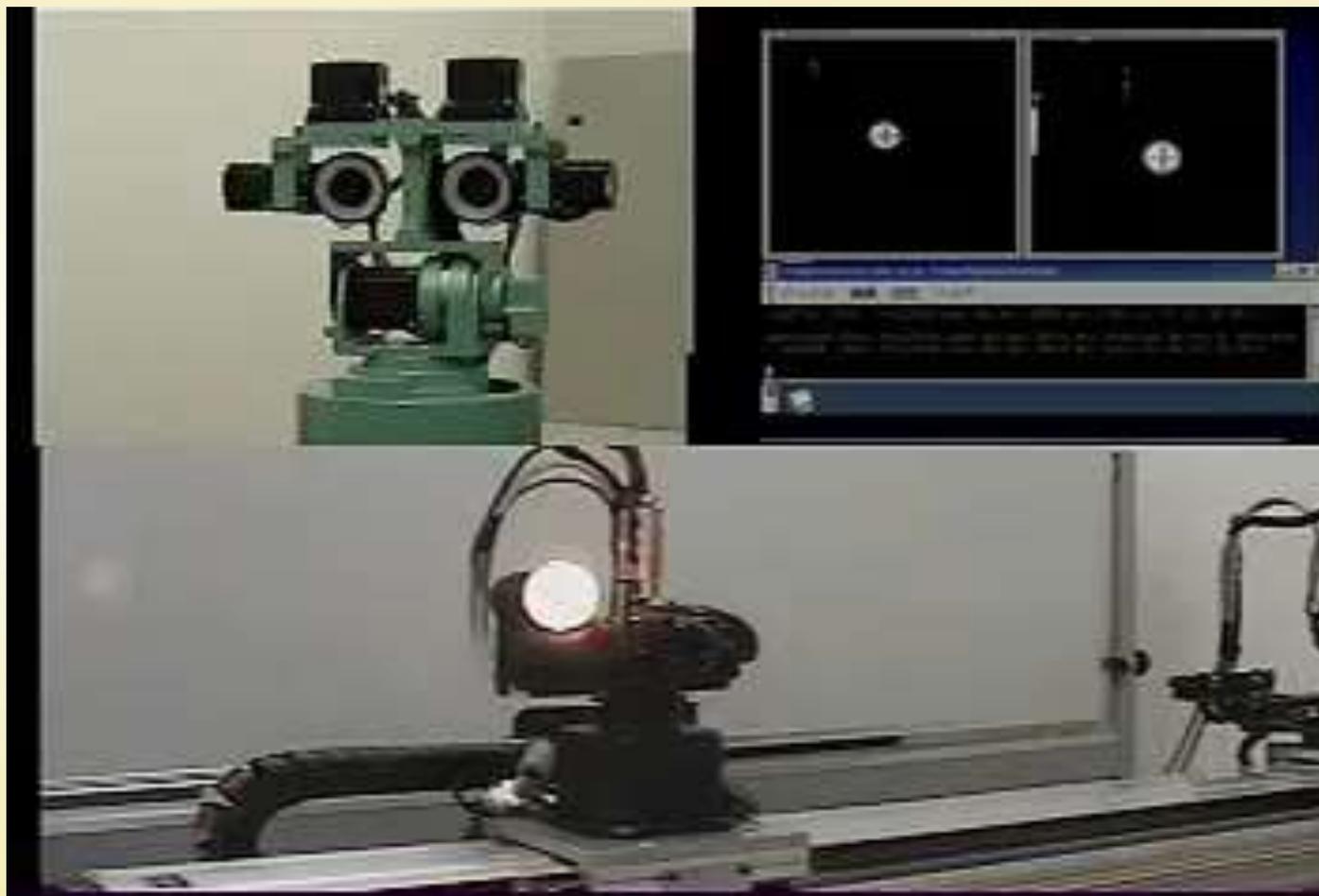
両眼の回転角度  $\theta_l^{eye}$ ,  $\theta_r^{eye}$  の平均

$$\Delta\theta_{pan}^{head} = \frac{\theta_l^{eye} + \theta_r^{eye}}{2}$$

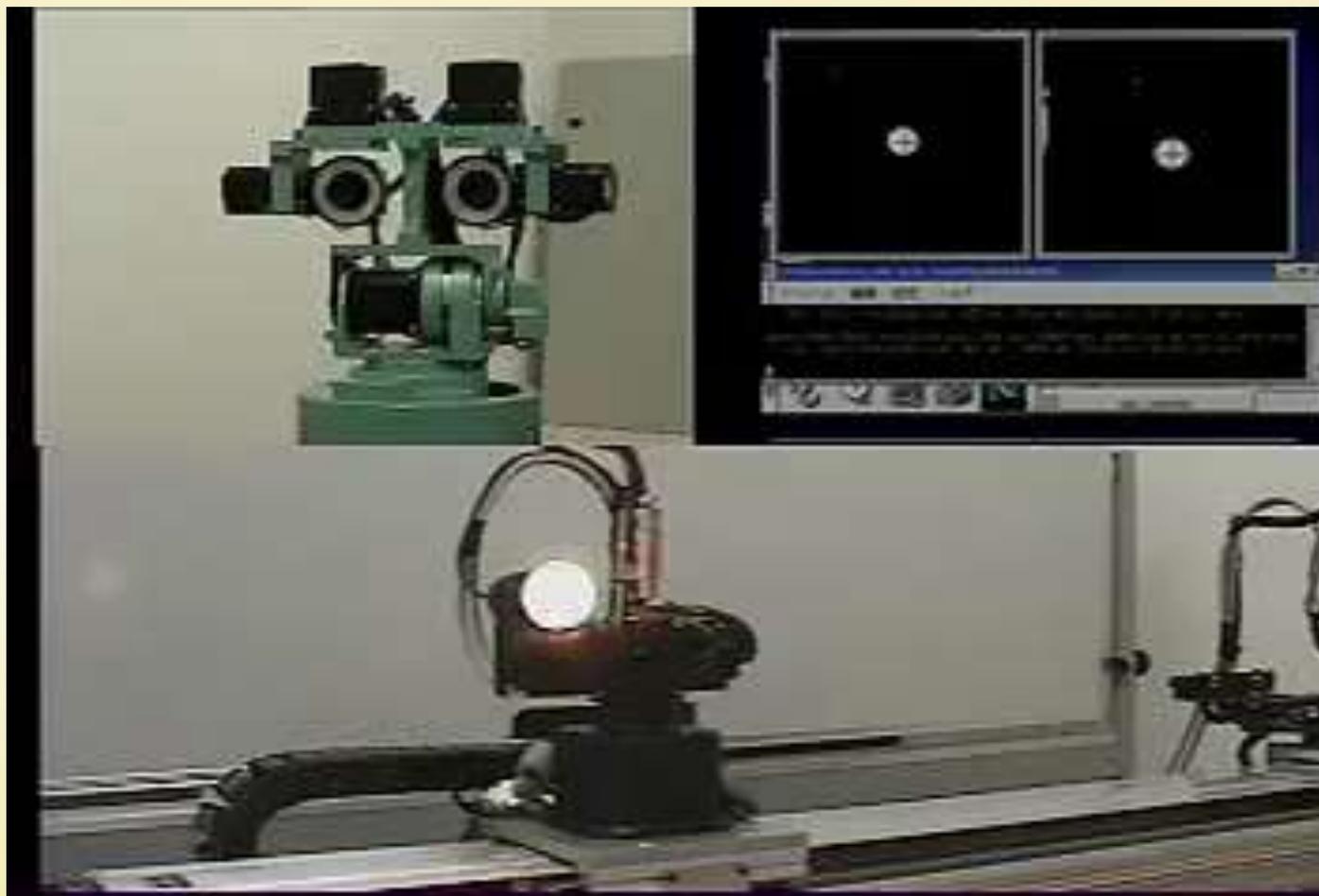
### 実験環境

$f$ : 焦点距離  $x, y$ : 画像中心からのずれ

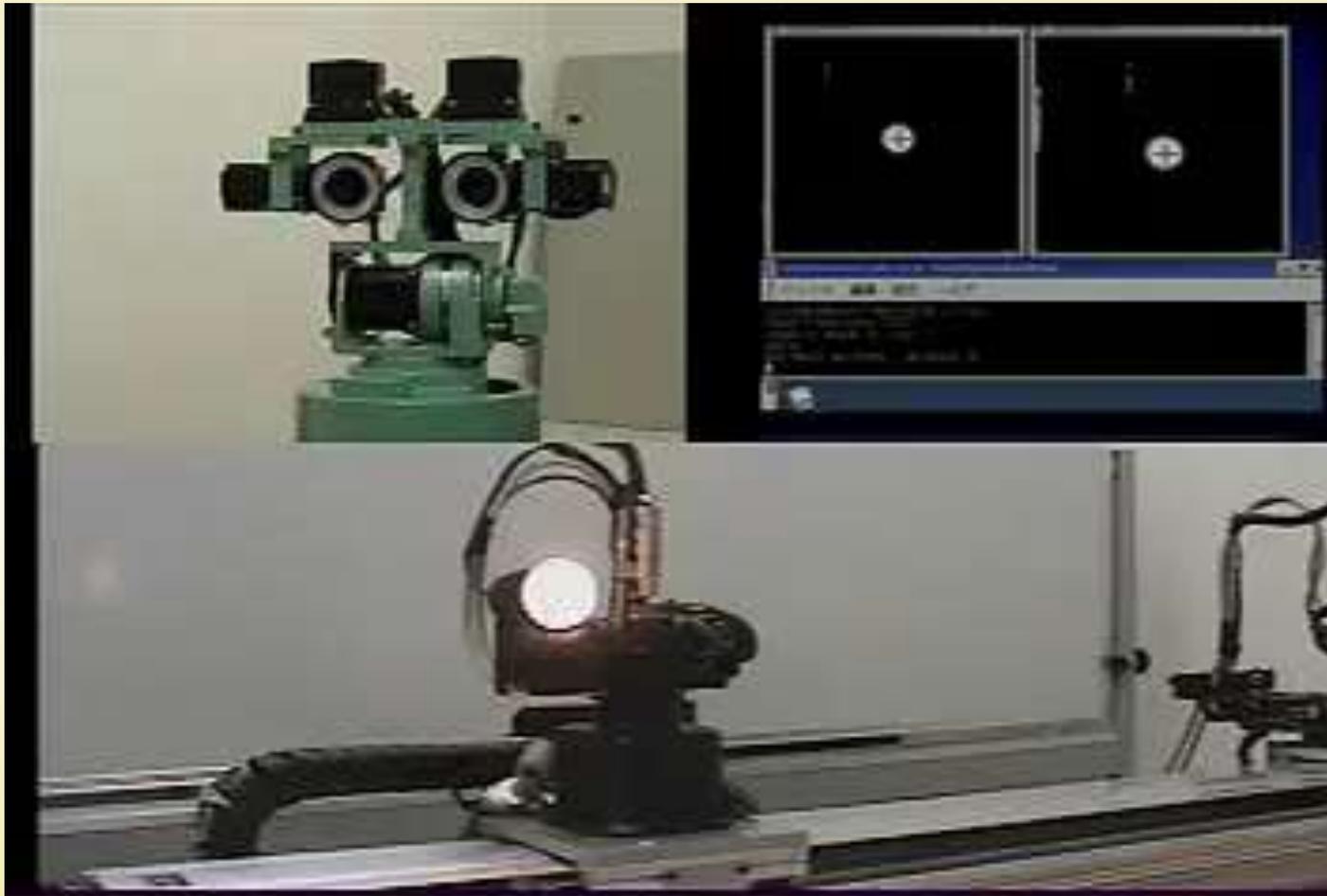
**フレームレート1kHz・制御周期1ms**



**フレームレート30Hz・制御周期1ms**

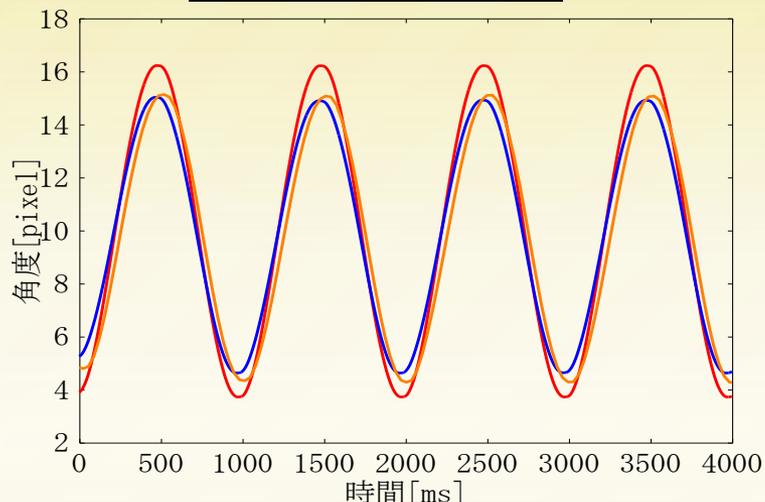


# フレームレート30Hz・制御周期 33ms

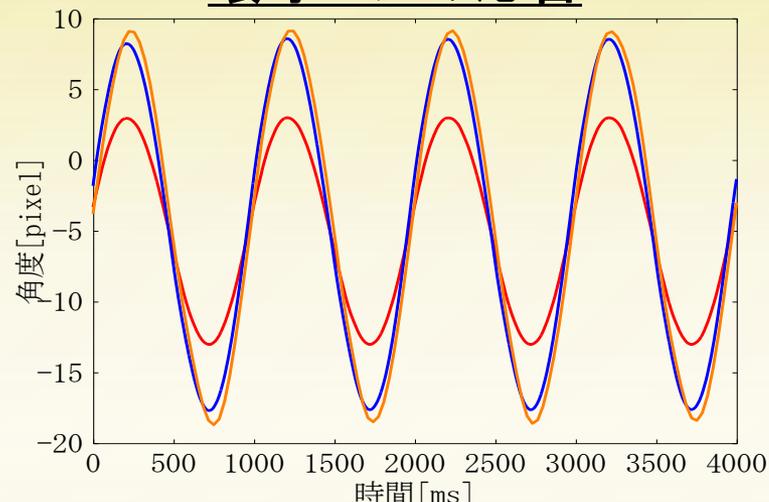


# 実験結果

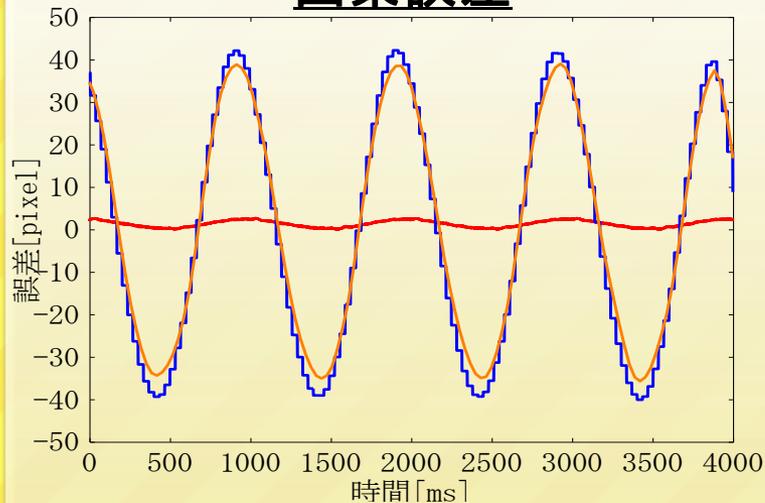
## 頭部パンの応答



## 眼球パンの応答



## 画素誤差



- フレームレート1kHz, 制御周期1ms
- フレームレート30Hz, 制御周期1ms
- フレームレート30Hz, 制御周期33ms

- 画素誤差は最大2pixels
  - 2Hz以上の運動時にはフレームレート30Hzでは追跡できない
- ➡ 1kHzのフレームレートによる高速な追従が確認できた

# 頭部と眼球の効率的な協調方法

## 人間の頭部と眼球の協調方法

### 対象が静止時

頭部と眼球の分担比がシグモイド関数でモデル化できる  
[藤森充,2001]

### 対象が移動時

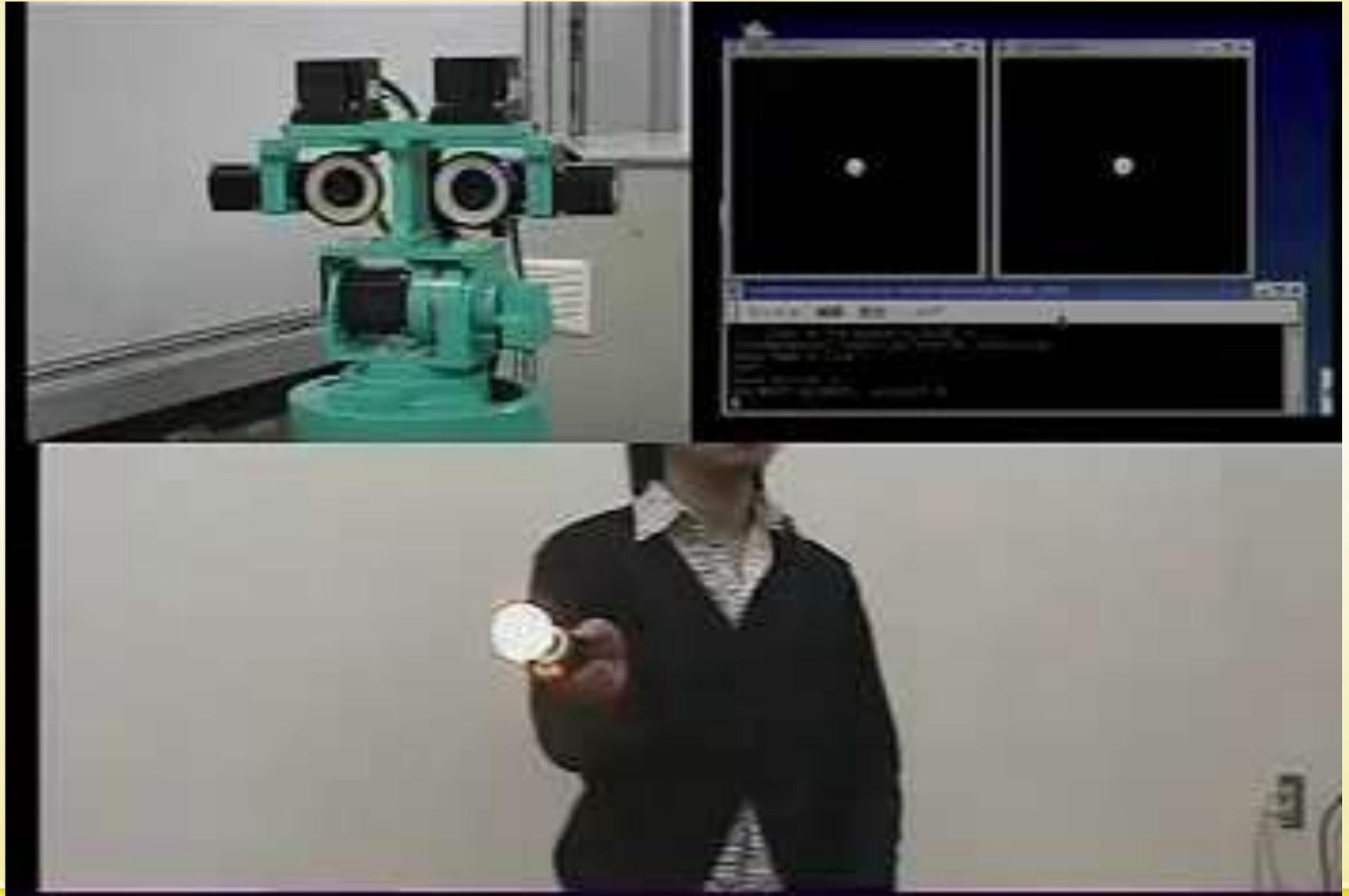
一定視野内や速度の遅い対象の追跡時の頭部運動は生じない  
[Ken HORII,1982]

- 眼球だけで追跡できる場合、頭部運動は不要
- 高速に移動したり、眼球だけでは追跡できない場合、頭部と眼球の協調制御が必要

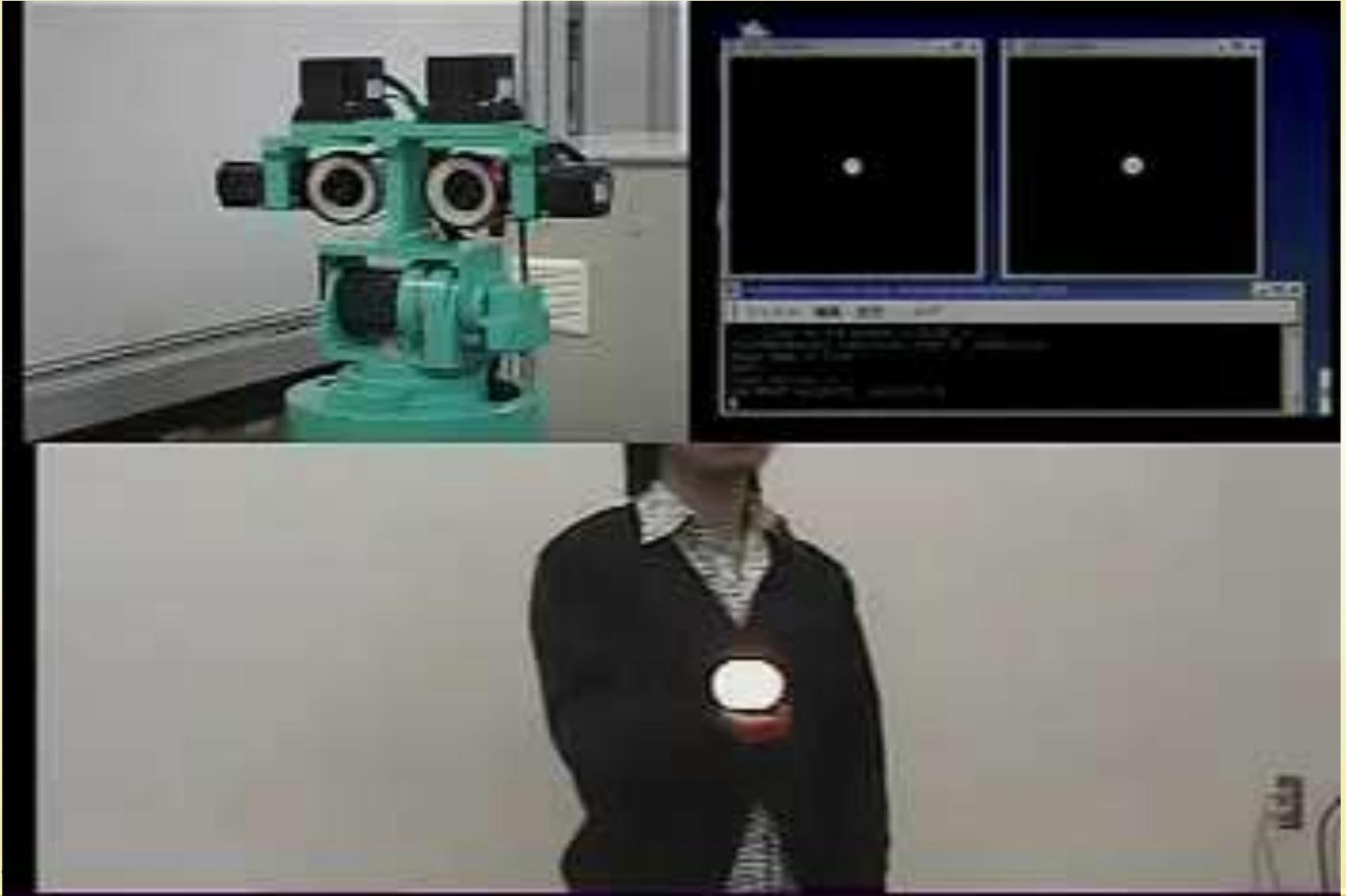


**対象の運動に基づいた頭部眼球運動を提案**

# 不規則な運動の従来手法による追跡



# 不規則な運動の提案手法による追跡



# まとめ

- 1kHzのフレームレートを持つ超高速ステレオヘッドを開発
- 追跡対象の運動に基づいた協調方法を提案
- 従来手法と比較実験
  - 運動に応じた頭部運動の実現
  - 消費エネルギーが減少
  - 人間の運動程度の対象は追跡可能

# 今後の課題

- 画像処理部分の拡張
  - 実環境での追跡実験
  - オクルージョンへの対応
  - 追跡可能な対象の運動の検証
- 他の協調方法と組み合わせ、新しい協調制御の考案