

飛行船ロボットを用いた 自動情報収集・提示システム

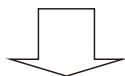
神戸大学大学院
工学研究科 機械工学専攻
深尾 隆則

レスキュー支援無人航空機



災害後の情報収集システム

迅速かつ安全に
被災地の情報収集



上空からの情報収集が有効

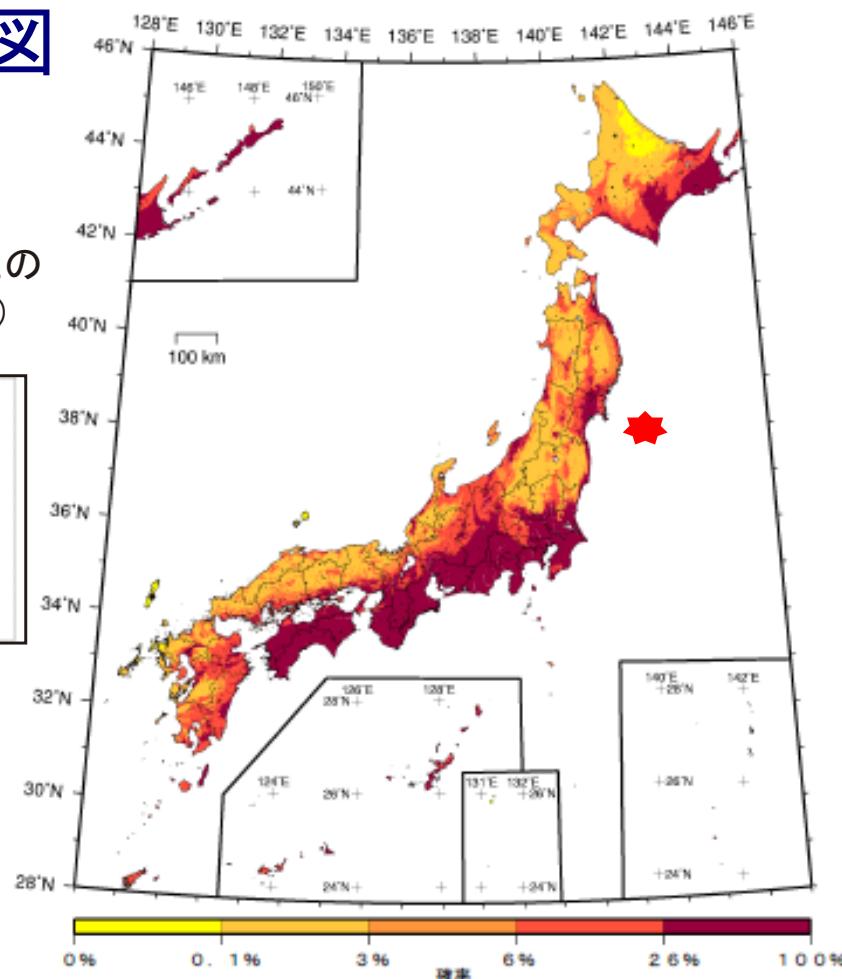
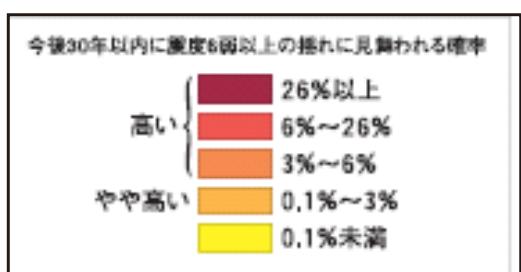


被災地上空を自動巡回し、情報収集する
自律型の飛行船ロボットを用いるシステム



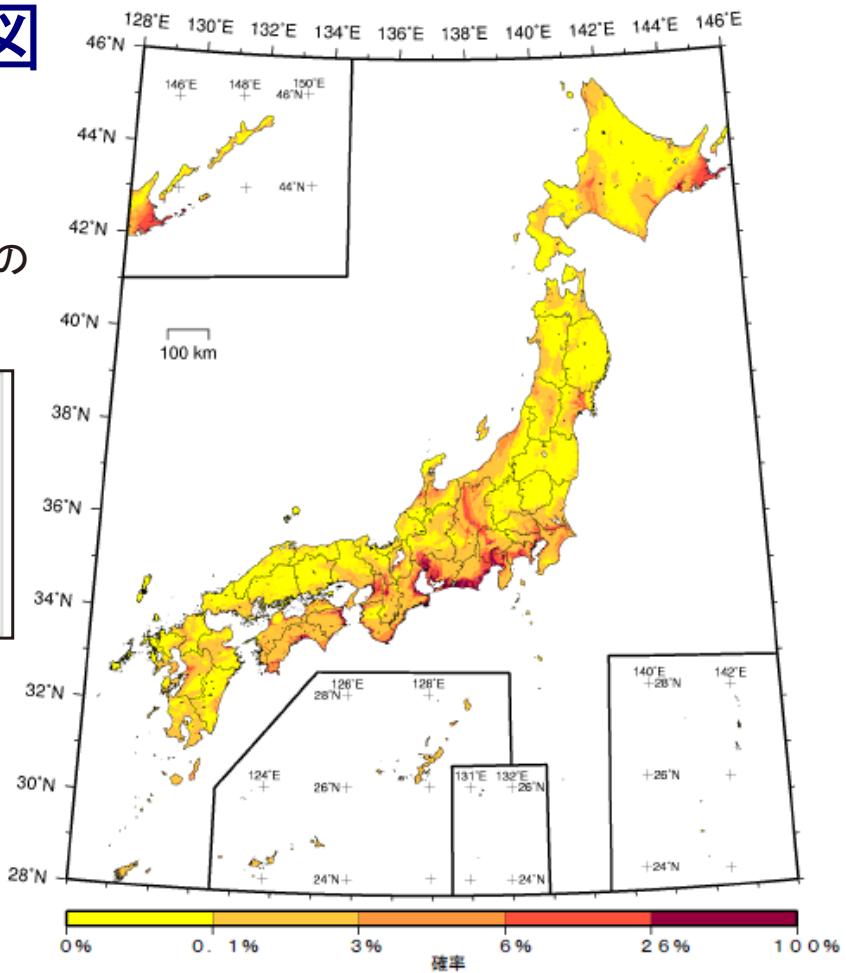
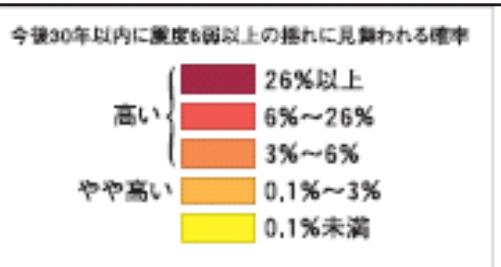
地震動予測地図

今後30年以内に震度6弱以上の
揺れに見舞われる確率(2010)



地震動予測地図

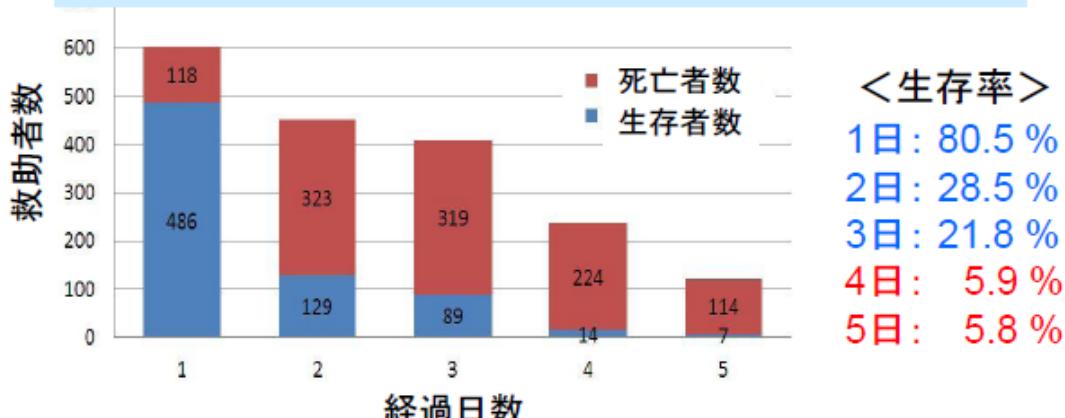
今後30年以内に震度6強以上の揺れに見舞われる確率(2010)



上空からの情報収集の必要性

- レスキュー活動
 - 72時間が被災者にとって重要な時間

阪神淡路大震災における救助者数(神戸市消防救助隊)



上空からの情報収集

- ・レスキュー活動
 - 72 時間 が被災者にとって重要な時間
 - 大都市における倒壊建築物、山間部などにおける倒木、地すべりは 生存者の搜索活動 に対し障害
 - 地上走行車両は任務の遂行が困難な場合多く、自律ヘリコプタや飛行機は、多数の生存者にとり危険、かつ長時間運用には不向き
 - 被災状況に関する情報の 統合と提示 が、救援活動前の迅速な計画立案などに対して必要



10

なぜ飛行船か？

- ・低速低空飛行が可能
- ・燃料効率が良く、
長時間飛行が可能
- ・滑走路が不要であり、
運用容易
- ・低騒音
- ・コスト（対有人ヘリ）

安全かつ迅速に
詳細な被害状況確認や
レスキュー活動支援が可能



私の飛行船

0.5m

2001
@CMU



5m

2006~7



1.5m

2003



3.5m

2002
@CMU



12m

2005~



13

屋外型飛行船の利用



成層圏プラットフォーム
日本, 欧州, 米国, 韓国, 中国

飛行船の制御

飛行船の特徴

- ・横方向へ直接的な力を持たない**劣駆動**システム
- ・コリオリ力などの非線形項をもつ**非線形**システム
- ・風による**影響**を非常に受けやすい

制御は困難



風の影響を考慮したロバストな制御システム構築が重要

風外乱下における飛行船の飛行制御系設計法



17

劣駆動システム

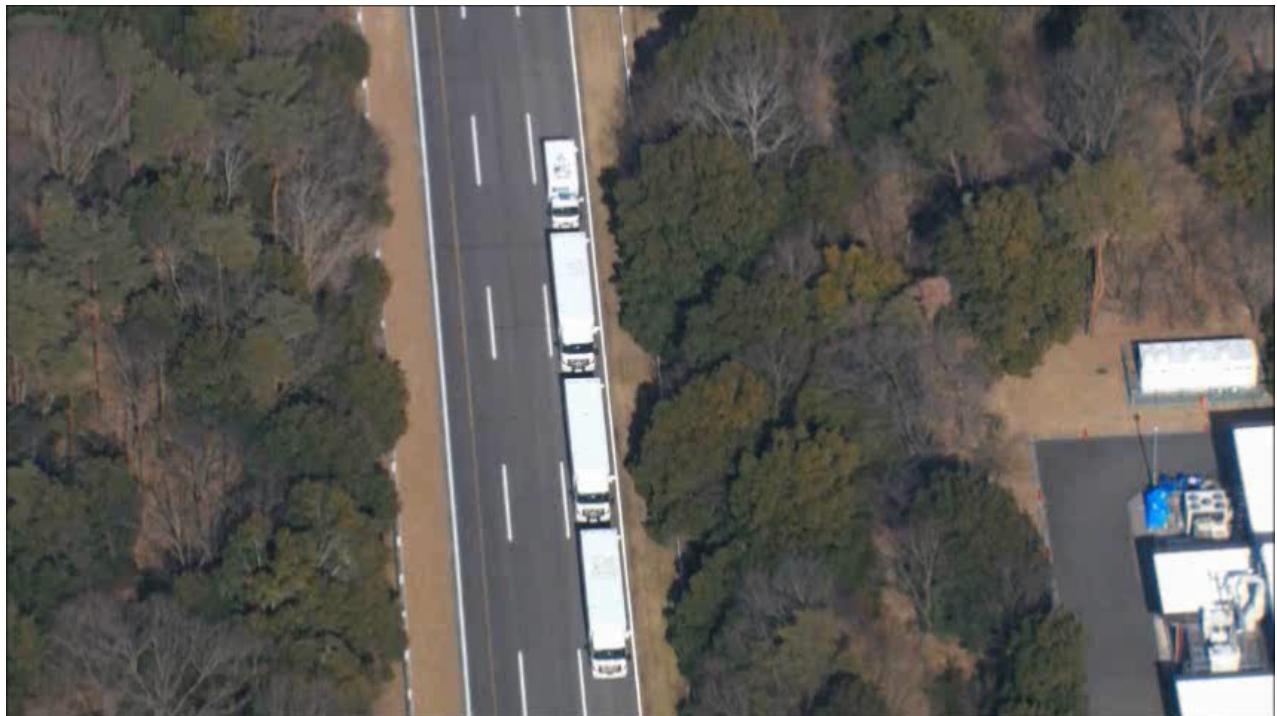
- ・屋外型飛行船:
横方向への移動
→ 空気抵抗を考えると損失が大きい



劣駆動システム I



劣駆動システム II

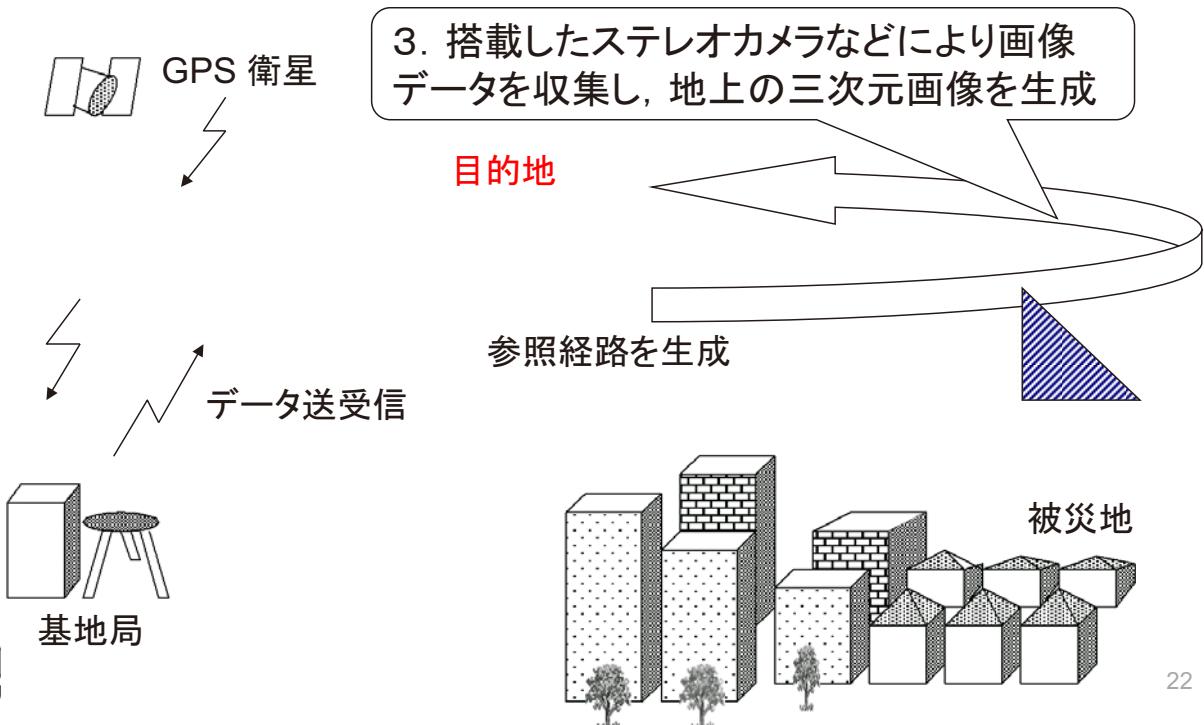


劣駆動システムⅢ



情報収集システムの概要

1. GPSの情報を基に目的地まで自律移動
2. 地上の三次元画像を取得するための参照経路を生成

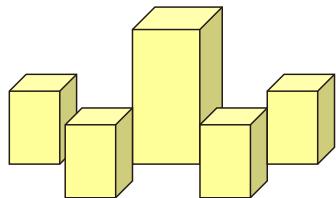
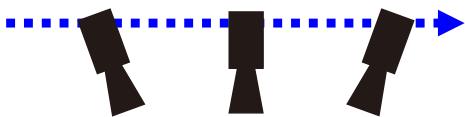


情報収集・提示



低空(20~30m)から
詳細な情報収集

- ・回転型ステレオカメラ
- ・3次元レーザスキャナ



[google earth]



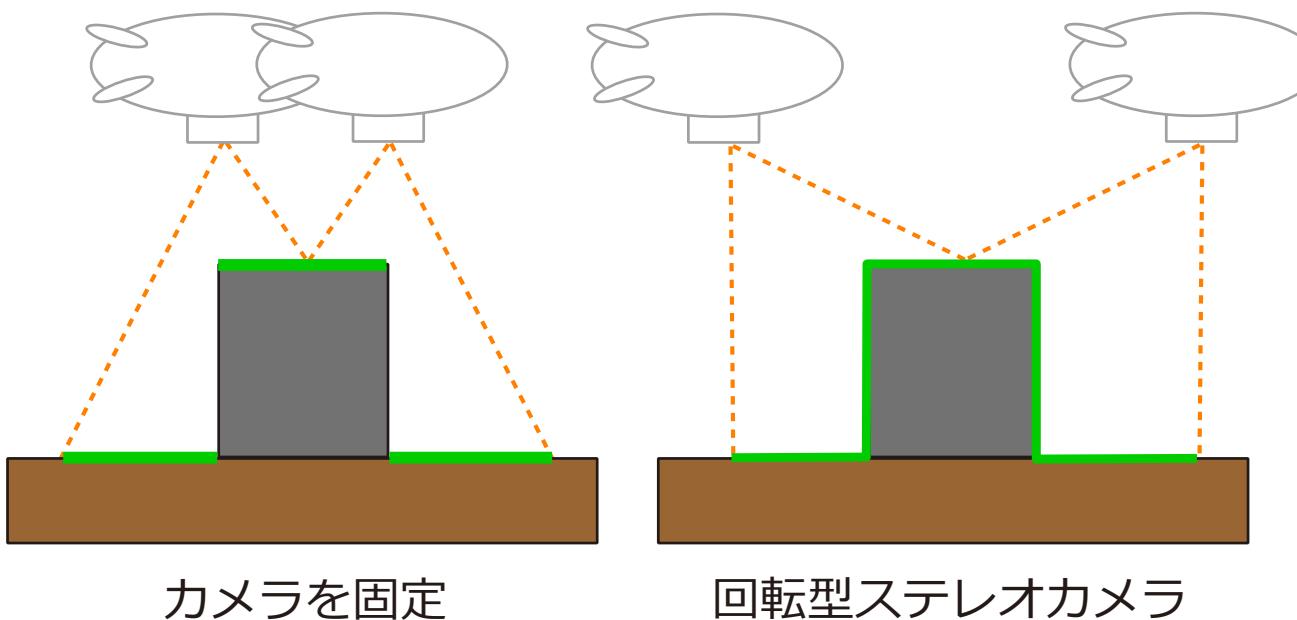
回転型ステレオカメラ



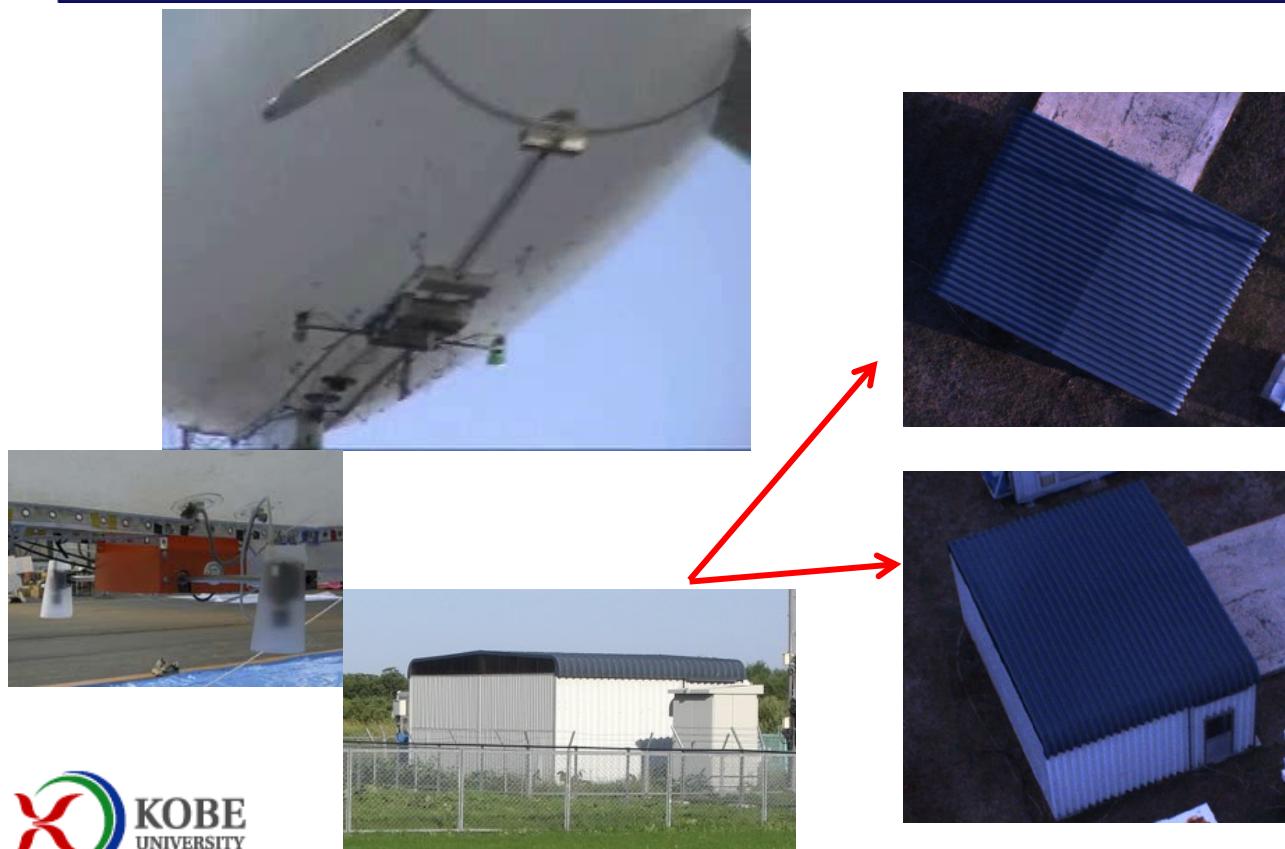
軸両端のステレオカメラを前後60°に回転

ベースライン 1m

上空からの撮影

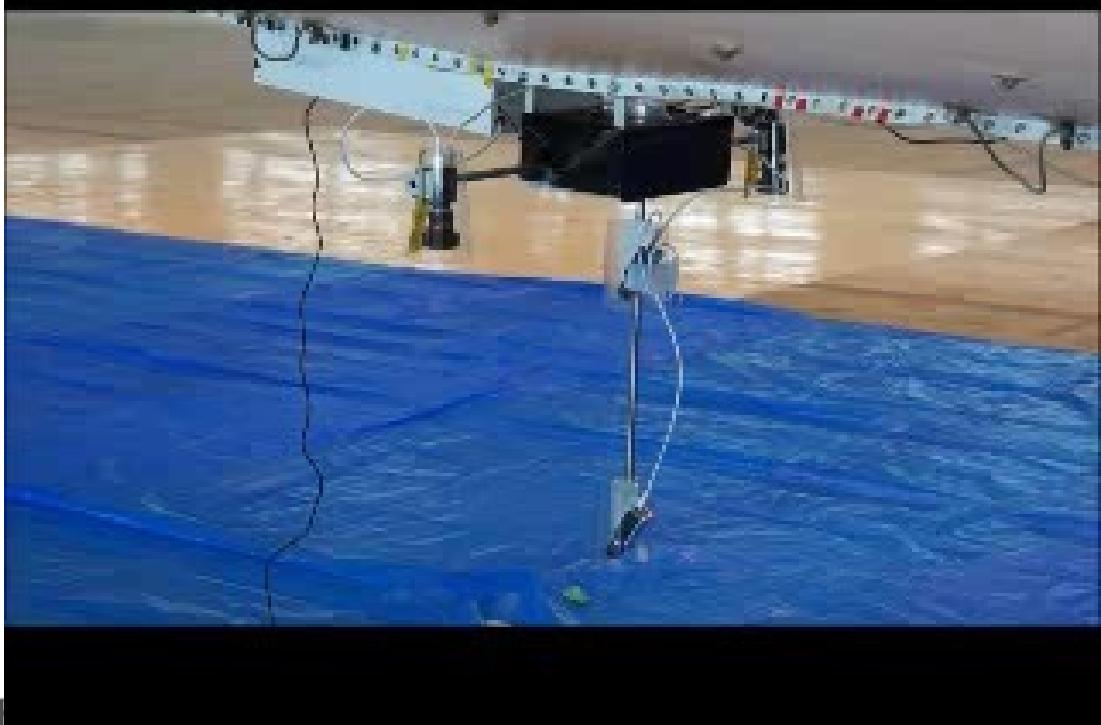


回転型ステレオカメラ



新回転型ステレオカメラ

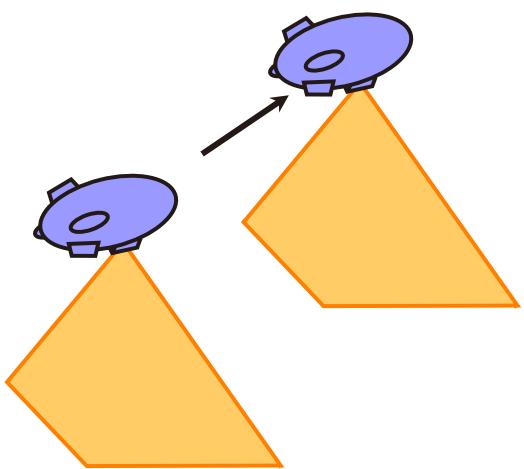
回転型ステレオカメラ



ステレオカメラシステム

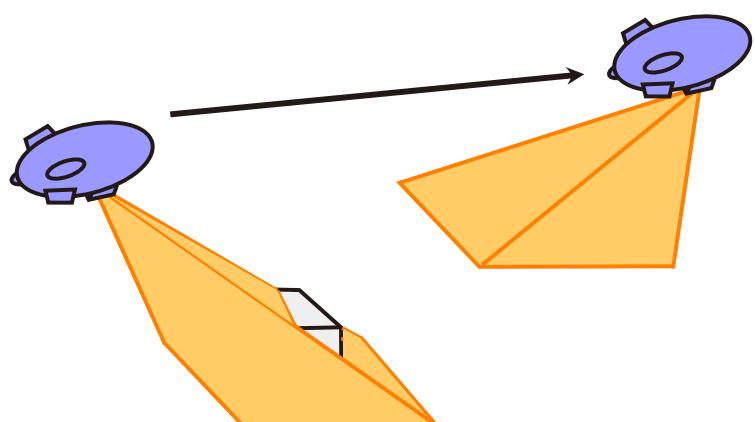
- 水平ステレオと垂直ステレオの高解像度で撮影できる領域

水平ステレオ



屋根や地面

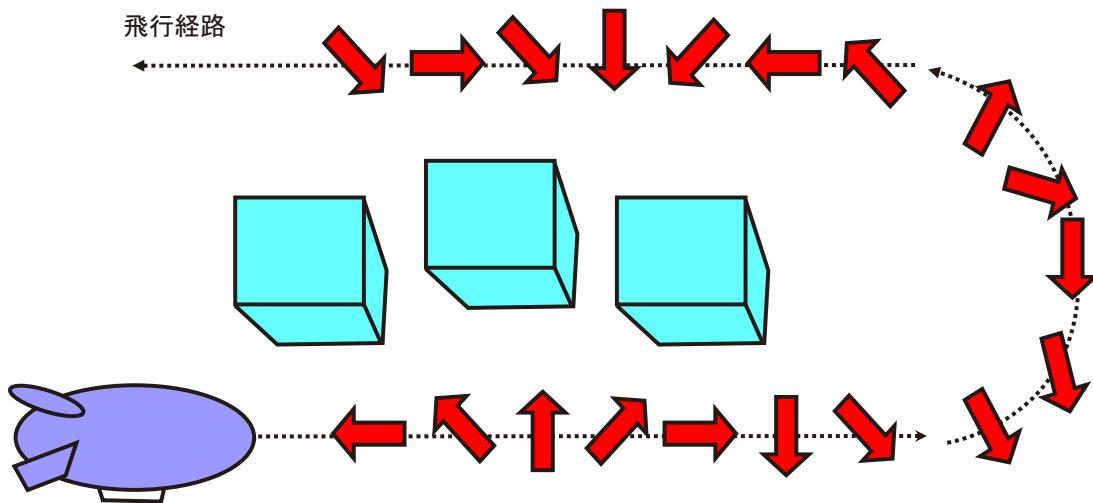
垂直ステレオ



壁面など高さのある物

ステレオカメラシステム

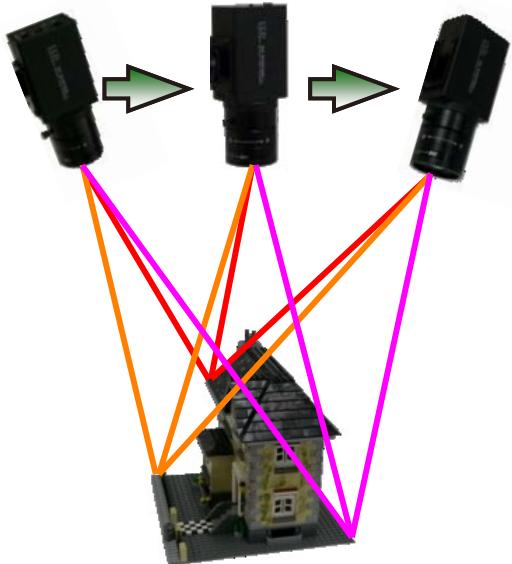
- ・飛行船の動きとは独立して回転させる
- ・一度の飛行で対象を様々な角度から撮影できる



三次元モデル生成の流れ

- 回転型ステレオカメラによるステレオ画像の撮影
- 各ステレオ画像間の撮影位置推定
- 1対のステレオ画像の対応点探索
- 三次元点の導出

撮影位置推定

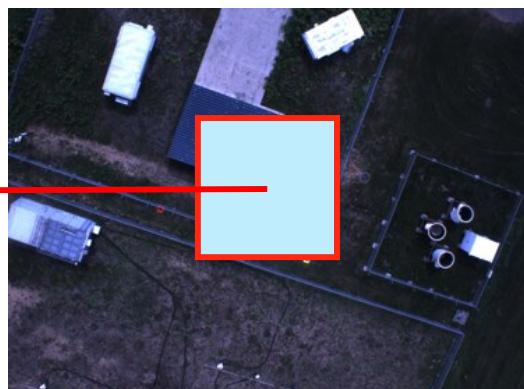


- **Structure from Motion**
画像間の特徴点を追跡し、
特徴点の三次元位置および
カメラの位置・姿勢を推定
- **Bundle Adjustment**
- 特徴点の三次元位置を各カメラ
画像に再投影し、その誤差が最
小となるように位置・姿勢を補正

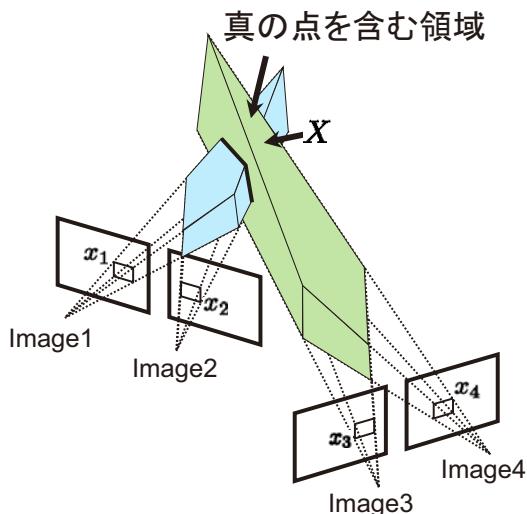


ステレオ画像の対応点探索

- 高所から撮影した1対のステレオ画像は見えの変化が少なく、
オクルージョンの影響も小さい
- 一般的なステレオマッチング手法である正規化相互関関数
(NCC)により対応点探索を行う



三次元点の導出



- 精度を高めるためステレオ画像間で対応づけられた点から線形最小二乗法を用いて三次元点を求める

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \times M_1 \\ \mathbf{x}_2 \times M_2 \\ \mathbf{x}_3 \times M_3 \\ \mathbf{x}_4 \times M_4 \end{pmatrix} \mathbf{X} = 0$$

- ピクセルの大きさに由来する三次元点の不確かさの共通部分の内部に求め、点が入っているかを確認する

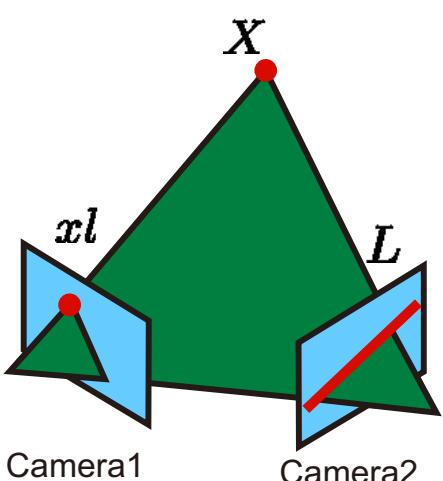
ステレオ画像間の対応点探索が不可欠



画像間の対応点探索

・エピポーラ拘束

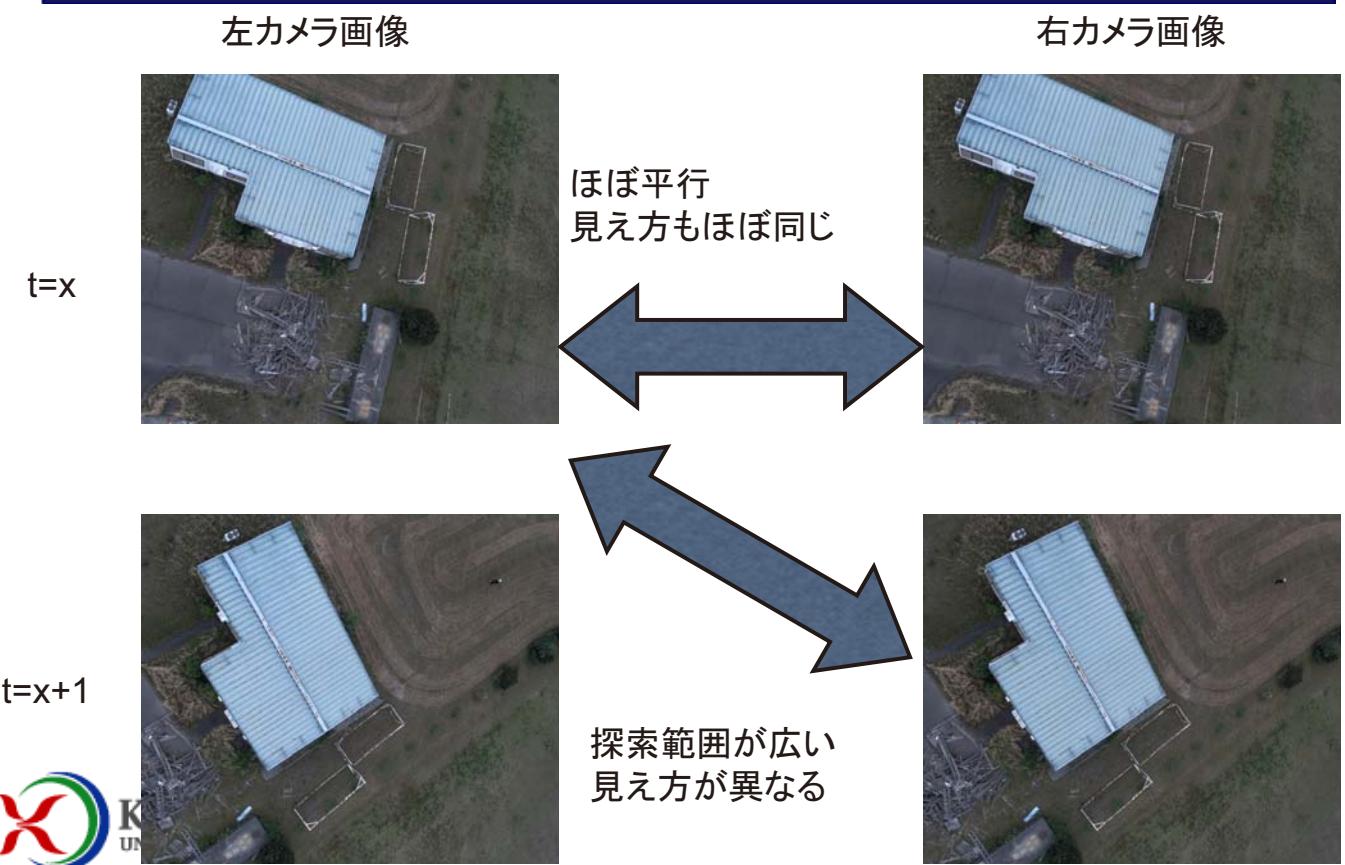
- 三次元点 X がカメラ1に点 x_l として映っているとき、カメラ2におけるカメラ1の点 x_l に対応する点は直線 L (エピポーラ線)上にある



対応点探索の候補の限定に広く利用



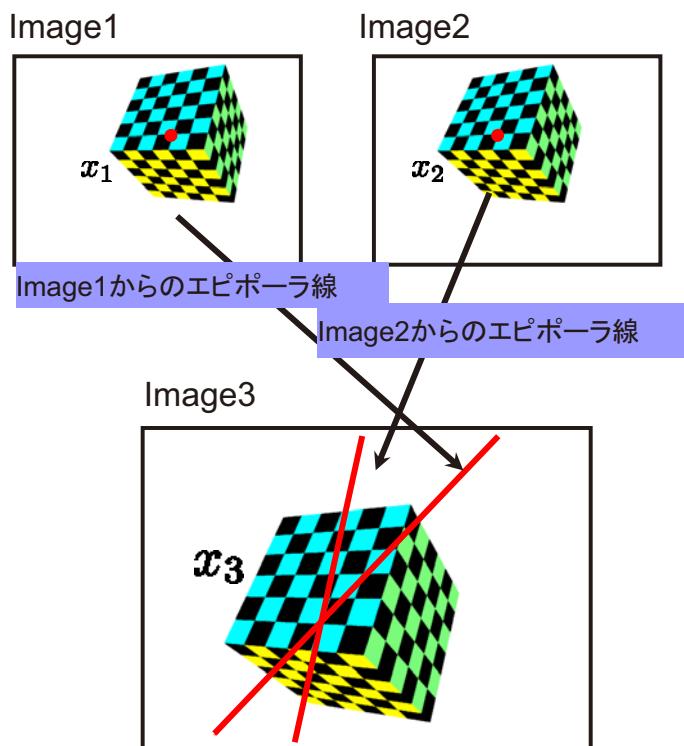
ステレオ画像間の対応点探索



水平ステレオ画像間の対応点探索



水平ステレオ画像間の対応点探索

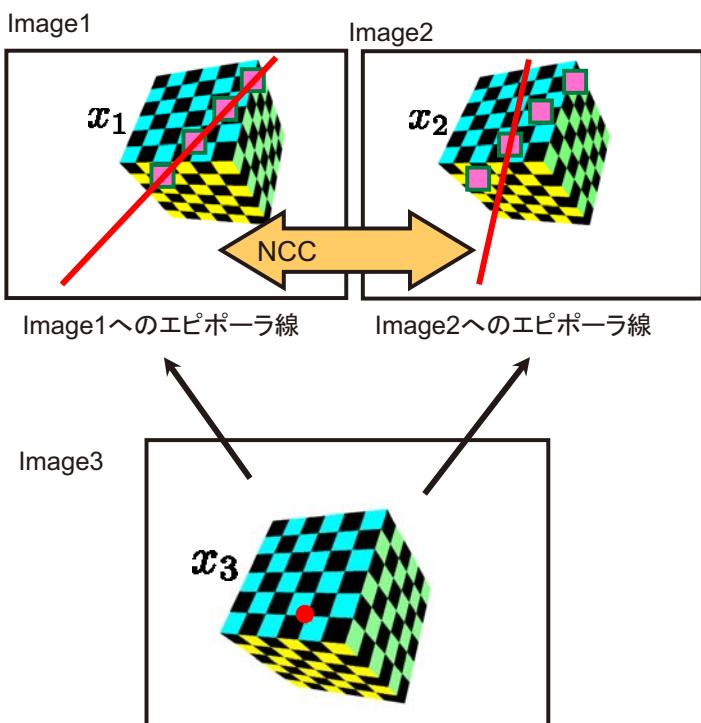


- Epipolar transfer

- Image1とImage2の点が対応付けがされている時、これらの点のImage3における対応点はエピポーラ線の交点になる



水平・垂直ステレオ画像間の対応点探索



- Epipolar transferを利用した対応点探索
- NCCによりImage1とImage2では対応点は既知
- Image3からImage1とImage2へエピポーラ線を引くとき、Image1、2の対応点でかつエピポーラ線上の点である点はImage3との対応点となる



屋外実験

- 鹿児島県鹿児島市七ツ島 IHI場外離着陸場内



屋外実験



- 施設内にある建物上空を飛行
- 上空から地上を撮影、三次元モデルを構築する



使用画像

垂直ステレオ

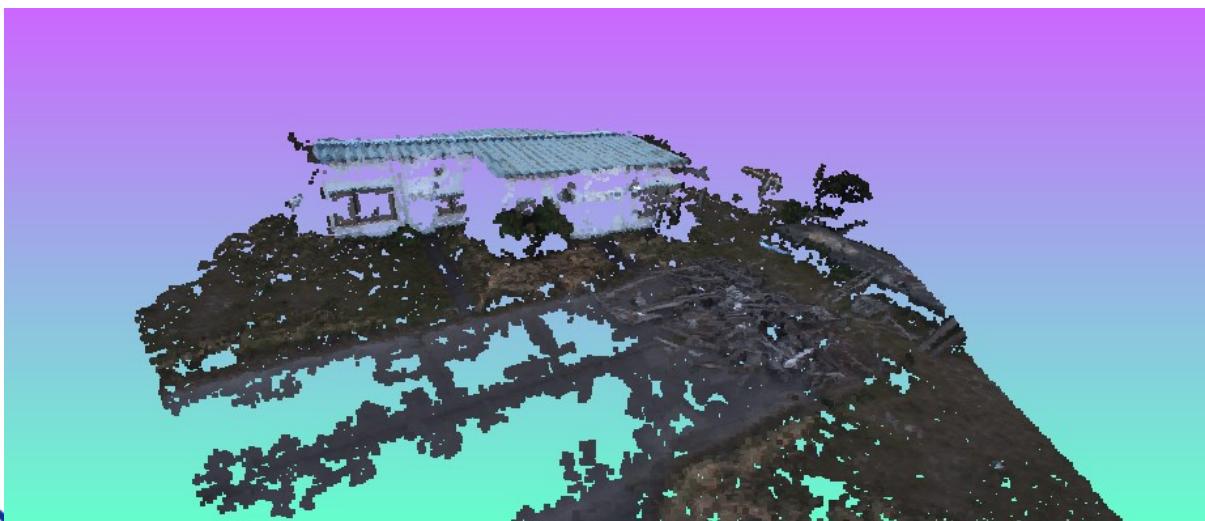


水平ステレオ



実験結果(PMVS)

- 使用画像全てに含まれ、特徴点となる部分が多い屋根や地面の瓦礫等はよく再構成されている
- 各画像からは見える範囲が狭い壁面は窓枠などのコーナー部分のみに留まっている

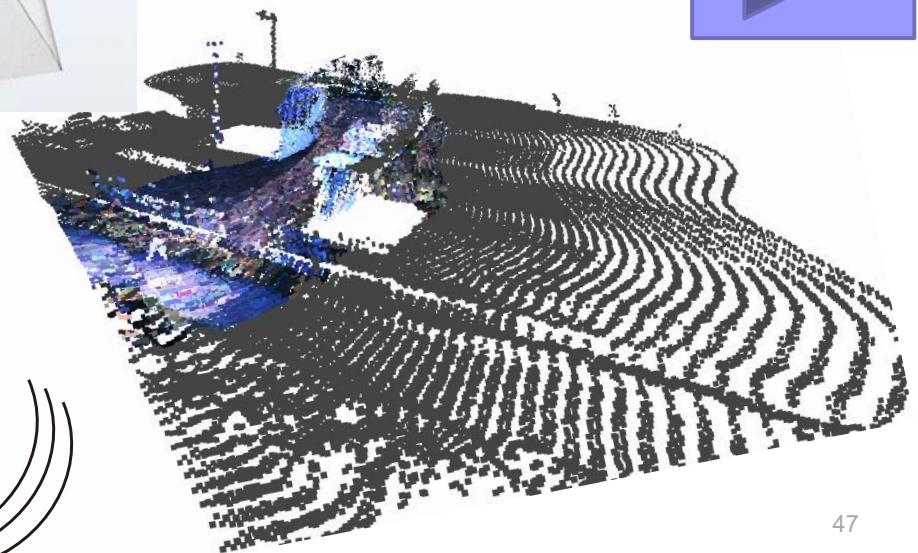
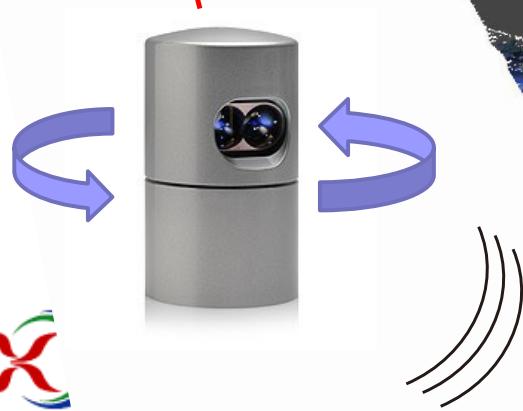
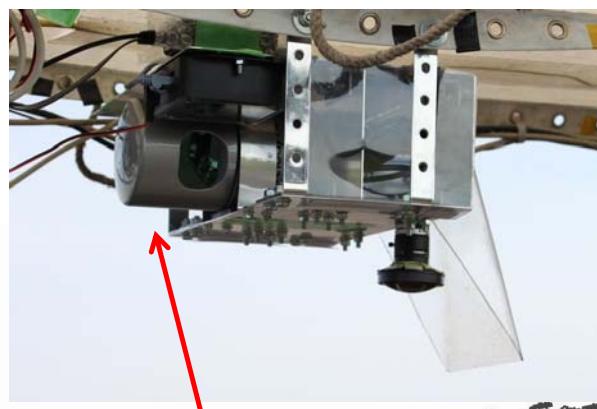


実験結果（提案手法）

- PMVSに比べて、壁面はほぼ埋まっている
- 少ない使用画像枚数で密な三次元再構成ができている



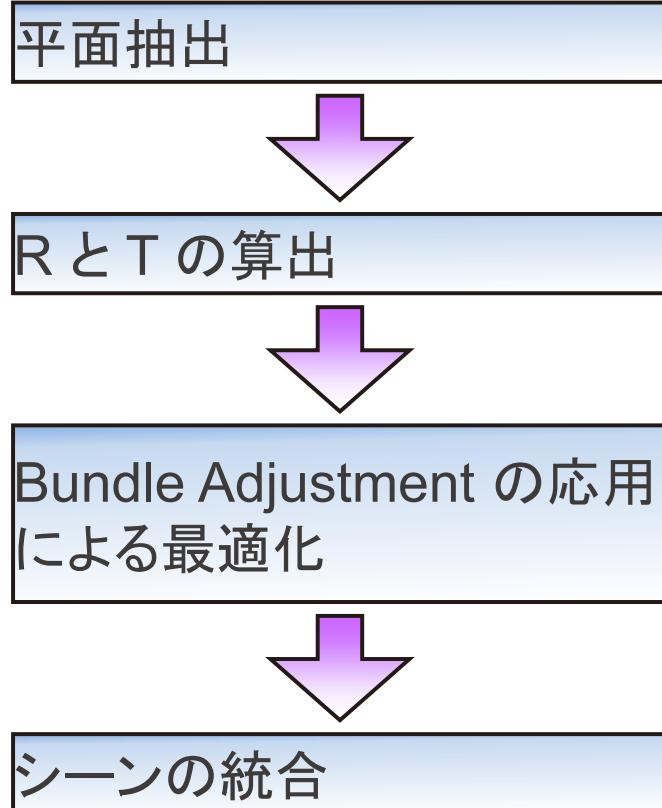
3次元レーザスキャナ & カメラ



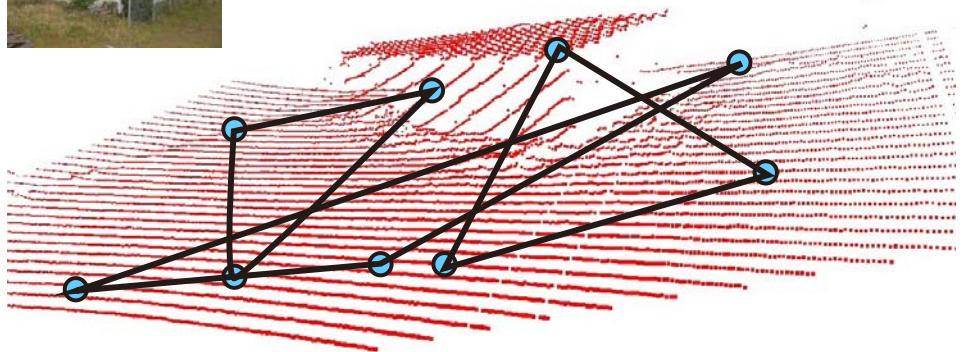
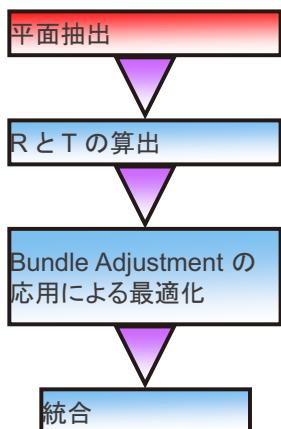
設置の様子



処理フロー



RANSACによる平面の検出

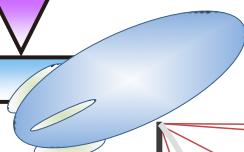
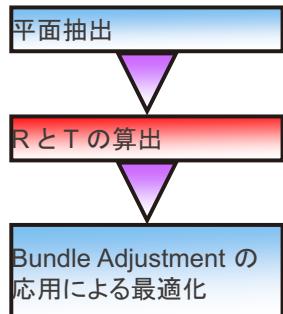


$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

平面ベクトル：
行列 A の最小固有値に対
応する固有ベクトル



平面から R と T の算出



$$\begin{aligned} P &= \begin{bmatrix} N \\ b \end{bmatrix} \\ P^\top \begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} &= 0 \\ X' &= RX + T \end{aligned}$$

R と T と N の関係

$$\begin{aligned} N'^\top R &= N^\top \\ N'^\top T &= b - b' \end{aligned}$$

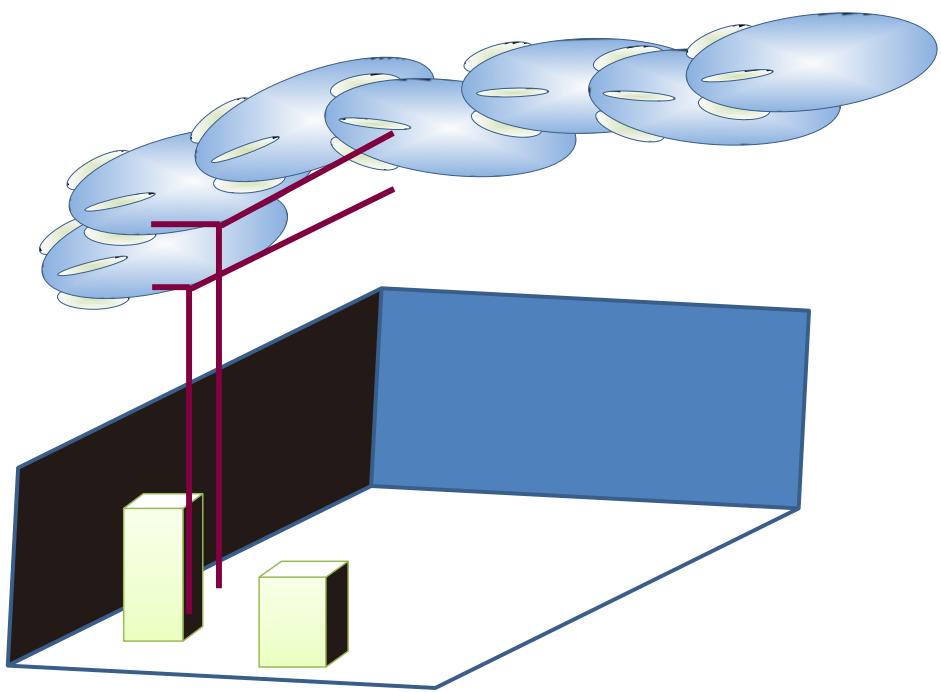
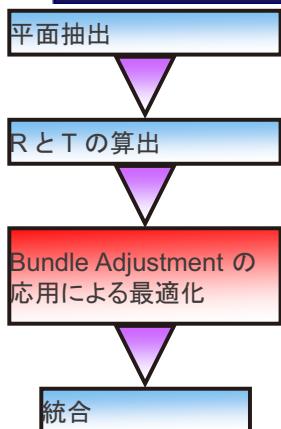
P が複数ある場合

$$B = [P_1 \ P_2 \ P_3]$$

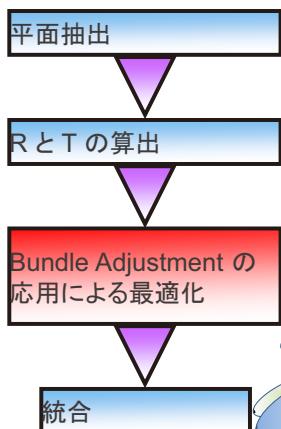
B を最小特異値分解
最小特異値が最大となる
組み合わせを使用



Bundle Adjustment の応用

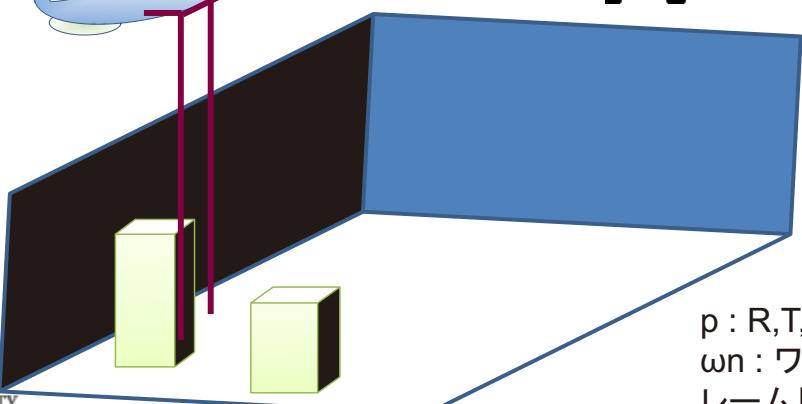
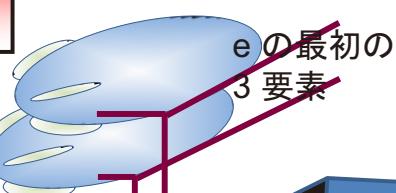


Bundle Adjustment の応用



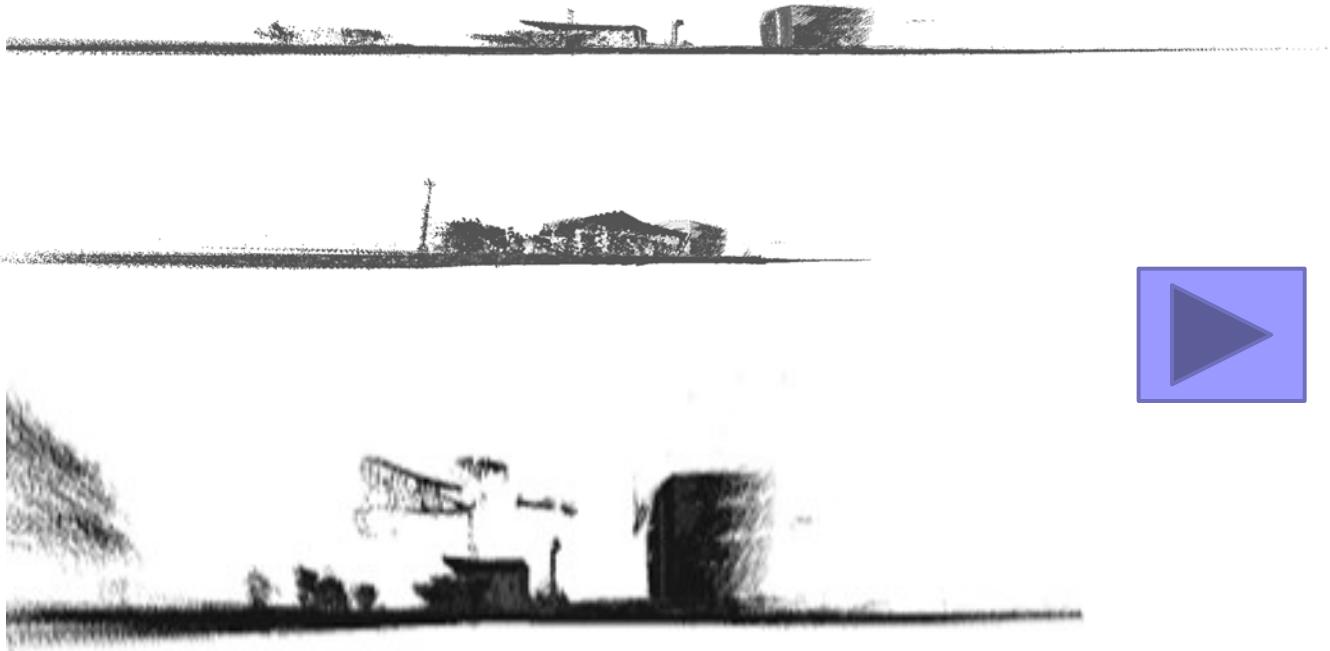
$$E(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \|e(\mathbf{p})\| = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m e_k^2$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \mathbf{N}_1 - R_{\omega_1} \mathbf{N}_{\omega}$$



\mathbf{p} : R, T, Nを並べたベクトル
 ω_n : ワールド座標系から n フレーム目への回転要素

最適化後の結果



飛行船の制御

飛行船の特徴

- ・横方向へ直接的な力を持たない**劣駆動**システム
- ・コリオリ力などの非線形項をもつ**非線形**システム
- ・風による**影響**を非常に受けやすい

制御は困難



風の影響を考慮したロバストな制御システム構築が重要

風外乱下における飛行船の飛行制御系設計法

飛行船モデル・シミュレータ開発



JAXA飛行船 (14m)



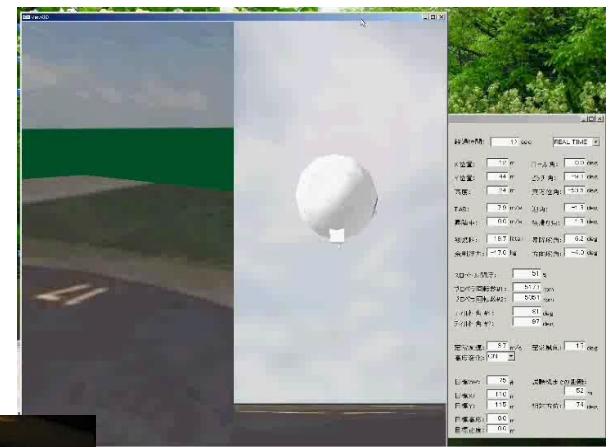
Stuttgart Univ.
飛行船 (15m)



空力の
理論
モデル
・
風洞試験



2x2 低速風洞 (JAXA)

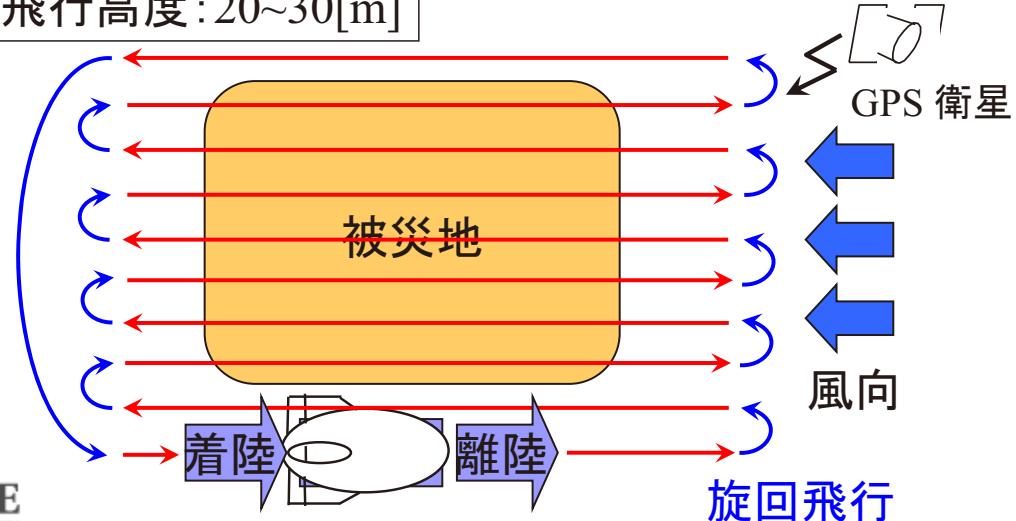


飛行船シミュレータ

情報収集のための飛行

- 飛行時の主風向に対して飛行経路を生成
- 直線部分で情報収集
- 少ない人員で運用可能なように自動離着陸

飛行高度: 20~30[m]



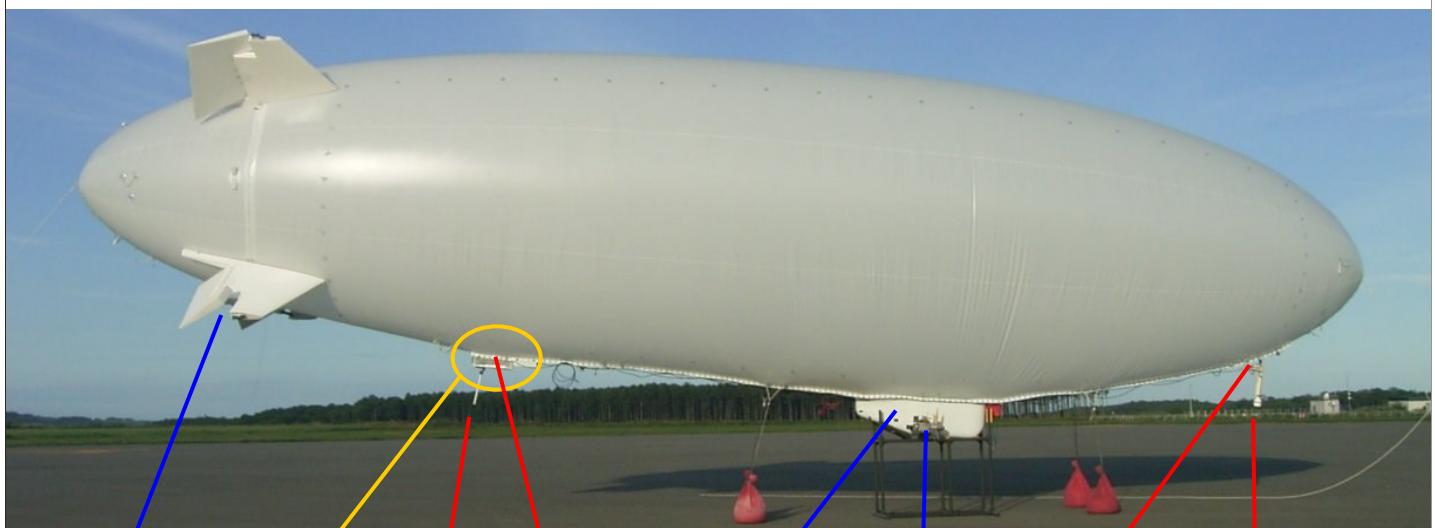


北海道大樹町 JAXA大樹航空宇宙実験場



鹿児島市七ツ島場外試験場

12m級屋外型飛行船ロボット



舵

計算機Box

IMU

無線LANアンテナ

ゴンドラ

GPSアンテナ

エンジン
(62cc 2基)

風速センサ

屋外型飛行船ロボットの飛行制御

強風下での
離着陸を含む
自律飛行可能



宇宙航空研究開発機構(JAXA)
大樹航空宇宙実験場(北海道広尾郡大樹町)

実用化のための活動

- JAXA 災害監視無人機システム分科会
(自治体, 消防, 産業用無人航空機協会, 大学など)



・収納状態から
短時間でのヘリウム注入
(JAXA 開発)



無人航空機(UAV)



まとめ

- ・被災状況の迅速かつ詳細な情報収集システムに関し、方法論がほぼ確立できたと考えている

本研究は、以下により実施いたしました。

- ・科学研究費補助金 若手研究(A)
- ・セコム科学技術振興財団助成金
- ・JR西日本あんしん社会財団助成金
- ・宇宙航空研究開発機構 共同研究

ここに、感謝の意を表します。

