

# 物体認識のための 3次元特徴量の基礎と動向

中京大学大学院 情報科学研究科

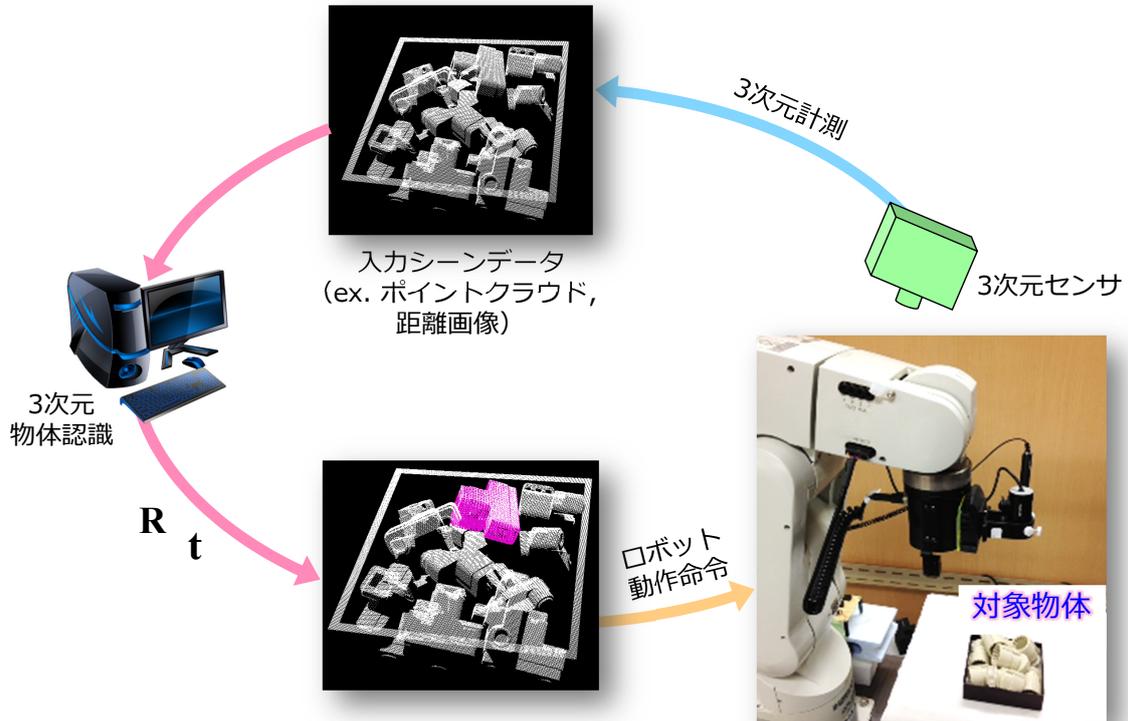
橋本 学



## Contents

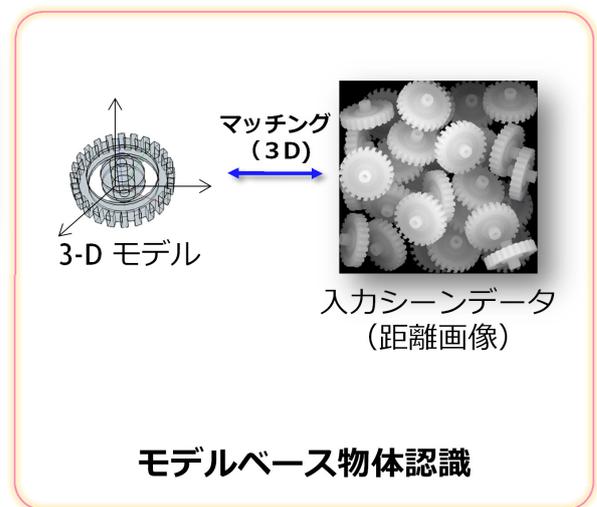
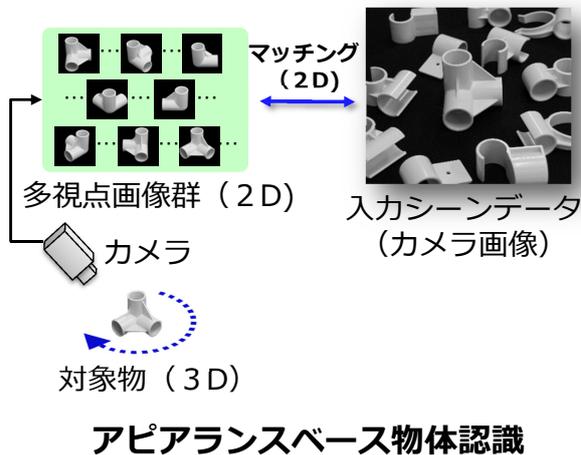
1. Introduction 3次元物体認識の概要
2. 3次元特徴量の基礎
  - キーポイント周りの情報記述
  - 複数点間関係記述
3. 局所参照座標系 (LRF)
  - 固有ベクトル利用型
  - 法線ベクトル利用型
4. 実用化のための重要課題と研究事例

# 3次元物体認識の基本課題と手順

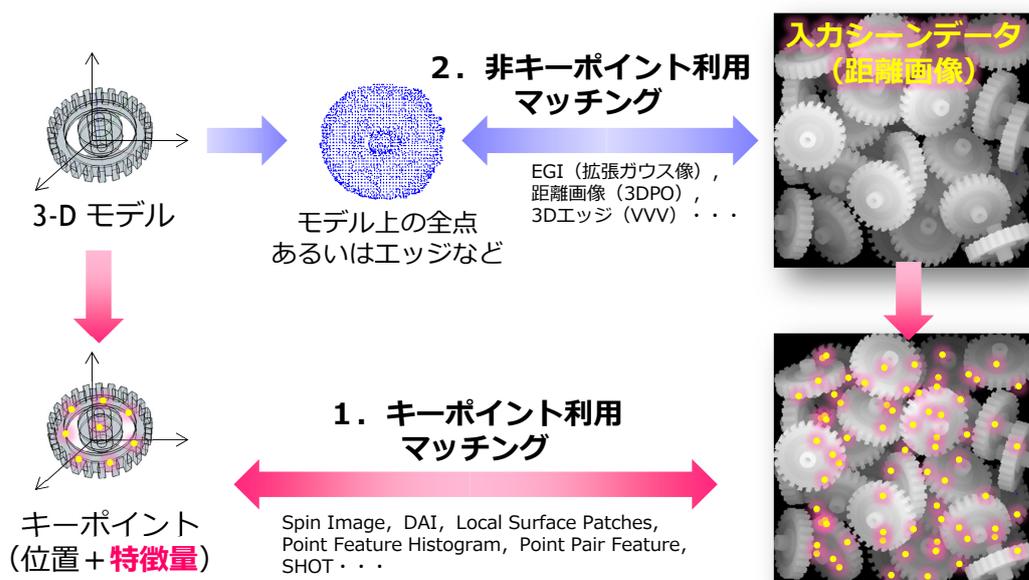


## アピランスベース V.S. モデルベース

	アピランスベース	モデルベース
手法	多視点画像群と入力シーン (ex. 単眼カメラ画像) を照合	3次元CADモデルと入力シーン (ex. 距離画像) を照合
メリット	単眼カメラを利用可能	CADモデルのみの準備で十分
デメリット	多量の辞書データ (画像群) が必要	一般に3次元センサが必要



# モデルベース手法におけるモデルの表現法



- かつては画像そのものを使う手法が主流.
- 最近では, 高速化のためにキーポイントベースが増加.

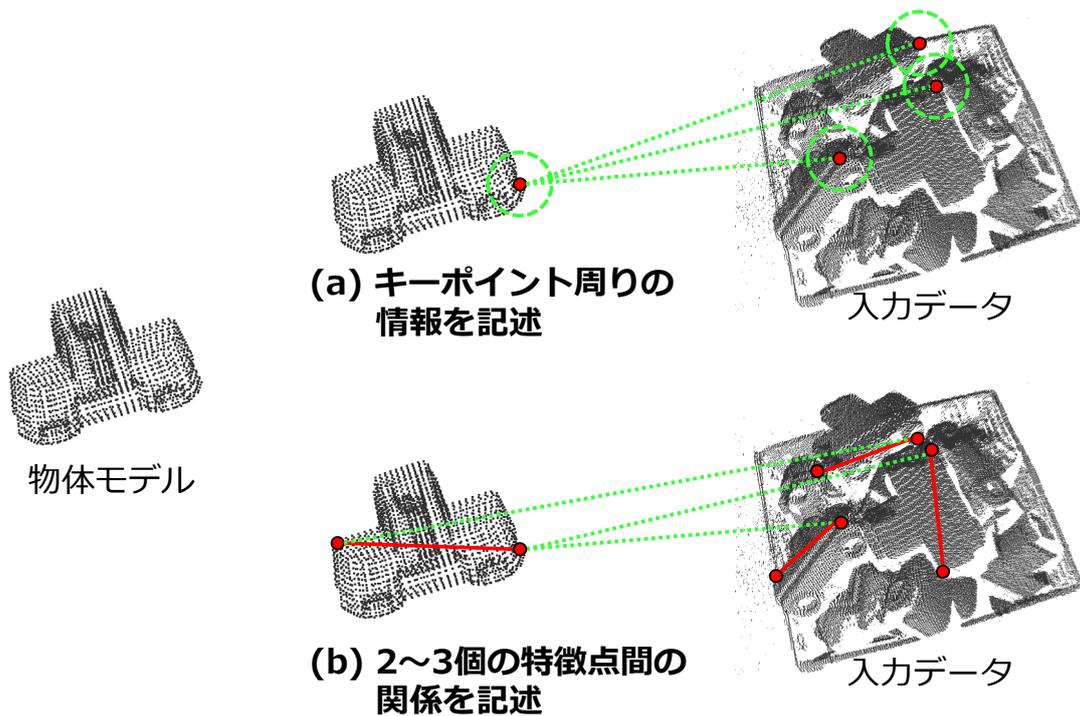
## キーポイントを的確に特徴づける **3次元特徴量** が重要

## Contents

1. Introduction 3次元物体認識の概要
- 2. 3次元特徴量の基礎**
  - キーポイント周りの情報記述
  - 複数点間の関係記述
3. 局所参照座標系 (LRF)
  - 固有ベクトル利用型
  - 法線ベクトル利用型
4. 実用化のための重要課題と研究事例

## 2つのタイプの3次元特徴量

キーポイントにどのような情報（特徴量）を付加するか？



## 3次元特徴量の分類と特徴

キーポイントベース手法			
(a) キーポイント周りの情報記述			(b) 複数点間の関係記述
座標データ利用	法線ベクトル利用	その他の情報を利用	2点間 or 3点間
SHOT, PFH, CSHOT, HONV		LSP, CCDoN, NARF, MHOG, RoPS	PPF, ER, VC-PPF, MPPF, PPF B2B or S2B or L2L, VPM
SI, SSI, DAI, 3DSC, SDLSD	FPFH, DoN		

PFH : Point Feature Histogram  
 SHOT : Signature of Histograms of Orientations  
 CSHOT : Color SHOT  
 HONV : Histogram of Oriented Normal Vector  
 SI : Spin Image  
 SSI : Spherical Spin Image  
 DAI : Depth Aspect Image  
 3DSC : 3D Shape Contexts

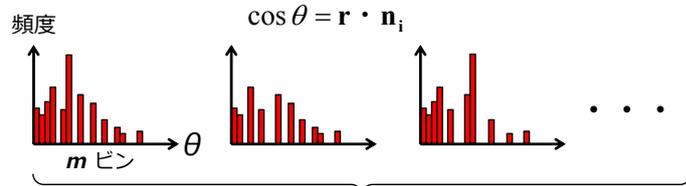
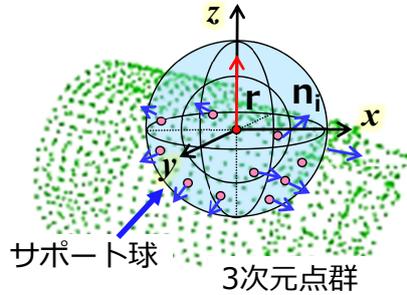
SDLSD : Scale-Dependent Local Shape Descriptor  
 FPFH : Fast PFH  
 DoN : Difference of Normals  
 LSP : Local Surface Patches  
 CCDoN : Combination of Curvatures and Difference of Normals  
 NARF : Normal Aligned Radial Feature  
 MHOG : Mesh HOG  
 RoPS : Rotational Projection Statistics

PPF : Point Pair Feature  
 ER : Efficient Ransac  
 VC-PPF : Visibility Context PPF  
 MPPF : Multimodal PPF  
 PPF B2B or S2B or L2L : PPF Boundary-to-Boundary or Surface to Boundary or Line to Line  
 VPM : Vector Pair Matching

# SHOT 特徴量 (Signature of Histograms of Orientations)

## 特徴記述

1. キーポイント周辺 (サポート球内) を分割する (LRFを利用).  
xy 平面で 2 分割, 球内を中心部と周辺部に 2 分割, さらに,  
z 軸まわり 8 分割. ( $\rightarrow 2 \times 2 \times 8 = 32$  分割)
2. 基準点の法線  $\mathbf{r}$  と, 分割された各スペース (32 個) の法線ベクトル  $\mathbf{n}_i$   
との内積を計算し,  $m$  ビンのヒストグラムを作成. ( $m=11$ )



32個のヒストグラム  $\times$  11ビン = **352 次元 特徴量**  
(HOGと似た勾配ベースの特徴量なので姿勢変化に不変)

## 利点

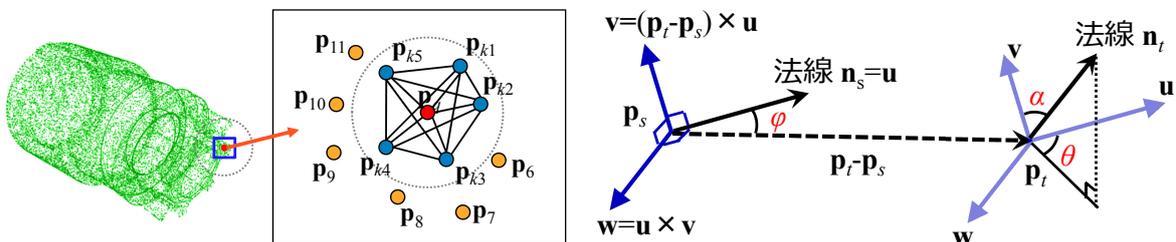
- 次元数が高いので, 特徴表現力が高い (キーポイントとしての誤照合が少ない).

参考文献: F. Tombari, S. Salti, L.D. Stefano, "Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description", ECCV, pp.356-369, 2010.

# PFH 特徴量 (Point Feature Histograms)

## 特徴記述

- 注目点周りの球領域内の  $k$  近傍点から**多数の 2 点組**を選択.
- 2 点から  $\alpha, \theta, \varphi, \mathbf{p}_t - \mathbf{p}_s$  を計算し, **ヒストグラム化 (=特徴量)**  
ex. 125次元 (PCL)



## ユニーク特徴点の選択

- ある特徴量が, モデル内の平均特徴量より大きければ候補として保存.
- 球の半径を変えながら同様の計算をおこない, 多くの半径から支持された候補点を, 最終的な **ユニーク特徴点** として選択する.

## 利点

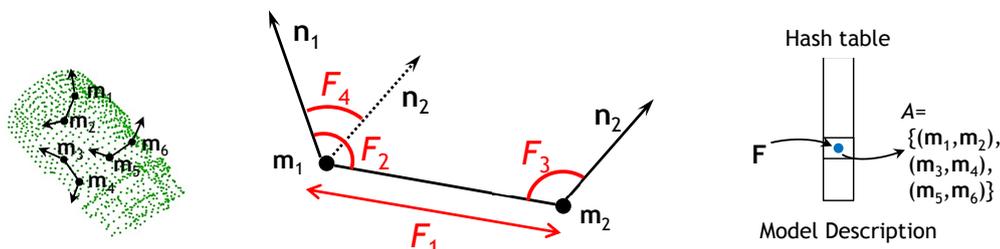
- ヒストグラム特徴なので, 多少の外乱には頑健.
- 次元数がある程度高いので, モデルの表現力も高い.

参考文献: R. B. Rusu, et al., "Aligning Point Cloud Views using Persistent Feature Histograms", IEEE Proc. IROS, pp.3384-3391, 2008.

# PPF 特徴量 (Point Pair Feature)

## 特徴記述

- 2 点対から算出された 4次元特徴量 ( $F_1 \sim F_4$ ) . . . (PPF) .
- 物体上の **全ての点から** できる 2 点対ごとに、この特徴量を算出.
- これをハッシュテーブルに登録.



## マッチング

- 特徴量が類似する PPF を探索. (ハッシュテーブルを活用)
- それらの幾何変換パラメータを計算する.

## 利点

- モデル全体のキーポイントを使うので、オクルージョンには比較的頑健.

参考文献 : B. Drost, et al., "Model Globally, Match Locally: Efficient and Robust 3D Object Recognition", CVPR, pp.998-1005, 2010.

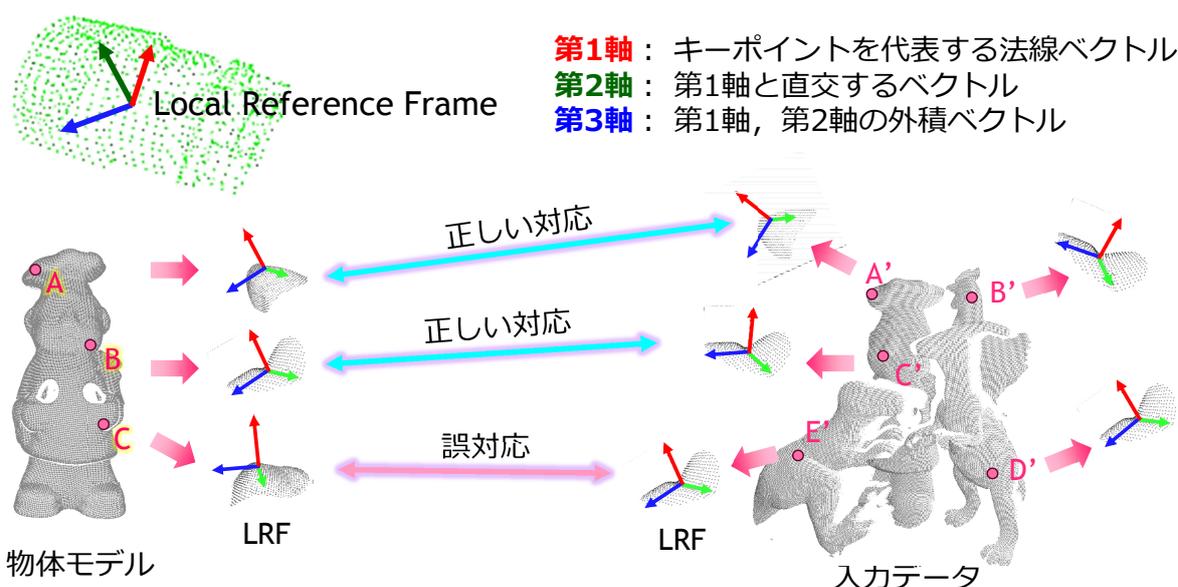
# SHOT と PPF の比較

	SHOT (キーポイント周辺情報記述)	PPF (複数点間の関係記述)
特徴量の次数	352	4
特徴量の強さ (Identity)	特徴ベクトルの次数が高い (アイデンティティが高い) ので、 <b>誤照合は少ない</b> .	単体ではSHOTよりもアイデンティティが低い、 <b>投票処理</b> (統計処理) によって解決している例が多い.
外乱への耐性 = 再現性 (Repeatability)	ヒストグラム化した法線を利用しているので <b>ノイズには強い</b> . LRF設定は統計量ベースなので <b>オクルージョンにはやや弱い</b> .	物体全面にばらまかれた多数の点対 (全点からの2点組み合わせ) を用いるので、 <b>オクルージョンには強い傾向あり</b> .
特徴点数	特徴量の次元数が高いので、一般には少数で足りる.	多くのPPFを使う必要があるので、マッチング時の工夫が重要 (ハッシュテーブル利用等) .
処理時間	特徴量次数と特徴点数の両方が関連している、一概に言えない。ばら積み物体認識の場合は、特徴量単体の ID が低い PPF は多数のマッチング候補が発生するので、時間がかかることがある.	

1. Introduction 3次元物体認識の概要
2. 3次元特徴量の基礎
  - キーポイント周りの情報記述
  - 複数点間の関係記述
3. 局所参照座標系 (LRF)
  - 固有ベクトル利用型
  - 法線ベクトル利用型
4. 実用化のための重要課題と研究事例

## 局所参照座標系 (LRF : Local Reference Frame)

- **LRF とは?** 特徴点におけるごとに設定される 3次元直交座標系



- 特徴量は LRF を基準にして記述されるため, 再現性に大きな影響を与える。すなわち, 特徴量の安定化のためには, **LRF の安定化** がきわめて重要。
- マッチング後には, 位置姿勢の推定にも利用される。

# LRF が認識性能に与える影響

- 同一特徴量にさまざまな LRF を組み合わせて性能を評価。

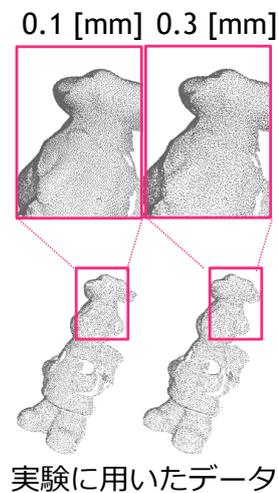
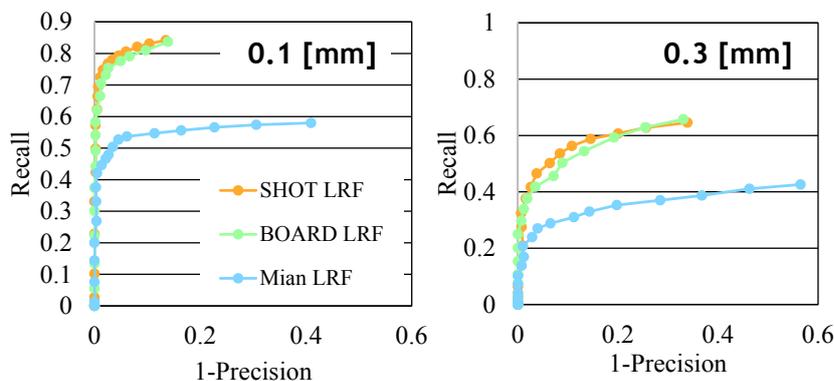
特徴量： SHOT

マッチング対象： ガウシアンノイズを付加した点群

ノイズレベル：  $mr \ 0.1 \text{ [mm]} < 0.3 \text{ [mm]}$

mr = mesh resolution

最近傍点までの距離の平均値 (数値が大きいほど「粗い」)



実験に用いたデータ

**3次元特徴量が同一でも、LRF によって性能が影響される。**

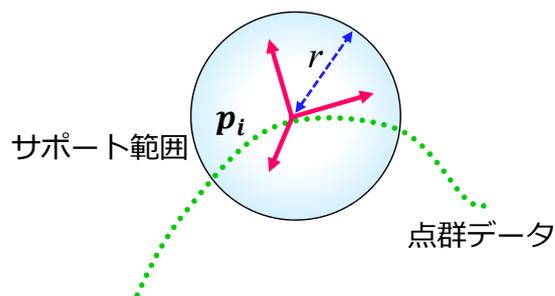
## Mian LRF

[Mian2010]

半径  $r$  の球領域内の点群の共分散行列の固有ベクトル群 (3次元)

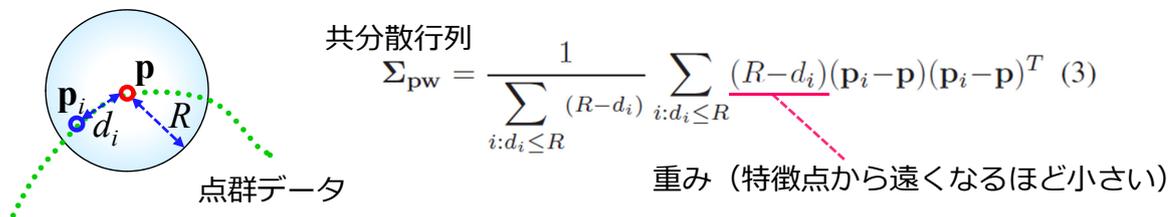
$$\text{共分散行列} \quad \Sigma_{\hat{p}} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k (\mathbf{p}_i - \hat{\mathbf{p}})(\mathbf{p}_i - \hat{\mathbf{p}})^T \quad (1)$$

$$\text{平均ベクトル} \quad \hat{\mathbf{p}} = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \mathbf{p}_i \quad (2)$$

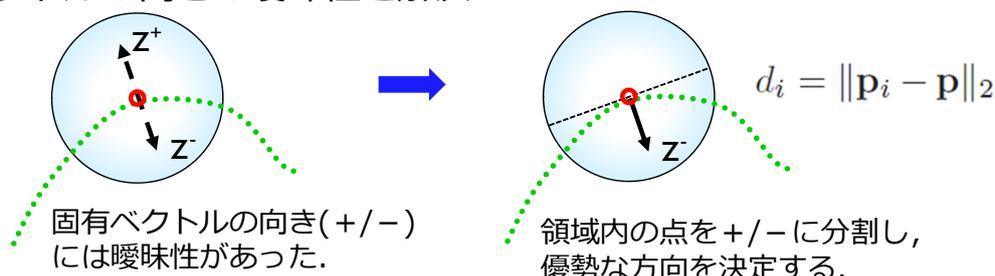


- Mian LRFの改良版.
- 注目点からの距離に応じた**重みつき共分散行列**の固有ベクトル

## 1. 周辺部外乱の影響を抑制



## 2. 固有ベクトルの向きの変換性を解決



参考文献: F.Tombari, S.Salti, L.D.Stefano, Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description, ECCV, pp.356-369, 2010.

# BOARD (BOrder AWare Repeatable Directions) LRF

- z 軸
  - サポート範囲内の点群を**平面フィッティング**したときの法線.
- x 軸
  - 周辺の法線ベクトル群の中から, z 軸との内積 ( $\cos\theta$ ) が最も小さい (=大きく傾いた) ものを決定し, これを x 軸とする.
  - このとき, 欠損領域の有無を判定し,  $\cos\theta$ の最小値がその領域内に存在する場合は, 両脇のデータをもとに, 最小位置推定する.

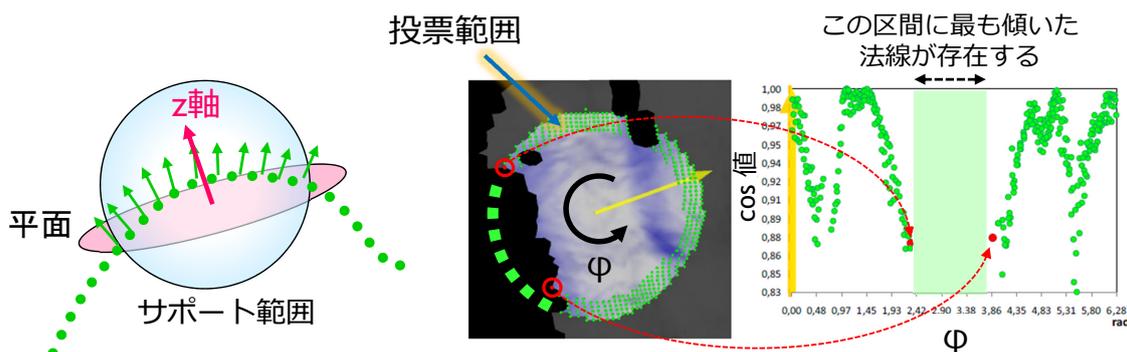


Figure 5. Missing region identification.

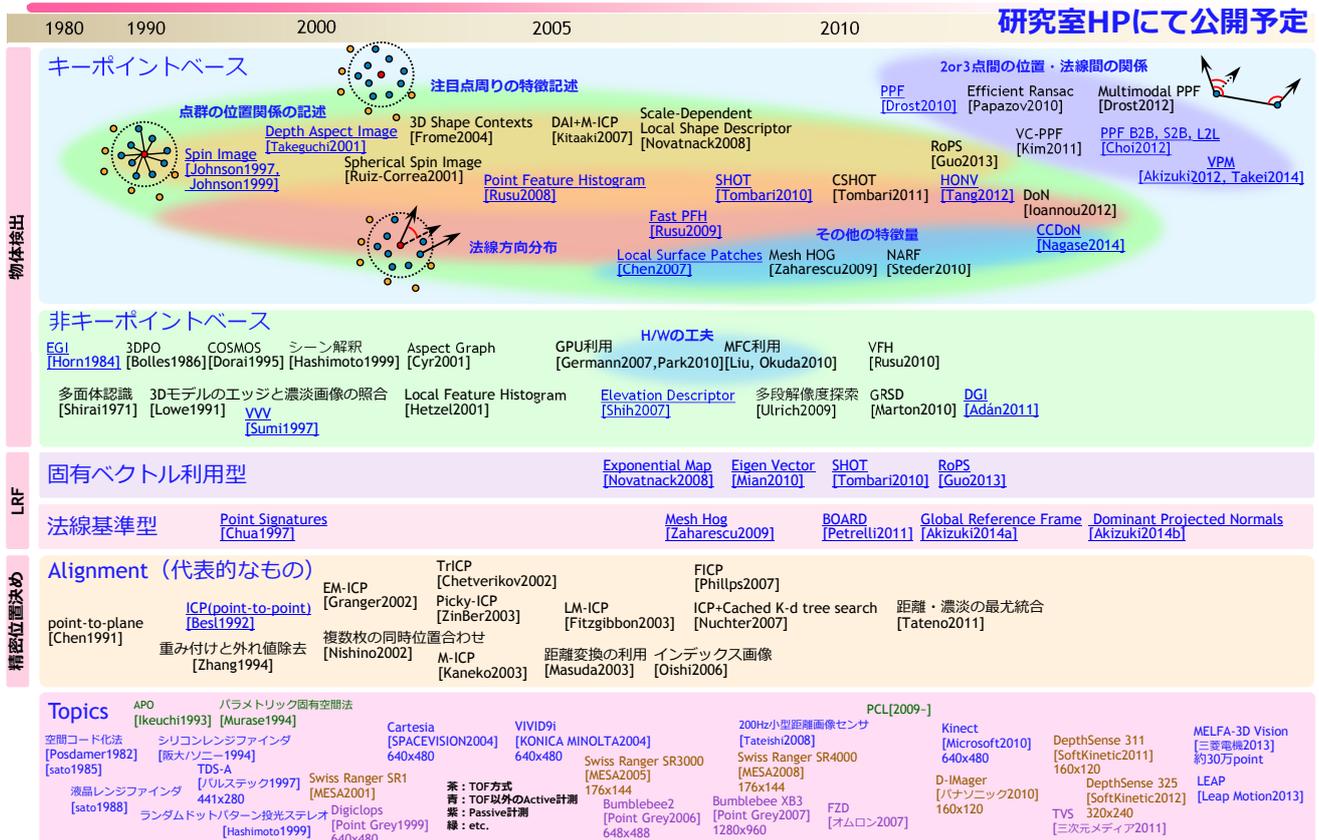
# LRF の分類

A. 固有ベクトル利用型	B. 法線ベクトル利用型	
キーポイント周りの点群の座標から共分散行列を計算し、その固有ベクトル群を LRF とする。	3軸をそれぞれ独立に算出する。 z 軸 = キーポイント周りの法線ベクトル x 軸 = さまざまな工夫	
Mian, SHOT, RoPS, EM	x 軸の決定方法	
	最大値選択	方向分布分析
	BOARD PS	MH DPN, GRF

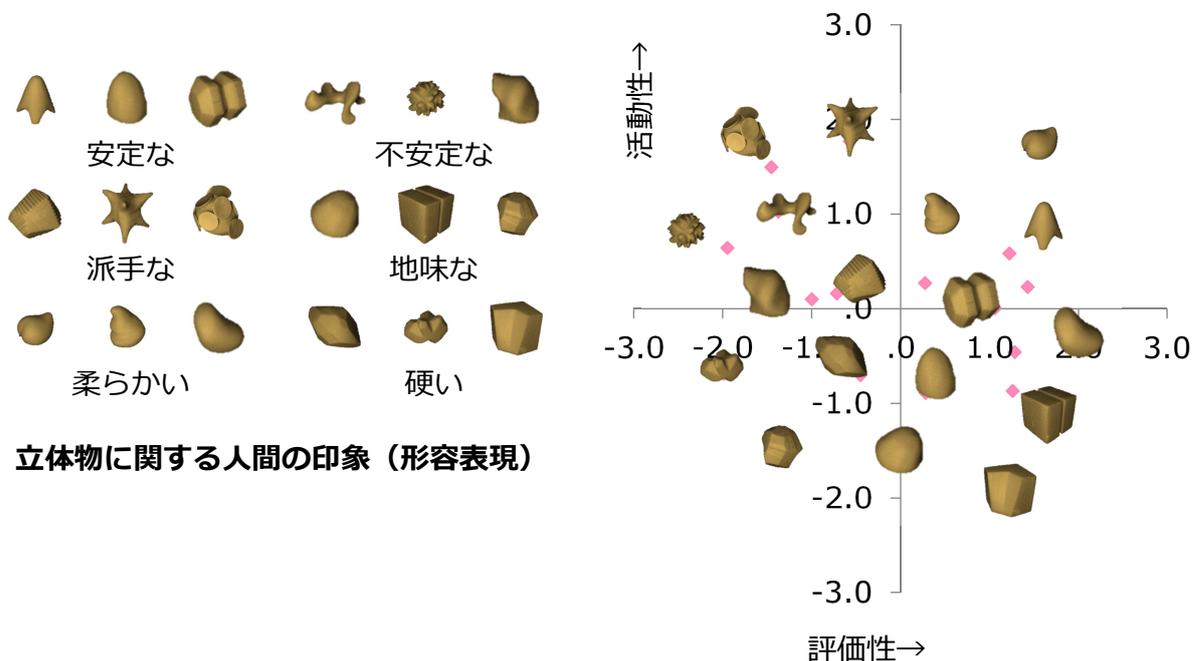
Mian : Mian の LRF  
 SHOT : Signature of Histograms of Orientations  
 RoPS : Rotational Projection Statistics  
 EM : Exponential Map

BOARD : BOrder Aware Repeatable Directions  
 PS : Point Signature  
 DPN : Dominant Projected Normals  
 GRF : Global Reference Frame  
 MH : Mesh HoG

## 3次元特徴量と周辺技術に関する技術マップ



モノに対する人間の感性を指標化する試み



## Contents

1. Introduction 3次元物体認識の概要
2. 3次元特徴量の基礎
  - キーポイント周りの情報記述
  - 複数点間の関係記述
3. 局所参照座標系（LRF）
  - 固有ベクトル利用型
  - 法線ベクトル利用型
- 4. 実用化のための重要課題と研究事例**

### 1. ばら積み物体認識への対応

- 3次元特徴量がオクルージョンによって見えない.

### 2. 3次元的な起伏が少ない物体への対応

- 平面が多い物体, 工業部品ではよくある.

### 3. 局所的な情報欠損への対応

- 表面材質・状態, 面の方向などに起因.

### 4. 点群密度の変化への対応

- CADモデル使用, センサの種類, 距離に起因.

### 5. シンプルで実用的な 3次元計測デバイス

- 疑似 3次元情報の獲得

## 1. ばら積み物体認識への対応

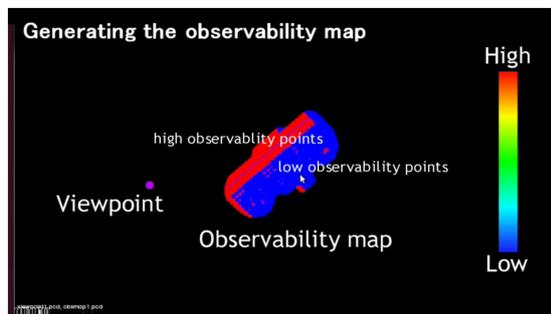
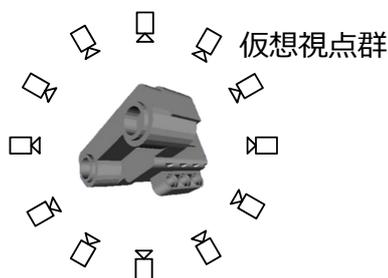
---

3次元特徴量がオクルージョンによって見えない.

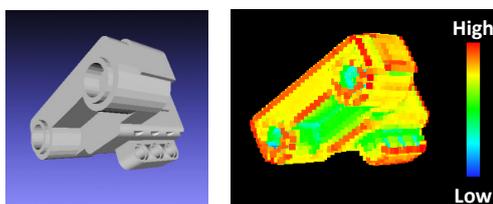
# 可観測性を考慮した 3D特徴点選択

[Akizuki2014]

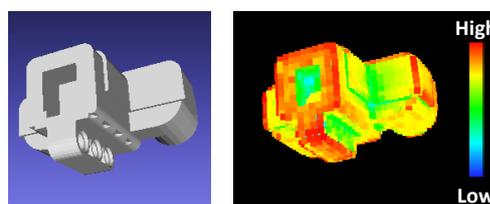
- 入力シーンにおける観測可能性の高い点を自動選択
  - 物体周りに複数の視点を設定し、各点の観測可能性をモニタリング
  - 観測可能性の高い点を特徴点とする。



可観測率マップの生成



可観測率マップ (視点 1)



可観測率マップ (視点 2)

S. Akizuki, M. Hashimoto : "Position and Pose Recognition of Randomly Stacked Objects using Highly Observable 3D Vector Pairs", Proc. IECON, pp.5266-5271, Oct, 2014.

Hashimoto Laboratory, Chukyo University

ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2014 in Yokohama

25

## 可観測性考慮の効果

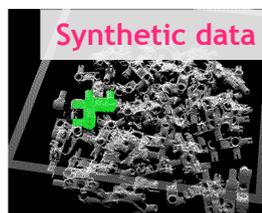
- 4 x 113 シーンに対する認識性能の比較結果

Recognition rate  $Pr$  [%], Processing time  $T$  [sec]

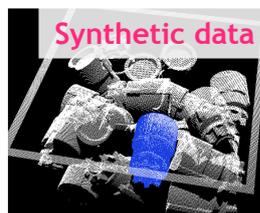
			A	B	C	D
SHOT [Tombari,PSIVT2011]	$Pr$	51.3	77.9	33.6	20.3	
	$T$	27.78	19.46	33.69	22.48	
FPFH [Buch,ICRA2013]	$Pr$	54.9	11.5	73.5	31.0	
	$T$	0.67	3.97	1.07	0.91	
VPM (独自性のみ) [Akizuki,ISOT2013]	$Pr$	40.7	31.0	47.8	33.6	
	$T$	0.27	1.41	0.39	0.72	
VPM 可観測性利用	可観測性のみ	$Pr$	97.3	100.0	94.7	85.0
		$T$	0.47	1.76	1.76	1.99
	可観測性+独自性	$Pr$	99.1	95.6	92.0	85.8
		$T$	0.44	1.76	1.42	1.81



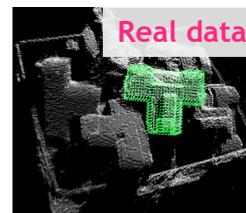
A の認識結果例



B の認識結果例



C の認識結果例



D の認識結果例

Hashimoto Laboratory, Chukyo University

ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2014 in Yokohama

26

## 2. 3次元的な起伏が少ない物体への対応

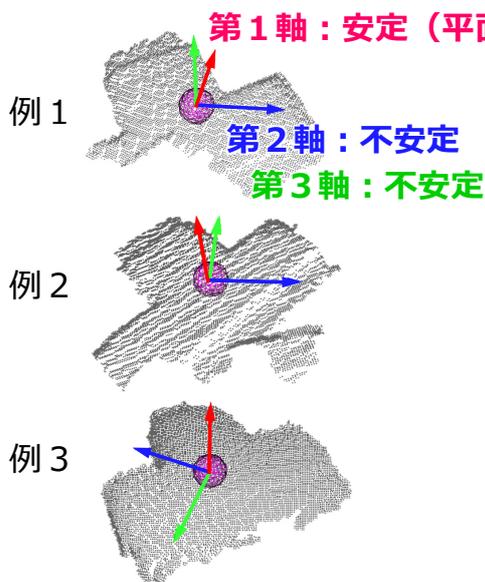
人工構造物や工業部品では、平面部が多い物体が多い。

### GRF (Global Reference Frame)

[Akizuki2014]

#### ■ 従来 LRF の問題点

- 平面的な形状の場合に、軸方向が不安定



偏り方向

法線ではなく、外形の偏り  
(大域的情報)を用いた RF を提案  
→ 工業物体に対する実用解

[Demo](#)



Demo movie: <http://isl.sist.chukyo-u.ac.jp/MovieTheater/MovieTheater.html>

秋月秀一, 橋本学, Global Reference Frame: 平面的な形状のための3Dオリエンテーションを用いた表面凹凸密度に依存しない位置姿勢推定, 第19回知能メカトロニクスワークショップ (iMec2014), A2-4, pp.82-86, 2014/7/12.

### 3. 局所的な情報欠損への対応

表面材質・状態, 面の方向などに起因

## DPN (Dominant Projected Normals) LRF

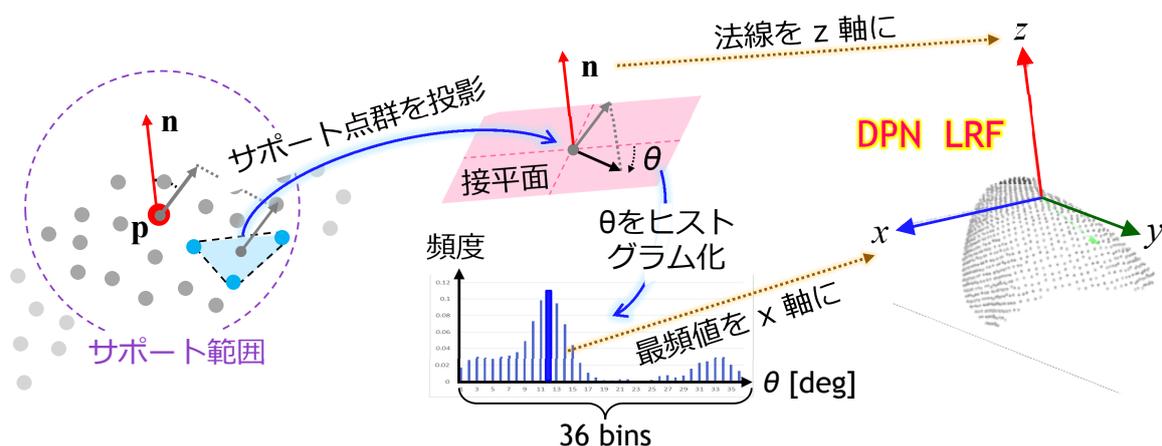
[Akizuki, ViEW2014]

### ■ 従来手法の問題点

- 固有ベクトル利用型: 部分的情報欠損に弱い (統計量を利用するから) .
- 法線ベクトル利用型: 点群密度の違いに弱い

### ■ アイデア: $x$ 軸の算出方法に工夫 ( $z$ 軸は注目点の法線)

- 方向ヒストグラムのピーク位置を利用 → 情報欠損を改善
- 近傍点を作る三角パッチの面積で正規化 → 点群密度の違いを許容

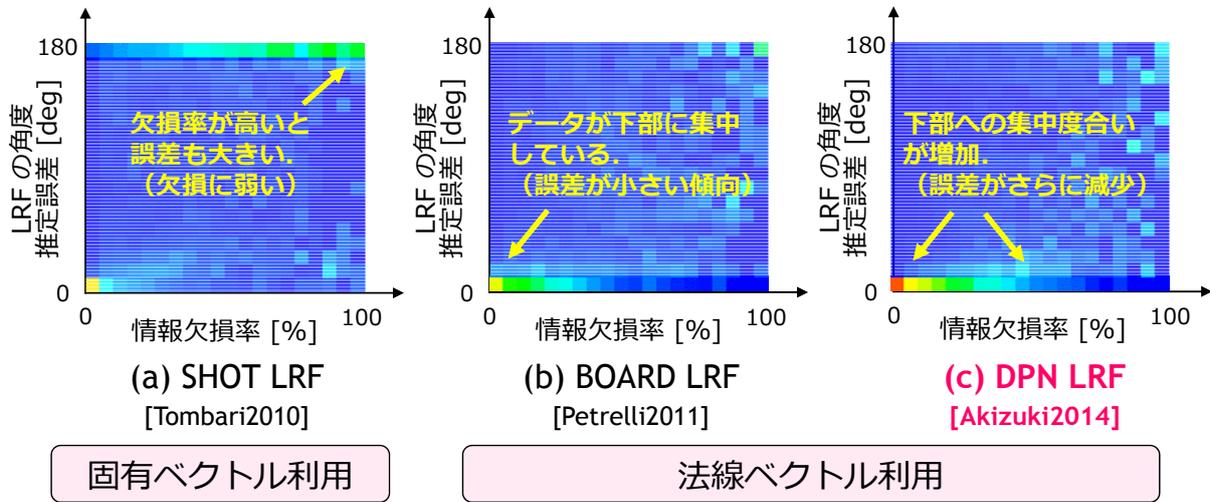


参考文献: 秋月秀一, 橋本学: “安定的な3D特徴量記述のための点群の密度変化にロバストな Local Reference Frame”, ViEW, 2014.

# DPN LRF の性能 1 情報欠損への耐性

[Akizuki, ViEW2014]

- オクルージョンを模擬した情報欠損を発生. 欠損率と LRF 角度推定誤差との関係を調査.



**DPN LRF は、情報欠損の影響を受けにくい。**

参考文献：秋月秀一，橋本学：“安定的な3D特徴量記述のための点群の密度変化にロバストな Local Reference Frame”，ViEW，2014.

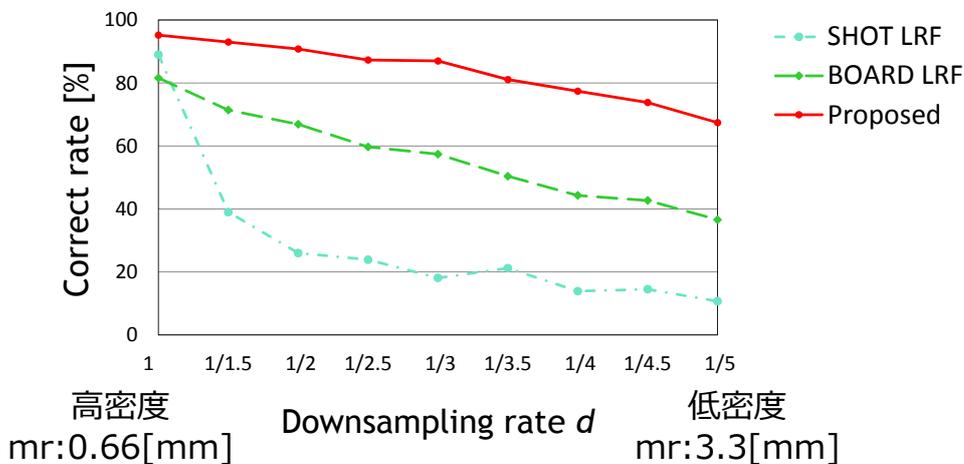
Hashimoto Laboratory, Chukyo University

ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2014 in Yokohama

# DPN LRF の性能 2 点群密度変化への耐性

[Akizuki, ViEW2014]

- ノイズ+点群密度 1~1/5 の外乱付きデータに対してDPN LRF を算出.
- 角度誤差 10 deg 以内のデータ数の割合をプロット.



**DPN LRF は、点群密度の違いによる影響を受けにくい。**

参考文献：秋月秀一，橋本学：“安定的な3D特徴量記述のための点群の密度変化にロバストな Local Reference Frame”，ViEW，2014.

Hashimoto Laboratory, Chukyo University

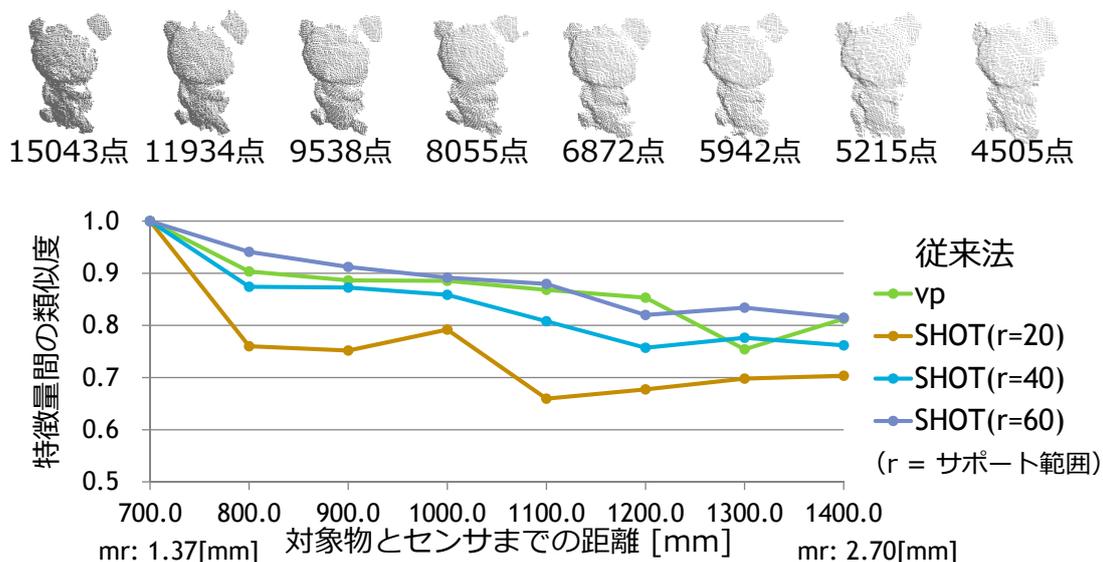
ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2014 in Yokohama

## 4. 点群密度の変化への対応

CADモデル使用, センサの種類, 距離に起因

### 点群密度の変化と特徴量の再現性

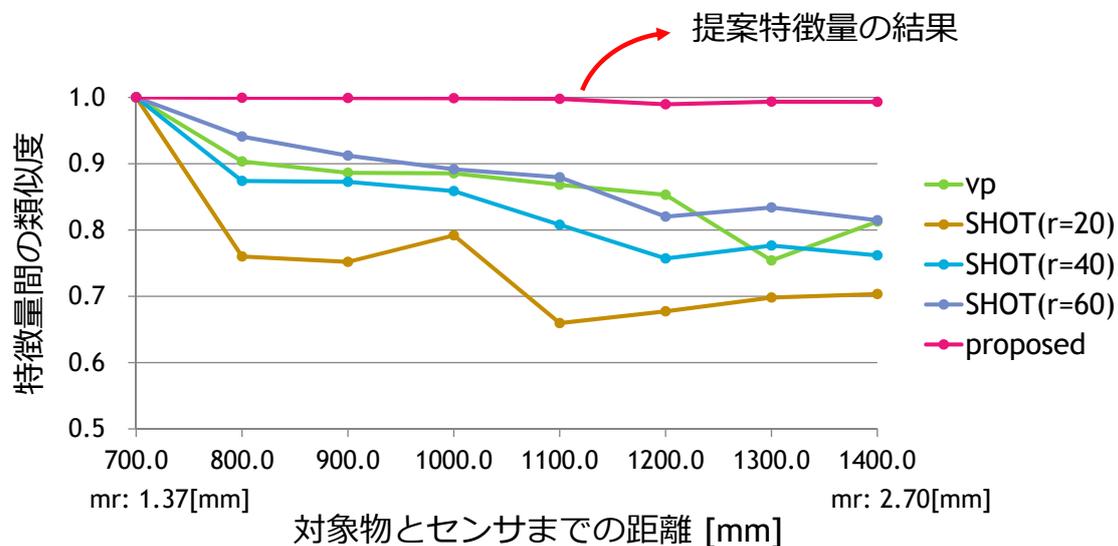
- 100 mm ごとに遠ざかっていく物体に対して, 同一の点から算出される特徴ベクトル間の類似度を計測.
- 特徴量: ベクトルペア (vp), SHOT



点群密度が変化すると特徴ベクトルの再現性が劣化する

## 最新事例：点群密度の変化にロバストな 3次元特徴量

- 点群密度の変化にロバストな3次元特徴量を提案した。  
予備検討完了し，以下の結果を得た。（詳細はSSII2015で発表予定）

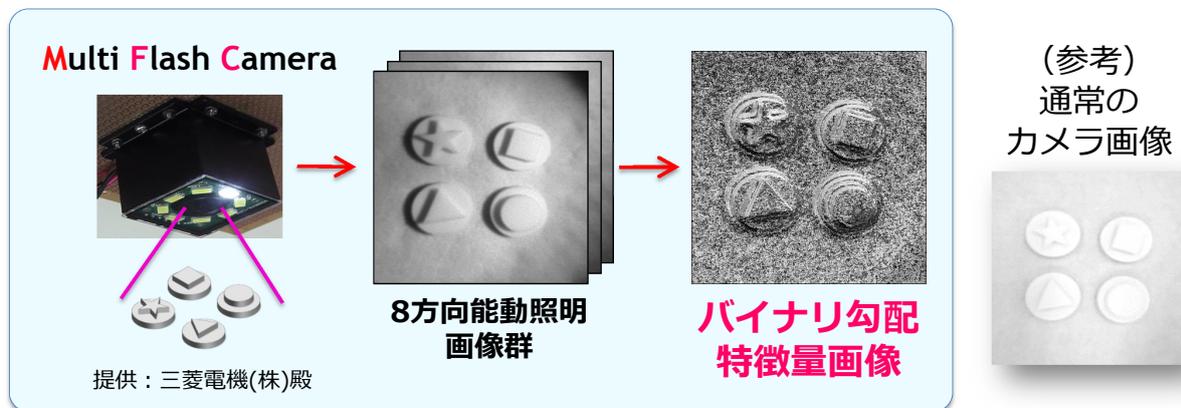


## 5. シンプルで実用的な 3次元計測デバイス

疑似 3次元情報の獲得

- 8方向からの **能動照明** を利用
  - 8枚の画像情報を1枚に圧縮 **コード化**
- } **イメージングと  
特徴量の緊密な融合**

## Coded Multi Flash Imaging

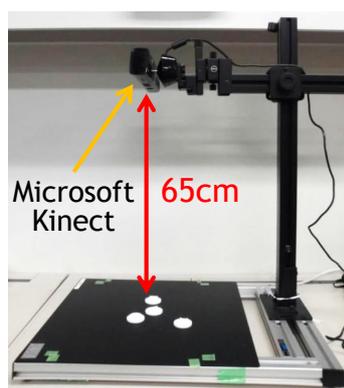


### バイナリ勾配特徴量画像

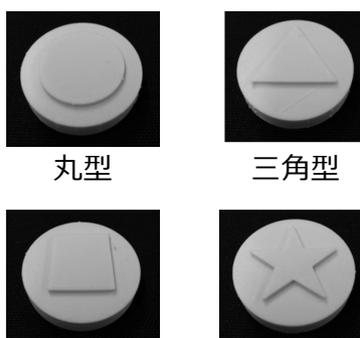
3D情報（起伏の位置，大きさ，方向）を1枚の画像に集約  
⇒シンプルな装置で，疑似3次元情報の取得が可能

# 市販センサ（Kinect）との性能比較

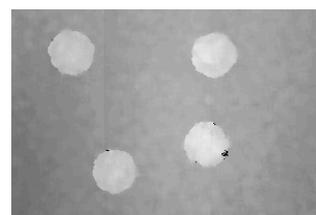
表面の凹凸形状のみが異なる4種類の図柄無し物体を使用



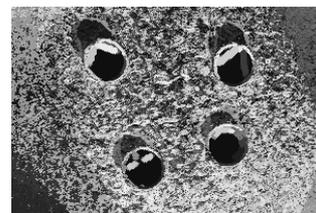
実験環境



実験対象物  
(表面凹凸の高さ：2 mm)



距離画像 (Kinect)



バイナリ勾配特徴量画像

手法	認識率 $P_r$ [%]	処理時間 $T$ [msec]
Kinect + 画像マッチング	38 (19枚/50枚)	3120
<b>提案手法</b>	<b>98 (49枚/50枚)</b>	<b>510</b>

CPU: Intel®CORE™i5 (2.50GHz), RAM: 4GB

# まとめ

## 1. 3次元物体認識の概要

- モデルベース物体認識における3次元特徴量

## 2. 3次元特徴量の基礎

- キーポイント周りの情報記述 v.s. 複数点間の関係記述
- 主要な 3次元特徴量と性能

## 3. 局所参照座標系 (LRF)

- 固有ベクトル利用型 v.s. 法線ベクトル利用型
- 主要な LRF と性能

## 4. 実用化へのステップと最新研究紹介

### *Special Thanks To:*

中京大学橋本研究室 3次元認識研究ユニットの学生たち (本資料の作成協力)



秋月秀一 (D1)



櫻本泰憲 (M2)



永瀬誠信 (M2)



武井翔一 (M1)



兼松裕一 (B4)



高橋祥平 (B4)

*Thank you for your attention!*

## 参考文献 1

- [Adan2011] A.Adan, P.Merchan, S.Salamanca, 3D scene retrieval and recognition with Depth Gradient Images, Pattern Recognition Letters, Vol.32, pp.1337-1353, 2011.
- [Akizuki2012] S.Akizuki,M.Hashimoto, High-speed and Reliable Object Recognition using Distinctive 3-D Vector Pairs in a Range Image, International Symposium on Optmechatronic Technologies (ISOT), pp1-6, 2012.
- [Akizuki2013a] 秋月秀一, 橋本学, 特徴的3-Dベクトルペアを用いたばら積み部品の高速位置姿勢認識, 電気学会論文誌C 研究開発レター, Vol.133, No.9, pp.1853-1854, 2013.
- [Akizuki2013b] 秋月秀一, 橋本学, 可観測性を考慮した3Dベクトルペア選択によるばら積み部品の位置姿勢認識, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW), OS5-02, Dec. 2013.
- [Akizuki2014a]秋月秀一, 橋本学, Global Reference Frameを用いた対象物の見えに依存しない3次元位置姿勢認識, Vol.80, No.12, 精密工学会誌, 2014.
- [Akizuki2014b] 秋月秀一, 橋本学, 安定的な3D特徴量記述のための点群の密度変化にロバストなLocal Reference Frame, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW), 2014.
- [Besl1992] P.J.Besl, N.D.McKay, A Method For Registration Of 3-D Shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- [Bolles1986] R.Bolles, R.Horaud, 3DPO: A three-dimensional part orientation system, International Journal of Robotics Research, Vol.5, Issue 3, pp.3-26, 1986.
- [Chen2007] H.Chen, B.Bhanu, 3D Free-Form Object Recognition in Range Images Using Local Surface Patches, Pattern Recognition Letters, Vol.28, Issue 10, pp.1252-1262, 2007.
- [Chetverikov2002] D.Chetverikov,D.Svirko, D.Stepanov, P.Krsek, The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm, Proceedings. International Conference on Pattern Recognition (ICIP), Vol.3, pp.545-548, 2002.
- [Choi2012] C.Choi, Y.Taguchi, O.Tuzel, M.Liu, S.Ramalingam, Voting-Based Pose Estimation for Robotic Assembly Using a 3D Sensor, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1724-1731, 2012.
- [Chua1997] C.S.Chua, R.Jarvis, Point Signatures: A New Representation for 3D Object Recognition, International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.25, Issue 1, pp.63-85, 1997.
- [Dorai1995] C.Dorai, A.K.Jain, COSMOS-A Representation Scheme for Free-Form Surfaces, Proceedings. Fifth International Conference on Computer Vision (ICCV), pp.1024-1029, 1995.
- [Drost2010] B.Drost, M.Ulrich, N.Navab, S.Ilic, Model Globally, Match Locally: Efficient and Robust 3D Object Recognition, 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.998-1005, 2010.

## 参考文献 2

- [Fitzgibbon2003] A.W.Fitzgibbon, Robust Registration of 2D and 3D points sets, Image Vision Computing, Vol.21, pp.1145-1153, 2003.
- [Frome2004] A.Frome, D.Huber, R.Kolluri, T.Bulow, J.Malik, Recognizing Object in Range Data Using Regional Point Descriptors, 8th European Conference on Computer Vision, Prague, Czech Republic, pp.224-237, 2004.
- [Germann2007] M.Germann, M.D.Breitenstein, I.K.Park, H.Pfister, Automatic Pose Estimation for Range Images on the GPU, International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling(3DIM), pp.81-90, 2007.
- [Granger2002] S.Granger, X.Pennec, Multi-scale EM-ICP:A Fast and Robust Approach for Surface Registration, European Conference on Computer Vision(ECCV), Vol.2353, pp.418-432, 2002.
- [Guo2013] Y.Guo, F.Sohei, M.Bennamoun, M.Lu, J.Wan, Rotational Projection Statistics for 3D Local Surface Description and Object Recognition, International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.105, Issue 1, pp.63-86, 2013.
- [Hashimoto1999] 橋本学, 黒田伸一, 鷺見和彦, 宇佐美照夫, 仲田周二, シーン仮説と入力画像の大局的画像整合性評価に基づく複数物体の認識, 電学論D-II, Vol.J82-D-II(12), pp.2288-2297, 1999.
- [Hetzl2001] G.Hetzl, B.Leibe, P.Levi, B.Schiele, 3D Object Recognition from Range Images using Local Feature Histograms, Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.II-394-II-399, 2001.
- [Horn1984] B.K.P.Horn, Extended Gaussian Images, Proceedings of the IEEE, Vol.72, No.12, pp.1671-1686, 1984.
- [Ikeuchi1993] K.Ikeuchi, S.B.Kang, Assembly Plan from Observation, AAI Technical Report FS-93-04, pp.115-119, 1993.
- [Ioannou2012] Y.Ioannou, B.Taati, R.Harrap, M.Greenspan, Difference of Normals as a Multi-scale Operator in Unorganized Point Clouds, International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), pp.501-508, 2012.
- [Johnson1997] A.E.Johnson, M.Hebert, Surface Registration by Matching Oriented Points, Proceedings. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp.121-128, 1997.
- [Johnson1999] A.E.Johnson, M.Hebert, Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), pp.433-449, 1999.
- [Kaneko2003] S.Kaneko, T.Kondo, A.Miyamoto, Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation, Pattern Recognition, vol.36, pp.2041-2047, 2003.
- [Liu2010] M.Liu, O.Tuzel, A.Veeraraghavan, R.Chellappa, A.Agrawal, H.Okuda, Pose Estimation in Heavy Clutter using a Multi-Flash Camera, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2028-2035, 2010.

## 参考文献 3

- [Marton2010] Z.Marton, D.Pangeric, R.B.Rusu, A.Holzbach, M.Beetz, Hierarchical Object Geometric Categorization and Appearance Classification For Mobile Manipulation, IEEE-RAS Proc. International Conference on Humanoid Robots (ICHR), pp.365-370, 2010.
- [Mian2010] A.Mian, M.Bennamoun, R.Owens, On the Repeatability and Quality of Keypoints for Local Feature-based 3D Object Retrieval from Cluttered Scenes, International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.89, Issue 2-3, pp.348-361, 2010.
- [Murase1994] 村瀬洋, シュリーナイヤー, 2次元照合による3次元物体認識-パラメトリック固有空間法-, 電学論D-II, Vol.J77-D-II, No.11, pp.2179-2187, 1994.
- [Nagase2014] 永瀬誠信, 秋月秀一, 橋本学, CCDON: ばら積み部品の高速・高信頼な6自由度位置姿勢推定のための局所特徴量, Vol.80, No.12, 精密工学会誌, 2014.
- [Nuchter2007] A.Nuchter, K.Lingemann, J.Hertzberg, Cached K-d Tree Search For ICP Algorithms, International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp.419-426, 2007.
- [Park2010] I.K.Park, M.Germann, M.D.Breitenstein, H.Pfister, Fast and Automatic Object Pose Estimation for Range Images on the GPU, Machine Vision and Applications, Vol.21, No.5, pp.749-766, 2010.
- [Petrelli2011] A.Petrelli, L.D.Stefano, On the Repeatability of the Local Reference Frame for Partial Shape Matching, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp.2244-2251, 2011.
- [Phillips2007] J.M.Phillips, R.Liu, C.Tomasi, Outlier Robust ICP for Minimizing Fractional RMSD, Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp.427-434, 2007.
- [Rusu2008] R.B.Rusu, N.Blodow, Z.C.Marton, M.Beetz, Aligning Point Cloud Views using Persistent Feature Histograms, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS), pp.22-26, 2008.
- [Rusu2010] R.B.Rusu, G.Bradschi, R.Thibaux, J.Hsu, Fast 3D Recognition and Pose Using the Viewpoint Feature Histogram, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS), pp.2155-2162, 2010.
- [Sakuramoto2014] 櫻本泰憲, 兼松裕一, 秋月秀一, 橋本学, 渡邊清高, 関真規人, Coded Multi Flash Imagingによる3次元凹凸構造特徴マッチング, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW), 2014.
- [Shibata2013] Yutaro Shibata, Manabu Hashimoto, An Extended Method of the Parametric Eigenspace Method by Automatic Background Elimination, Proceeding of 19th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV), pp.246-249, 2013.
- [Shin2007] J.Shih, C.Lee, J.T.Wang, A New 3D Model Retrieval Approach Based on the Elevation Descriptor, Pattern Recognition, Vol.40, pp.283-295, 2007.

## 参考文献 4

- [Sumi1997] 角保志, 富田文明, ステレオビジョンによる3次元物体の認識, 信学論D-II, Vol.J80-D-II, No.5, pp.1105-1112, 1997.
- [Tateno2011] 立野圭祐, 小竹大輔, 内山晋二, ピンピックアップのための距離・濃淡画像を最ゆうに統合する高精度高安定なモデルフィッティング手法, 信学論D, vol.J94-D, No.8, pp.1410-1422, 2011.
- [Takeguchi2001] 武口智行, 金子俊一, 近藤司, 五十嵐悟, 距離アスペクト画像の2次元照合によるロバスト物体認識, 電学論D-II, Vol.J84-D-II, No.8, pp.1710-1721, 2001.
- [Takei2014] 武井翔一, 秋月秀一, 橋本学, 識別性能の予測評価に基づく選択的特徴量を用いた物体認識, 第20回画像センシングシンポジウム (SSII), pp.IS2-06-1-6, 2014.
- [Tombari2010] F.Tombari, S.Salti, L.D.Stefano, Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description, European Conference on Computer Vision (ECCV), pp.356-369, 2010.
- [Ulrich2009] M.Ulrich, C.Wiedemann, C.Steger, CAD-Based Recognition of 3D Objects In Monocular Images, Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2090-2097, 2009.
- [Zaharescu2009] A.Zaharescu, E.Boyer, K.Varanasi, R.Horaud, Surface Feature Detection and Description with Applications to Mesh Matching, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.373-380, 2009.
- [ZinBer2003] T.ZinBer, J.Schmidt, H.Niemann, A Refind ICP Algorithm for Robust 3-D Correspondence Estimation, Proceedings. International Conference on Image Processing (ICIP), Vol.3, pp.II-695-8, 2003.