高速物体検出

～ ロボットに使える2次元・3次元センシング ～

中京大学　　橋本 学

mana@isl.sist.chukyo-u.ac.jp
http://isl.sist.chukyo-u.ac.jp/

本日の話題

第1部　2次元画像センシング

1. テンプレートマッチングの基礎技術
2. テンプレートマッチングのロバスト化と高速化
3. 研究紹介　～参照データの戦略的削減とその展開～

第2部　3次元画像センシング

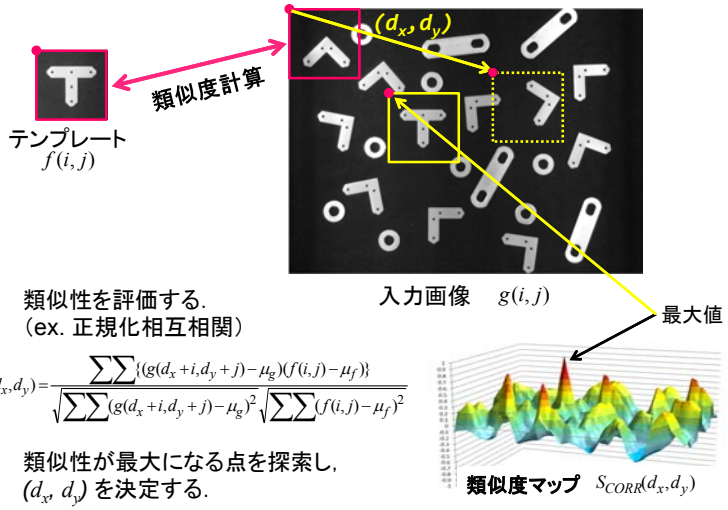
1. 3次元物体認識の動向および主要な技術
2. 研究紹介　～データの独自性に着目した物体認識～

第1部　2次元画像センシング

テンプレートマッチングの基本原理

[Rosenfeld1969]

画素どうしの比較によって，類似度最大の位置を見つける．

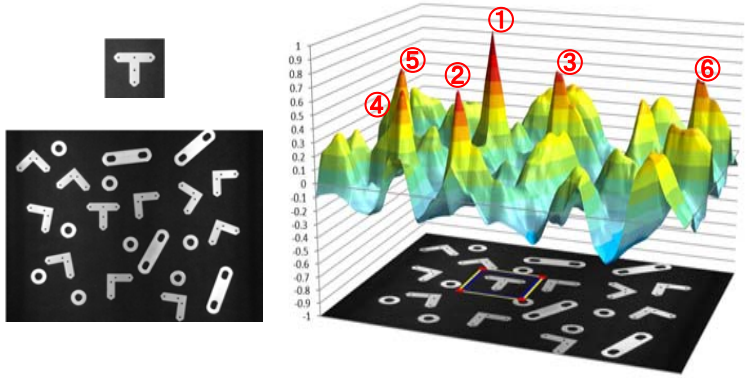


Step1:　類似性を評価する．
（ex. 正規化相互相関）

$$S_{CORR}(d_x,d_y)=\frac{\sum\sum\{(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)(f(i,j)-\mu_f)\}}{\sqrt{\sum\sum(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)^2}\sqrt{\sum\sum(f(i,j)-\mu_f)^2}}$$

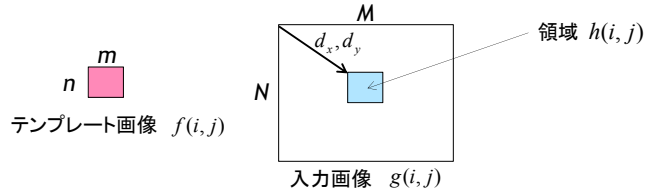
Step2:　類似性が最大になる点を探索し，
(d_x, d_y) を決定する．

類似度マップと検出結果



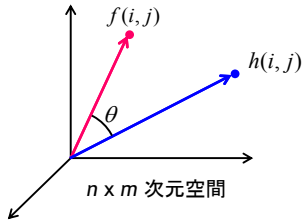
類似度尺度① 正規化相互相関

正規化相互相関 *Normalized Cross-Correlation*



$$S_{NCC}(d_x,d_y)=\frac{\sum\sum\{g(d_x+i,d_y+j)f(i,j)\}}{\sqrt{\sum\sum(g(d_x+i,d_y+j))^2}\sqrt{\sum\sum(f(i,j))^2}}$$

$$\cos(\theta)=\frac{\vec{f}\cdot\vec{h}}{|\vec{f}||\vec{h}|}$$ （内積の定義）



- 2つの画像領域が似ているほどθが小さい．すなわち，cos(θ)は0に近づく．
- $h(i,j)$ の長さ（ゲイン）変動を吸収できる（同じ類似度を出力する）．
- ただし，2つの画像領域の平均値が異なるときには，類似度は1にならない．

類似度尺度② 相互相関係数

相互相関係数（統計量） *Zero-means Normalized Cross-Correlation*

$f(i,j)$ と $h(i,j)$ を，それぞれ画像領域内の濃度値分布と考え，統計量としての相互相関係数を類似度尺度とする．

$$S_{ZNCC}(d_x,d_y)=\frac{\sum\sum\{(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)(f(i,j)-\mu_f)\}}{\sqrt{\sum\sum(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)^2}\sqrt{\sum\sum(f(i,j)-\mu_f)^2}}$$

μ_f ，μ_g は，それぞれ領域内の濃度値の平均値

- データ群 f と g の各平均からのずれを表すベクトルがなす角の余弦である．
- ベクトル間距離ではなく角度をみているから，正規化相互相関（NCC）と同様にゲイン変動に強い．
- 平均値を引いているので，2つの画像領域の平均値が異なっていても類似度が1になる（平均明るさ変動を吸収できる）．

一般的には，NCCよりもZNCCがよく使われる．

類似度尺度② 相互相関係数の計算量削減

$$S_{ZNCC}(d_x,d_y)=\frac{\sum\sum\{(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)(f(i,j)-\mu_f)\}}{\sqrt{\sum\sum(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)^2}\sqrt{\sum\sum(f(i,j)-\mu_f)^2}}$$

f と g の共分散

f と g それぞれの標準偏差

- プログラムによる実行時には，平均値を求めるために1パス，さらにそれを用いてZNCC値を計算するために1パス，合計2回の2重ループ計算が必要．
- 分母，分子は，標準偏差または分散値になっているから，よく知られた以下の公式により計算量を削減できる．

分散 ＝ 標準偏差の2乗 ＝（データの2乗の平均値）ー（データの平均値の2乗）

$$V=\sigma^2=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(x_k{}^2)-(\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}x_k)^2$$

この式は，分散値と標準偏差を，同時に1パス（1回のループ処理）で計算できることを示している．

類似度尺度③ 差の2乗和，差の絶対値和

差の2乗和　*Sum of Squared Difference*

$$S_{SSD}(d_x,d_y)=\sum\sum(g(d_x+i,d_y+j)-f(i,j))^2$$

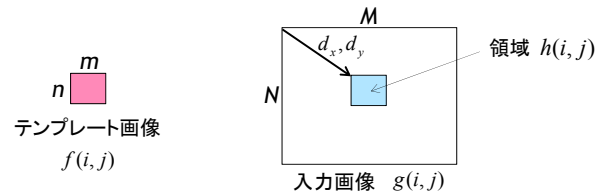
差の絶対値和　*Sum of Absolute Difference*

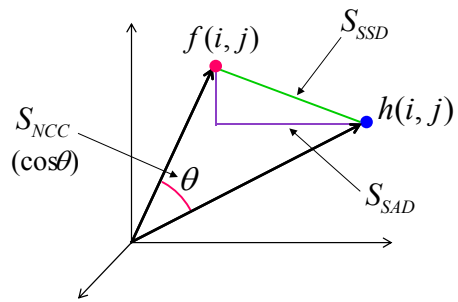
$$S_{SAD}(d_x,d_y)=\sum\sum|g(d_x+i,d_y+j)-f(i,j)|$$

似ているほど小さな値になるので相違度と呼ばれる．

- SSDは正規化項を含まないので，NCCやZNCCより計算量が少ない．
- SADは乗算を含まないので，さらに計算負荷が小さい．
- いずれの尺度も，明るさ変動には弱い傾向がある．

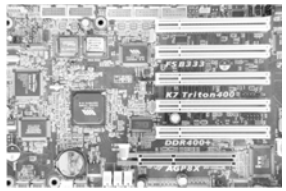
類似度尺度の関係





計算コスト比較

テンプレート画像（71x55）



入力画像（600x400）

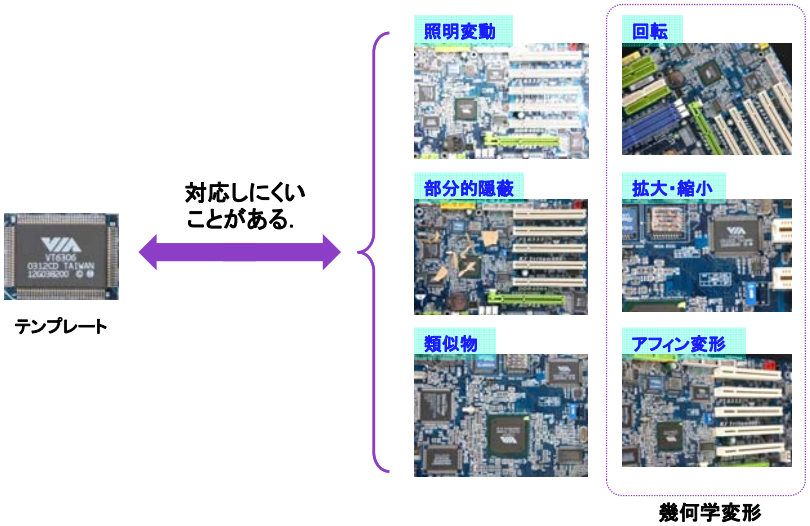
手法	処理時間　[ms]
SAD	926
SSD	1695
NCC	695
ZNCC	3017
ZNCC（計算量削減）	739

※CPU：Intel®CORE™i7（3.40GHz），システムメモリ：16GB，OS：Ubuntu10.04，
言語：C言語，コンパイラ：gcc ver.4.4.3 （最適化オプション-O あり），SSE機能使用せず．

テンプレートマッチングの主な課題

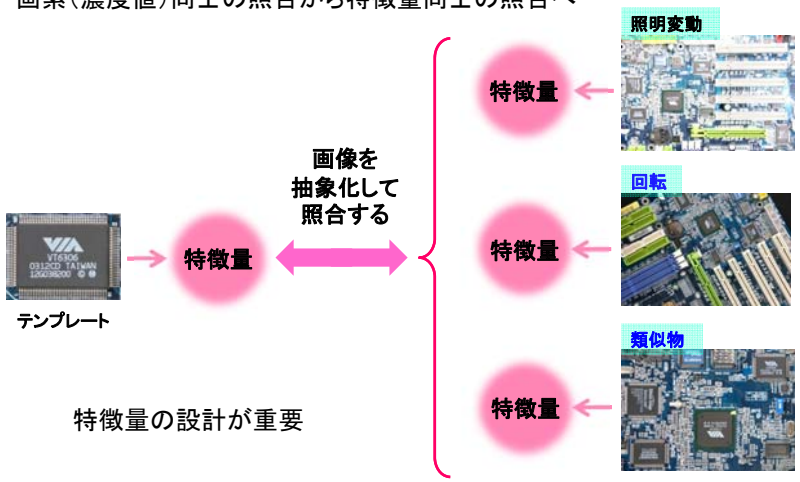
1. ロバスト化
2. 高速化
3. 高精度化

ロバスト化に関する課題



ロバスト化の基本的な考え方

変動の影響が少ない特徴量で抽象化する.
画素(濃度値)同士の照合から特徴量同士の照合へ



特徴量の設計が重要

ロバスト化に関する主な研究例

単純な抽象化の例

画像の2値化

[Tubbs1989]

その他の主な研究

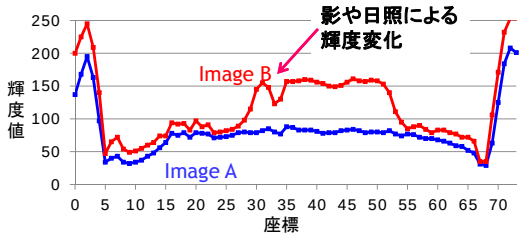
1. Transformation Ring Projection [Tang1991]
2. Local Binary Patterns [Ojala1994]
3. 3値輪郭表現 [Sumi1995]
4. 定性的3値表現 [Yamaguchi2002]
5. 増分符号相関 [Murase2000]
6. 確率的増分符号相関 [Mita2005]
7. 選択的正規化相関 [Satoh2001]
8. 方向符号照合 [Ullah2001]
9. Radial Reach Correlation(Filter) [Sato2003]
10. 部分テンプレートの幾何学的組み合わせ [Okuda2004]
11. 統計的リーチ特徴 [Iwata2009]
12. Dominant Orientation Templates [Hinterstoisser2010]
13. SRFによるサンプル学習型画像照合 [Ozaki2010]
14. Grayscale Arranging Pairs [Zhao2011]
15. 固有値分解テンプレート法 [Kouotaki2011]
16. Diverse Density に基づくキーポイント抽出法 [Yuasa2013, Yoshioka2011]

増分符号相関(ISC：Increment Sign Correlation)

[Murase2000]

■ 水平方向の輝度値の増減を2値符号で表現し，画像化する.

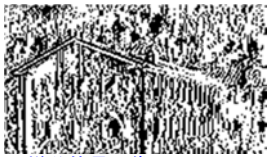
Image A　Image B



輝度プロファイルの比較

増分符号画像

$$b(i,j)=\begin{cases}1 & \text{if } f(i+1,j)-f(i,j)\geq 0\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}$$



増分符号画像(Image A)

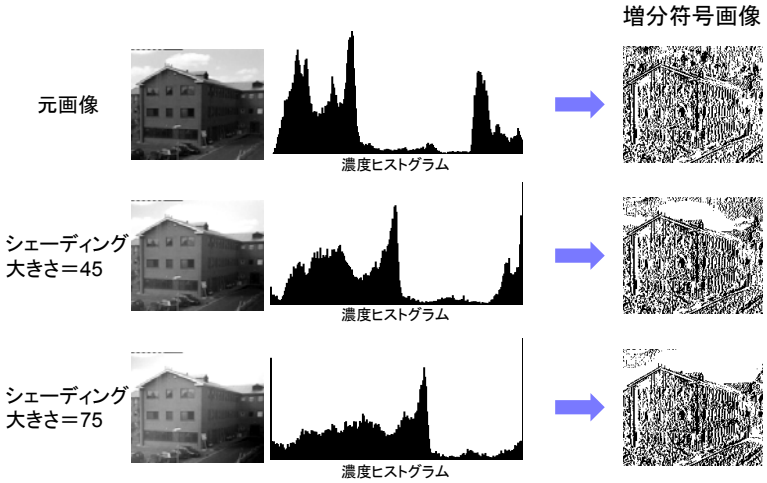
増分符号画像(Image B)

符号の一致性を評価することで照明変動にロバスト

参考文献:村瀬一朗，金子俊一，五十嵐悟，“増分符号相関によるロバスト画像照合”，信学論D-II，Vol.J83-D-II，No.5，pp.1323-1331，2000.
使用データ:PETS2001 DATASET3

増分符号表現

[Murase2000]

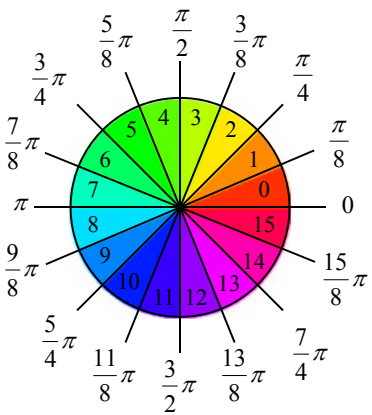


参考文献:村瀬一朗，金子俊一，五十嵐悟，“増分符号相関によるロバスト画像照合”，信学論D-II，Vol.J83-D-II，No.5，pp.1323-1331，2000.
使用データ:PETS2001 DATASET3

方向符号照合（OCM：Orientation Code Matching）

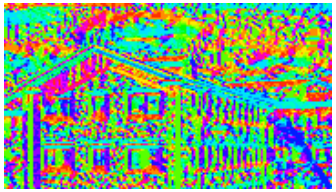
[Ullah2001]

- 輝度勾配の方向を量子化して符号化



方向符号（16分割の場合）

入力画像

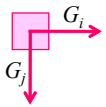


方向符号画像

参考文献:F. Ullah, S. Kaneko, and S. Igarashi, “Orientation code matching for robust object search”, IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E84-D, No.8, pp.999-1006, 2001.
使用データ:PETS2001 DATASET3

方向符号表現

- 注目画素の近傍情報をもとに，勾配方向をコード化



$$\underbrace{G_i = \frac{\partial f(i,j)}{\partial i}, \quad G_j = \frac{\partial f(i,j)}{\partial j}}$$ （画像の1次微分値）

$$\theta(i,j) = \tan^{-1}(G_j / G_i)$$ （最大濃度勾配方向）

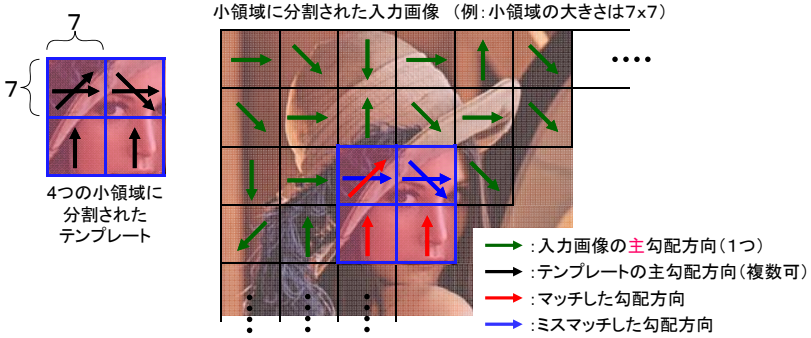
$$c(i,j) = \begin{cases} \left[\dfrac{\theta(i,j)}{\Delta\theta}\right] & \text{if } |G_i| + |G_j| \geq \varepsilon \\ \mathrm{N} & \text{otherwise} \end{cases}$$ （コントラスト確保のためのしきい値）

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N}$$ （方向分割ピッチ）

DOT：Dominant Orientation Templates

[Hinterstoisser2010]

- テンプレートと入力画像それぞれを小領域に分割し，主勾配方向を求めてコード化．これらの一致度をもとに照合する．
  - 勾配方向は8種類（7方向+無勾配フラグ）に量子化して，1/0 で表現．
  - ビット演算による高速照合．



出典:S. Hinterstoisser, V. Lepetit, S. Illic, P. Fua, N. Navab, “Dominant Orientation Templates for Real-Time Detection of Texture-Less Objects”, Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR），pp.2257-2264, 2010.

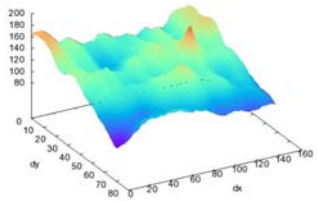
高速化の基本的な考え方

TMの基本ステップ　　3つのアプローチ

Step 1:　類似度マップを生成

$$S_{CORR}(d_x,d_y)=\frac{\sum\sum\{(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)(f(i,j)-\mu_f)\}}{\sqrt{\sum\sum(g(d_x+i,d_y+j)-\mu_g)^2}\sqrt{\sum\sum(f(i,j)-\mu_f)^2}}$$

類似度マップ



1. 計算量が少ない類似性尺度

2. 全ての画素を使わない
（画素の取捨選択）

3. 類似度マップ作成を省略する
≒山登り探索型

Step 2:　類似度マップからピーク位置を検出

高速化に関する研究例

計算量が小さい類似度尺度を採用する

差の絶対値の総和（相違度）　$S_{SAD}(d_x,d_y)=\sum\sum|g(d_x+i,d_y+j)-f(i,j)|$

類似度マップ作成を省略する

1. SSDA（類似度計算の打ち切り）　[Barnea1972]
2. ピラミッド探索（Coarse-to-Fine探索）　[Tanimoto1975, Rosenfeld1977]
3. アクティブ探索　[Murase1998]

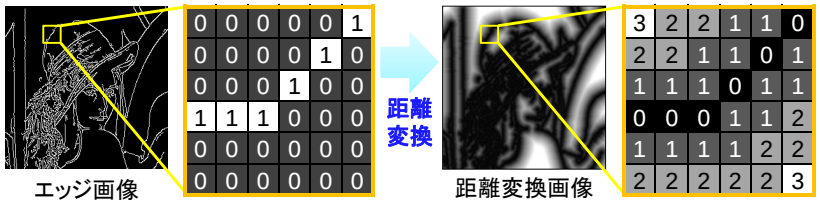
すべての画素を使わない（有効画素の選択）

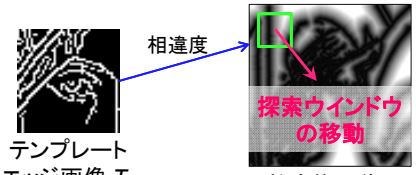
1. Chamfer Matching　[Barrow1977]
2. Oriented Chamfer Matching　[Jamie2008]
3. Boosting Chamfer Matching　[Ma2010]
4. 輪郭情報を用いたマッチング　[Hashimoto1991]
5. 自己相関類似度マップを元にした画素選択　[Hashimoto1995]
6. 分散階層化テンプレートマッチング　[Hirooka1997]
7. 全画素使用時と同等性能になる画素選択　[Saito2001]
8. 粗テンプレートマッチング　[Matsubara2005]
9. 顕著点同士の照合　[Lee2011]
10. 独自性の高い周波数成分の利用　[Wu2011]
11. 濃度共起確率を用いた画素選択　[Hashimoto2011]
12. 画像間共起確率を用いた安定画素選択　[Hashimoto2011, Saito2013]
13. 周辺の偽物体との識別性を考慮した画素選択　[Sakuramoto2012]

Chamfer Matching

[Barrow1977]

- エッジと距離変換を用いた高速マッチング手法
  相違度の勾配情報から探索の方向と移動量を決定





相違度

$$S=\sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}T_E(i,j)I_{DT}(i,j)$$

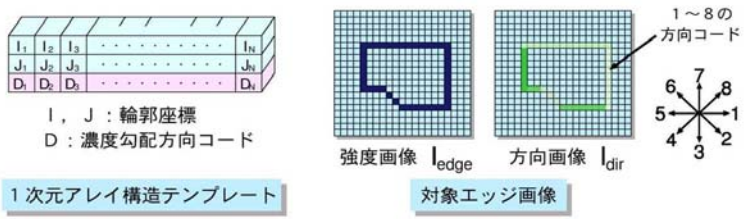
探索方向と移動量の
推定により，探索効率を向上

参考文献:H. Barrow, J. Tenenbaum, R. Bolles and H. Wolf, "Parametric correspondence and chamfer matching: Two new techniques for image matching", In Int'l Joint Conf. of Artif. Intel., pp. 659-663, 1977.

輪郭テンプレートマッチング

[Hashimoto1991]

- 認識対象の輪郭のみを1次元アレイに格納して使用.
- エッジ画像の重み付き膨張と方向勾配コードの利用により，信頼性を確保.
- テンプレート全画素を用いる手法と比べて，約20倍の高速化.



類似度 $S_{EPTM}(d_\theta,d_x,d_y)=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\{I_{edge}(i_k,j_k)\cdot\delta(D_k,I_{dir}(i_k,j_k))\}$

$i_k=I_k\cos d_\theta - J_k\sin d_\theta + d_x$

$j_k=I_k\sin d_\theta + J_k\cos d_\theta + d_y$

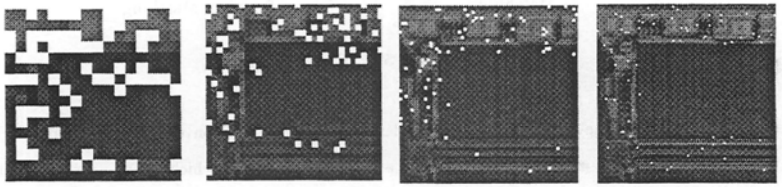
δ：方向コードの一致度
一致 →1
不一致→0

参考文献:橋本，鷲見，坂上，川戸，"輪郭点情報を用いた高速テンプレートマッチングアルゴリズム"，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J74-D-II, No.10, pp.1419-1427, 1991.

分散階層化テンプレートマッチング

[Hirooka1997]

ピラミッドマッチングを適用し，階層ごとに最適な画素群を選択



16x16画素	32x32画素	64x64画素	128x128画素
(a)template for 1/8 resolution (63 points)	(b)template for 1/4 resolution (66 points)	(c)template for 1/2 resolution(61 points)	(d)template for 1/1 resolution(65 points)
25%	6.4%	1.5%	0.4%

4階層全体としての高速化は，従来比　約40倍

参考文献:M. Hirooka, K. Sumi, M. Hashimoto, H. Okuda, S. Kuroda, "Hierarchical Distributed Template Matching", Proceeding of SPIE Symposium on Electronic Imaging & Science and Technology, Vol.3029, pp.176-182, 1997.

テンプレートマッチングの性能評価の観点

基本性能

1. ロバスト性　（照明，アフィン，隠蔽，背景変動・・・）
2. 高速性
3. 精度

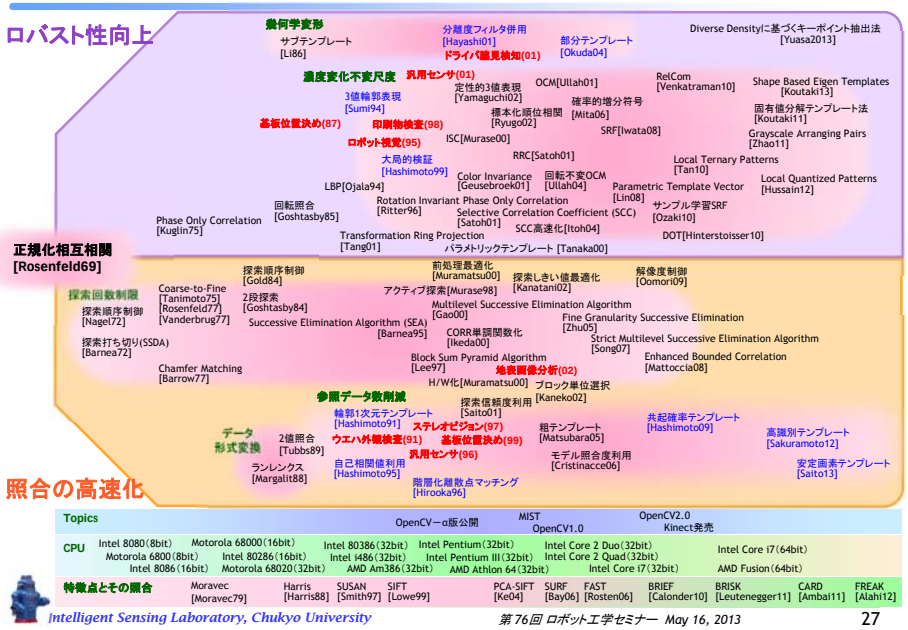
Trade-off（1.〜3.）

Trade-off（2.〜3.）

実用化において無視できない性能

4. 省メモリ
5. 類似度マップの探索しやすさ （研究例が少ない）
6. パラメータの少なさ，調整の容易さ
7. 汎用性　（どんな画像にも対応，画像サイズ，テクスチャの多寡・・・）

テンプレートマッチング研究マップ　～ロバスト化と高速化の観点から～



画素数削減テンプレートマッチング（CPTM）とその展開

濃度共起確率に基づく画素数削減とテンプレートマッチングの高速化（CPTM）

2009～2011

戦略的画素数削減

2次元画像照合のロバスト化・高機能化
- ①画像間共起に基づく照明ロバスト化 *2011*
- ②CPTMの3値増分符号化 *2012*
- ③画像の周波数構造に基づく画素選択 *2012*
- ④投票処理に基づくCPTMの回転対応 *2013*
- ⑤異種画像統合による高信頼物体認識 *2013*
- ⑥周辺類似物との識別性能強化 *2012*

3次元物体認識
- ①低テクスチャ画像への拡張 *2012*
- ②ユニークエッジによるアピアランスベース3次元物体認識 *2012*
- ③CADモデルからの特徴的局所領域の抽出とロボットビジョンへの応用 *2012*
- ④特徴的ベクトルペアマッチング *2012*
- ⑤準リアルシーン学習によるベクトルペアマッチングの高信頼化 *2013*

画素以外への適用
- ①SIFTキーポイントの効果的削減 *2011*
- ②剛体追跡のためのサブトラッカ選択 *2011*

濃度共起確率に基づく画素数削減と テンプレートマッチングの高速化

～共起確率を用いた画素の削減～

CPTM : Co-Occurrence Probability Template Matching

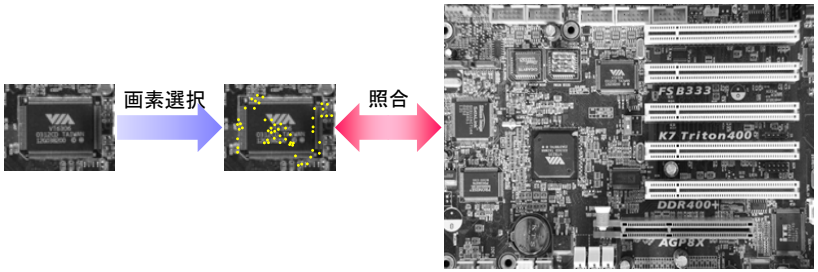
Hashimoto, *et al.*: Extraction of Unique Pixels based on Co-occurrence Probability for High-speed Template Matching, ISOT2010, MVI-3, 2010.
橋本ほか： 濃度共起確率に基づくユニークな画素群を用いた高速画像マッチング，電気学会論文誌D, Vol.131, No.4, 2011.

研究の目的

- 目的
  - できるだけロバスト性を低下させずに超高速化を図る.
- 前提
  - 画素単位の照合を扱う
  - 1枚のテンプレート画像のみを使用する.

高速化の基本戦略

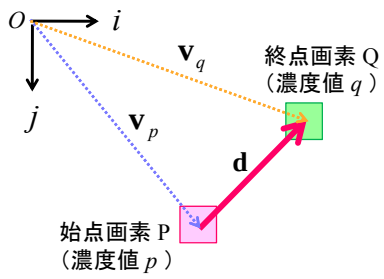
- テンプレート画像内の全ての点を使わない.
- 厳選された画素だけを使用する.
- テンプレート画像を代表できる画素を選択する.
  ＝ 独自性の高い画素



- 濃度発生確率に基づいて画素（群）の独自性を評価

最も簡単な濃度共起ヒストグラム （2画素の場合）

- 始点と終点からなるパターンを考え，濃度ペアの発生頻度を共起ヒストグラム $h_2(p, q)$ として表現する（Co-occurrence matrix）.

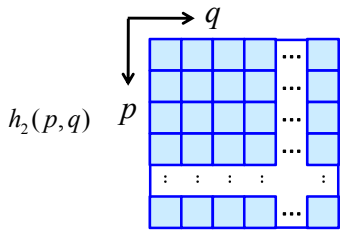


$$h_2(p,q,\mathbf{d}) = \sum_{\mathbf{d}\in R_2}\sum \delta_2$$

$$\begin{cases} if \ \{f(\mathbf{v}_p)=p\} \cap \{f(\mathbf{v}_q)=q\} & \text{then } \delta_2 = 1 \\ else & \delta_2 = 0 \end{cases}$$

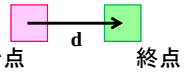
$$\mathbf{v}_q = \mathbf{v}_p + \mathbf{d}$$

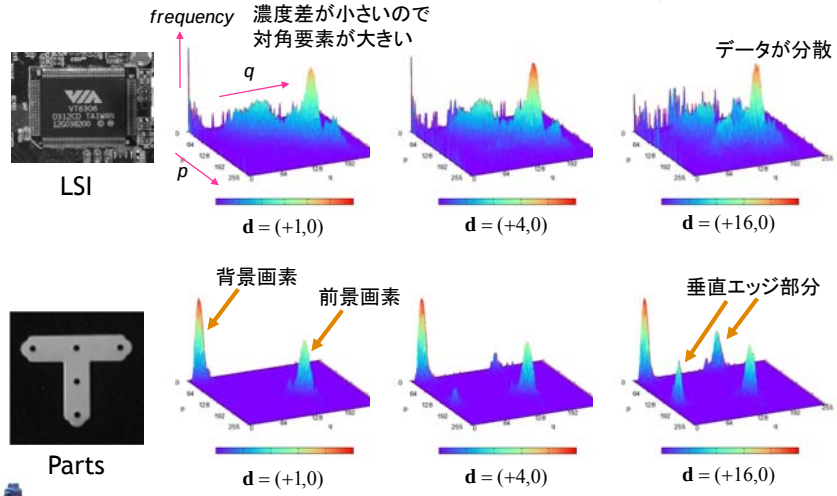
変位ベクトル $\mathbf{d}$ ：
共起性を測る方向と距離を指定



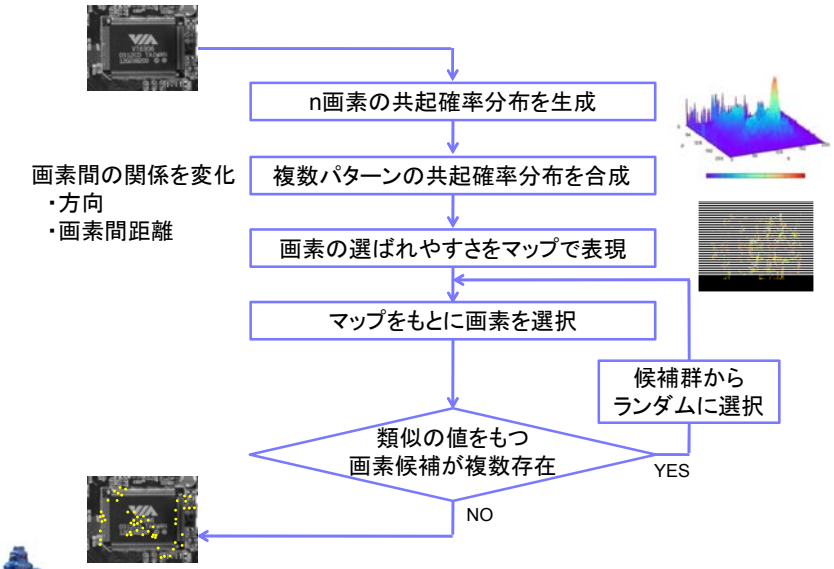
共起ヒストグラム h_2 の例　（発生確率分布）

■ 水平2画素の共起ヒストグラムの場合





画素選択アルゴリズム



実験　マッチング性能の評価

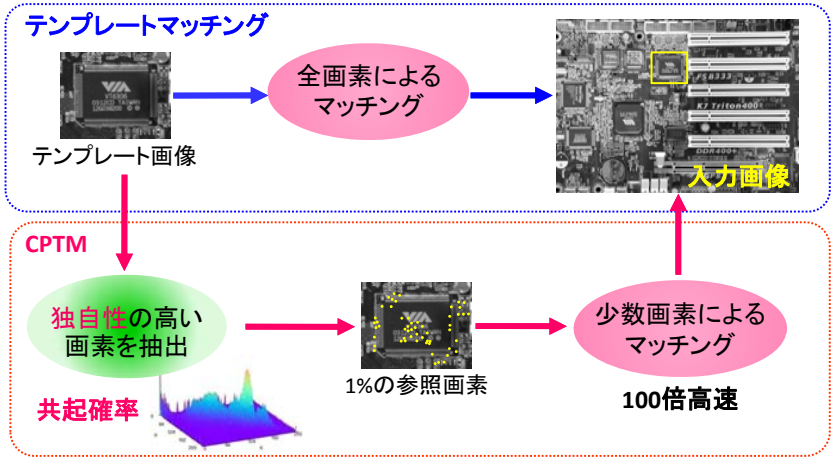
(a) Parts　M=97 (0.7%)　(b) Rabbit　M=5 (0.05%)　(c) Traffic Sign　M=235 (3.0%)

ISL Intelligent Sensing Laboratory, Chukyo University

画像間共起確率に基づく
照明変動にロバストなテンプレートマッチング

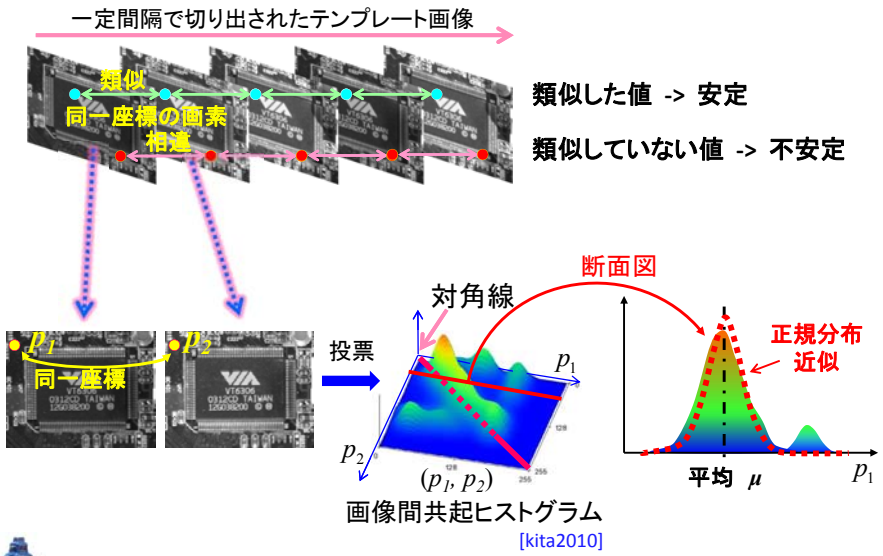
- M. Saito, M. Hashimoto, Robust Image Matching for Irregular Illumination Variation based on Spatio-Temporal Analysis of Image Intensity, Proceeding of International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT), 2012.
- 斎藤正孝，橋本学，濃度共起分析に基づく安定画素テンプレートを用いた照明変動にロバストな高速画像照合，電学論C，印刷中，Vol.133,No.5, 2013.

CPTMの問題点

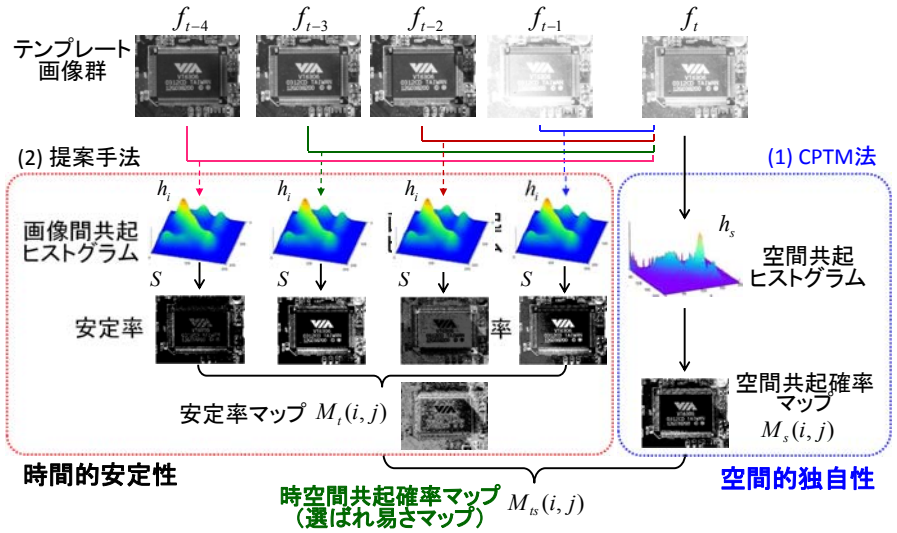


- 多様な照明変動に追従できない
  - テンプレート画像1枚のみから参照画素を選択することの限界
  - ➡ 複数のテンプレート画像から安定した参照画素を選択する

画素安定性推定のアイデア

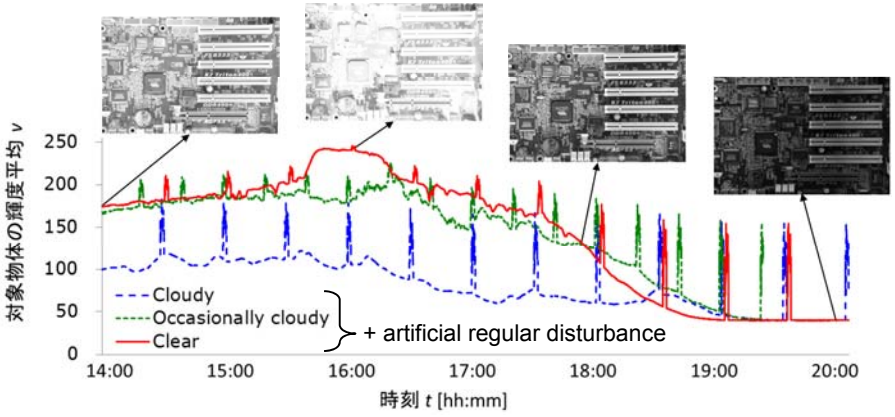


安定かつ独自画素の選択アルゴリズム



- 空間的に独自性が高くかつ時間的に安定した参照画素が選択可能

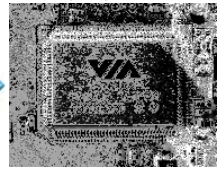
実験に用いた連続写真（プリント基板）



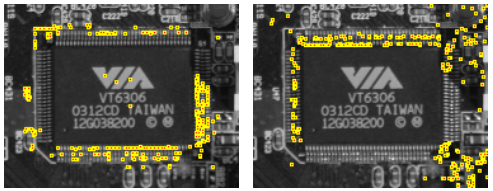
画素選択結果

テンプレート画像群の例 （サイズ185x145）

安定率マップ



選択された参照画素（黄点）



従来法（CPTM法）　　提案手法

- 安定率マップの効果により安定率の高い参照画素が増加

関連手法との比較

画素選択方法	参照画素数[pixel]	認識率[%]	処理時間[msec]
(1) SSD	26825	61.2	5896
(2) ZNCC	26825	100.0	8829
(3) ISC	26680	100.0	3806
(4) SIFT	27 [point]	94.2	2044
(5) SURF	27 [point]	84.5	628
(6) Random	27	68.1	15
(7) Gradient	27	85.4	15
(8) Canny	27	88.6	15
(9) IRFET(事前にコントラスト拡張)	27	88.6	15
(10) CPTM	27	69.5	15
(11) Stability	27	92.8	15
(12) Proposed method	**27**	**97.7**	**15**

※CPU：Intel®CORE™i7（2.80GHz），システムメモリ：8GB，OS：Windows 7

- 提案手法は同じ参照画素数を用いた手法の中で最も認識成功率が高い
- 全画素を用いた手法と比べて200倍以上高速

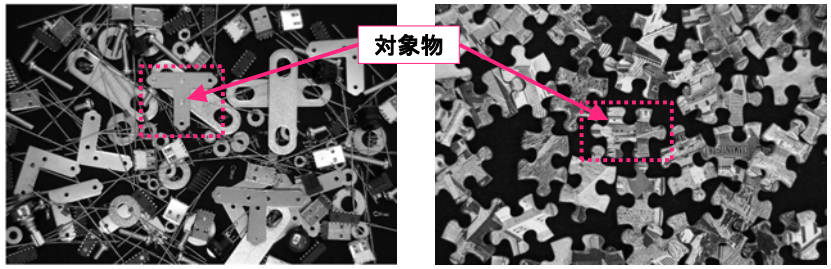
ISL Intelligent Sensing Laboratory, Chukyo University

識別に有効な画素を用いる テンプレートマッチング

- 櫻本，斎藤，橋本，対象物と類似物の識別性能を最大化する画素群を用いた高速テンプレートマッチング，第15回画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2012），IS1-75, 2012/8.
- 櫻本，斎藤，橋本，対象物体の顕著性分析による周辺類似物との分離度を最大化する高速物体検出，DIA2012, pp.44-49, 2012/3.

課題

紛らわしい類似物に囲まれた目的物体の検出



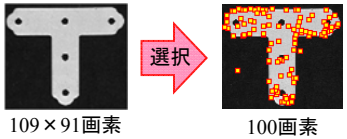
類似物との誤照合の要因

CPTM法で選択された画素群は，テンプレート画像の内部では独自性が高いが，
周辺の偽物体にも同様の画素が含まれていることがある．

基本アイデア

1. テンプレート画像中からごく少数の画素群を選択

➡ 処理速度向上



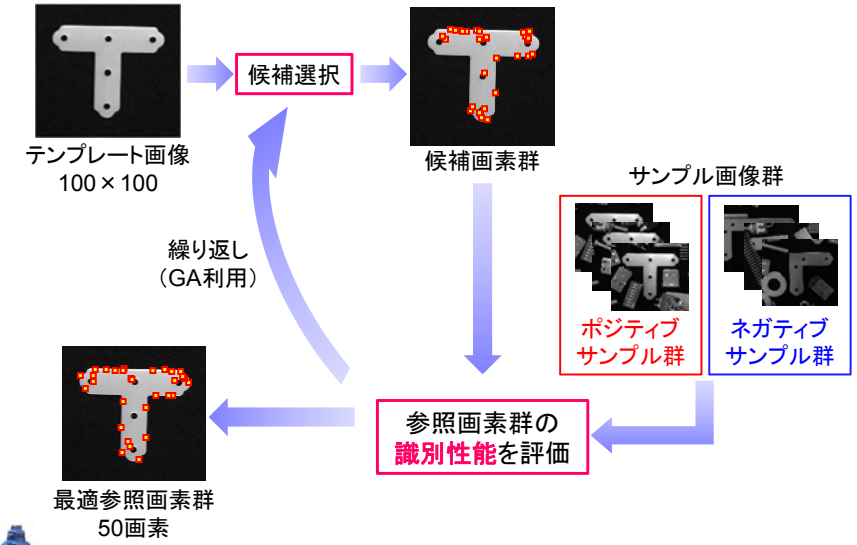
2. 対象物のみを特徴づける画素群を選択

➡ 識別性能向上

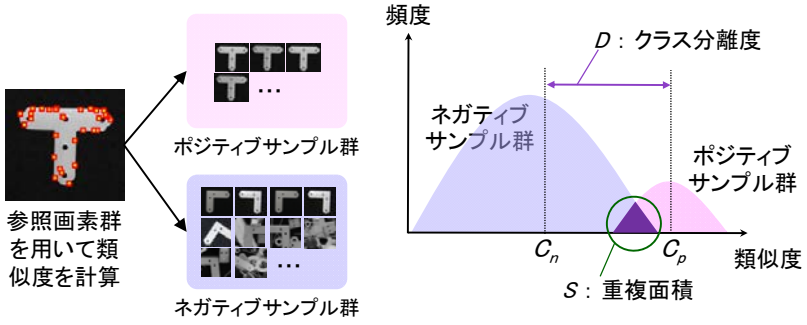
（周辺物が対象と似ていない場合）

（周辺物が対象と似ている場合）

識別に有効な画素選択アルゴリズム



識別性能の評価



C_p：ポジティブサンプル群の代表値
C_n：ネガティブサンプル群の代表値

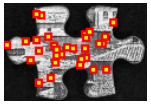
識別性能を表す目的関数

$$F = w_1 \frac{1}{S+\varepsilon} + w_2 D$$

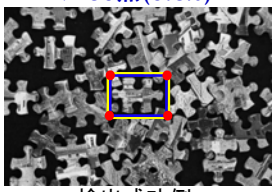
➡ 最大化

重複面積　クラス分離度　w_1, w_2 は重み係数

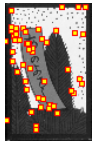
実験結果



パズルのピース
M=30点(0.3%)

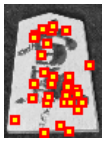


検出成功例

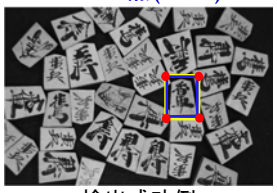


カード
M=30点(0.5%)

検出成功例



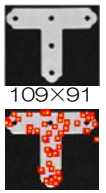
将棋の駒
M=30点(0.3%)



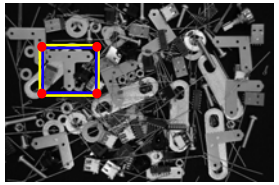
検出成功例

手法	パズルのピース	カード	将棋の駒
提案手法	99%(99枚/100枚)	99%(99枚/100枚)	99%(99枚/100枚)
全画素法	93%(93枚/100枚)	100%(100枚/100枚)	100%(100枚/100枚)

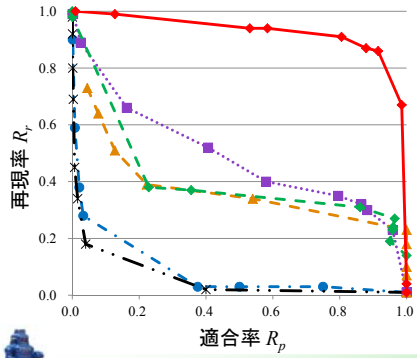
実験結果



109×91



実験画像（600×400）



画素選択方法	参照画素数 [pixel]	認識率 [%]	処理時間 [sec]
(1) 全画素法	9919	60.0	1985
(2) SIFT[3]	60 [point]	1.0	478
(3) SURF[4]	60 [point]	0.0	253
(4) ランダム A	500	39.0	109
(5) ランダム B	150	71.0	32
(6) CPTM法	500	76.0	109
(7) CLAFIC法	60[次元]	68	8769
(8) 提案手法	**60**	**94**	**0.008**

※CPU:Intel®CORE™i7(3.40GHz), システムメモリ:16GB

ISL Intelligent Sensing Laboratory, Chukyo University

第2部　3次元画像センシング

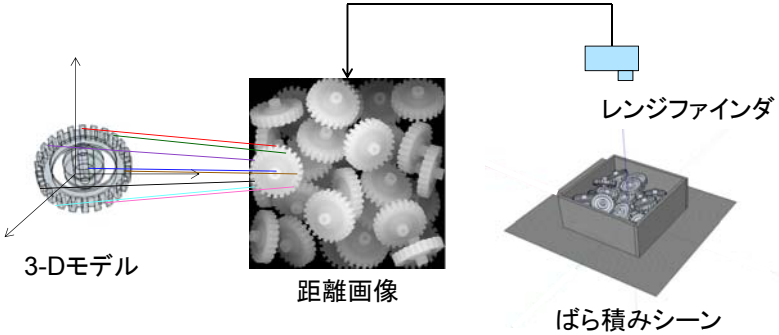
3次元物体認識手法

- モデルベース物体認識
  - 認識対象のモデルを利用して入力データと照合する.
    本セミナーでは，こちらを重点的に紹介します.
- アピアランスベース物体認識
  - 認識対象をさまざまな視点からみた画像群を準備しておき，入力画像と照合する.

近年では，アピアランスベースでもCADモデルからの学習画像自動生成などが試みられており，両者の明確な区別は難しくなっている.

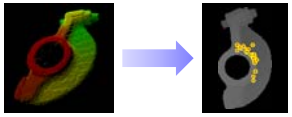
モデルベース物体認識

モデル:　3次元CADモデルなどが利用される.
入力データ:　レンジファインダで撮影された距離画像などが利用される.



モデルベース物体認識の分類

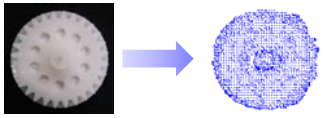
1. キーポイント利用



モデル上のキーポイント単位で照合

Spin Image法	[Johnson1997]
DAI法	[Takeguchi2001]
Local Surface Patches	[Chen2007]
Point Feature Histogram	[Rusu2008]
Point Pair Feature	[Drost2010]
SHOT	[Tombari2010]

2. 非キーポイント利用

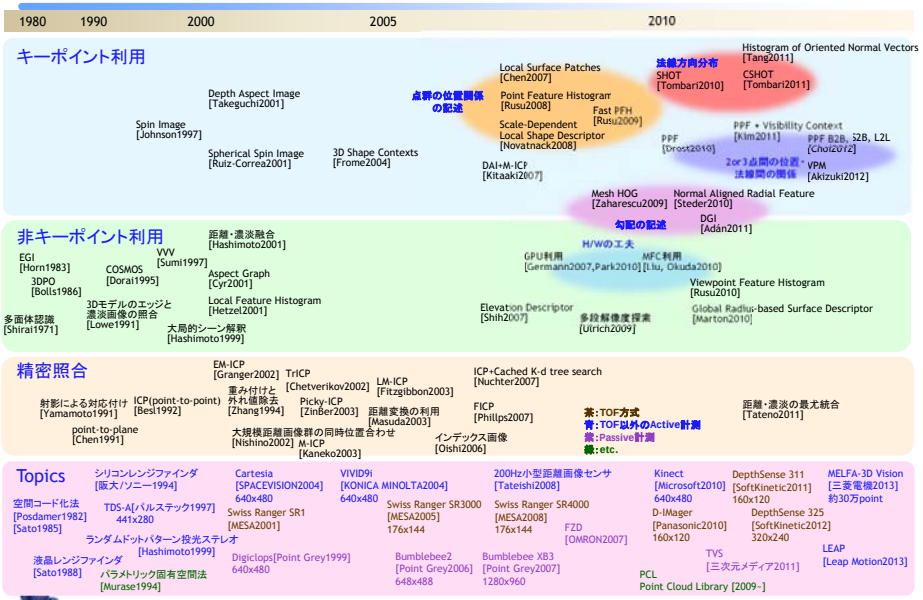


全点，あるいはエッジなど単位で照合

EGI（拡張ガウス像）	[Horn1983]
3DPO	[Bolls1986]
3Dエッジ	[Lowe1991]
VVV	[Sumi1997]
DGI	[Adan2011]

- かつては距離画像そのものを使う手法が主流.
- 最近は高速化のためにキーポイントベースが増えている.
- 特徴記述法が重要.

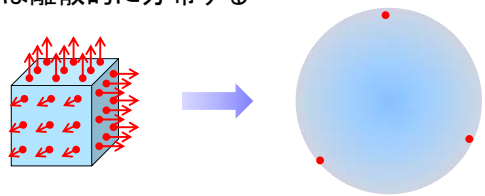
モデルベース3-D物体認識研究マップ　～特徴記述法に関して～



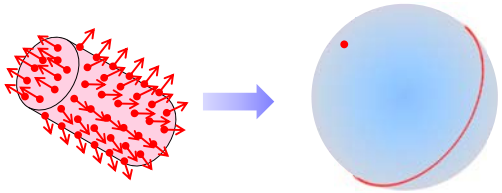
Extended Gaussian Image（EGI）表現

[Horn1983]

- 3次元サーフェスモデルの法線方向分布を，ガウス球（Gaussian sphere）に投影する表現法.
  - 多面体は離散的に分布する



  - 円筒状物体は直径を描くように分布する

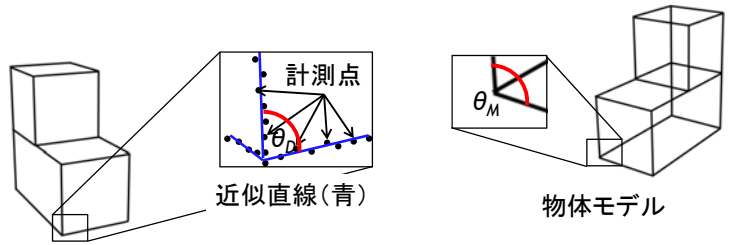


参考文献:B. K. P. Horn, " Extended Gaussian Images", IEEE, 1983.

Versatile Volumetric Vision（VVV）

[Sumi1997]

- ステレオカメラによる距離情報の取得から移動物体の追跡まで行うトータルな3次元ビジョンシステム
  - 距離情報を持つ物体輪郭同士の照合によって位置姿勢を認識
  - 得られた輪郭は直線・円弧で表現
    - 直線・円弧に近似された物体モデル・シーンを位置合わせする



計測された距離つき輪郭

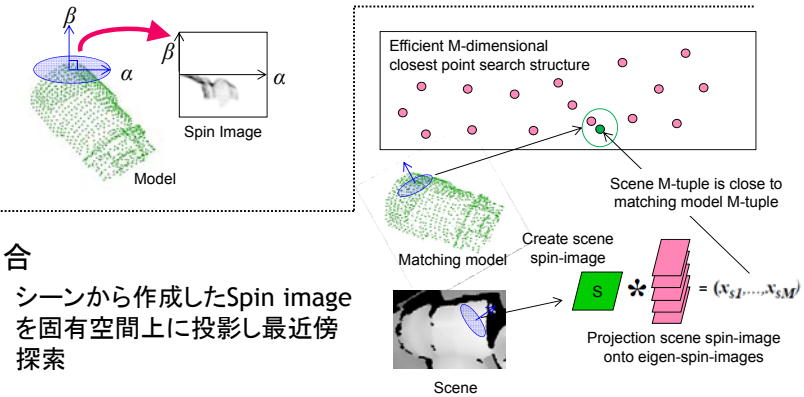
$|\theta_M - \theta_D|$ がしきい値以下の形状同士を位置合わせ

参考文献：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(5)，pp.1105-1112，1997.

Spin Image

[Johnson1997]

- 特徴記述
  1. ある注目点の法線に垂直な方向αと法線方向βで表し，βを軸とする円柱面に周囲の頂点を投票，画像化する（Spin Image）．
  2. 全ての点についてSpin Imageを生成して格納しておく．



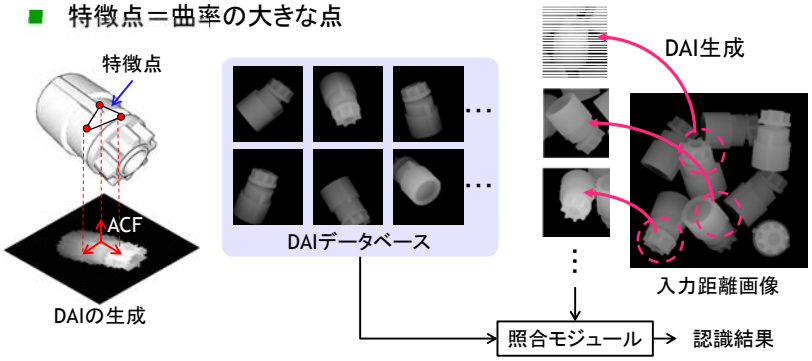
- 照合
  - シーンから作成したSpin imageを固有空間上に投影し最近傍探索

参考文献：A.E.Johnson，M.Hebert ，" Surface Registration by Matching Oriented Points, Proceedings "，3DIM，pp.121-128，1997.
A.E.Johnson，M.Hebert ，" Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes "，PAMI，pp433-449，1999.

Depth Aspect Image（DAI）

[Takeguchi2001]

- ACFに投影した見かけの距離画像（DAI）による照合
  - ACF（Aspect coordinate flame）
    - 幾何拘束を持つ3点の特徴点の組によって作成された基準座標系
    - 特徴点＝曲率の大きな点

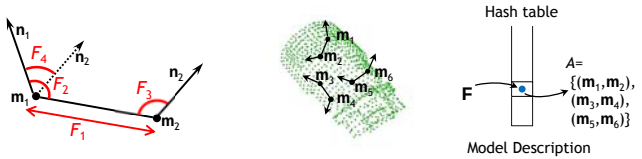


参考文献：武口 智行，金子 俊一，近藤 司，五十嵐 悟，"距離アスペクト画像の2次元照合によるロバスト物体認識"，信学論D-II，vol.J84-D-II,no.8,

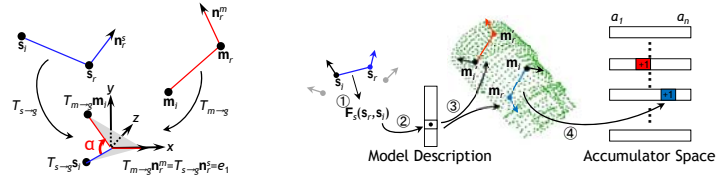
Point Pair Feature（PPF）

[Drost2010]

- 物体モデル上に設定された法線方向を持った点対特徴
  - モデル記述： 物体上の全ての計測点からできる2点ごとにPPFを取り出し，特徴量 $F_1 \sim F_4$ をキーとしてHash Tableに登録



  - 投票による認識： 似た属性値のPPF同士を照合し，幾何変換パラメータ（$\mathbf{m}_r$回りにαの回転）を計算して投票する．最多得票を解とする．

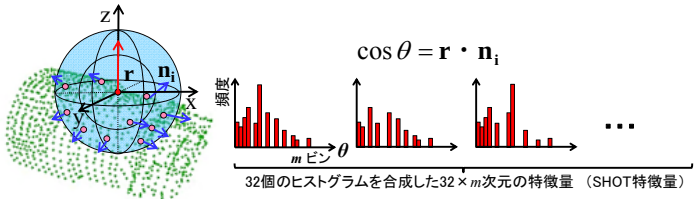


参考文献：B. Drost，M. Ulrich，N. Navab and S. Ilic,"Model Globally, Match Locally: Efficient and Robust 3D Object Recognition"，IEEE Proc. CVPR，pp.998-1005，2010.

Signature of Histograms of OrienTations（SHOT）

[Tombari2010]

- Local Reference Frame（RF）の設定
  - 注目点の近傍点を用いて，主成分分析により基準座標を設定
- 特徴記述
  - RFをもとに記述範囲を，xy平面に2分割，球の外側，内側に2分割，z軸に対して8分割する．　合計32次元に分割する．
  - 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 $\mathbf{n_i}$ の内積を計算し，m ビンのヒストグラムを作成



HOGと同様の勾配ベースの特徴量で姿勢変化に不変

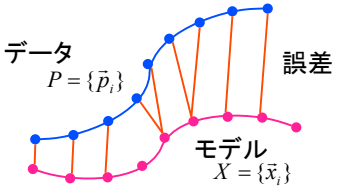
- 照合
  - KNNを用いた最近傍探索により対応点探索

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

Iterative Closest Point（ICP）

[Besl1992]
[Kaneko2003]

- データ点群とモデル点群の誤差最小化手法
  1. 最近傍点の対応付け
  2. 対応点からの幾何変換の推定
  3. 上記2ステップの繰り返しによって，位置合わせ誤差が最小となる剛体変換パラメータ $\vec{q} = [\vec{q}_R \mid \vec{q}_T]^T$ を出力

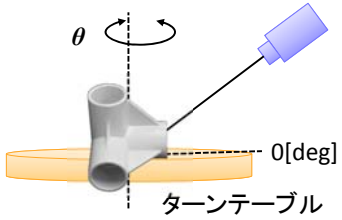


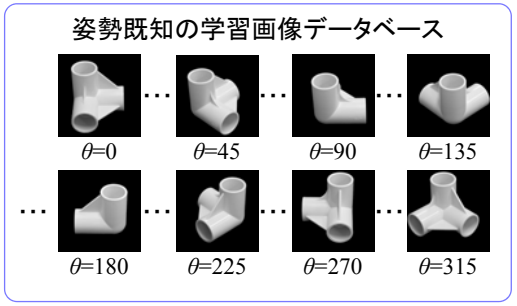
$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p}\left\|\vec{x}_i - \mathbf{R}(\vec{q}_R)\vec{p}_i - \vec{q}_T\right\|^2$$

- 派生手法として，M推定により外れ値にロバストとなったM-ICP等がある．

参考文献：P. J. Besl and N. D. Mckay, "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE Trans. PAMI, vol.14, no.2, 1992.
S.Kaneko, T.Kondo, A.Miyamoto, Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation, PR, vol.36, pp.2041-2047, 2003.

アピアランスベース物体認識





照合

入力画像（姿勢未知）

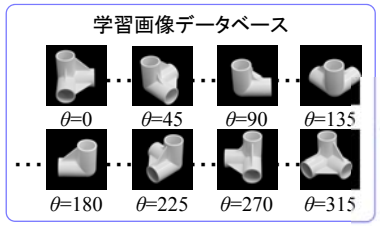
○特別な3次元の入力装置が不要

×保存するデータが膨大になる．
　→生成型学習，CGによる自動生成．

×背景混入に弱い

アピアランスベースの代表例：　パラメトリック固有空間法

[Murase1994]



似た視点＝似た画像

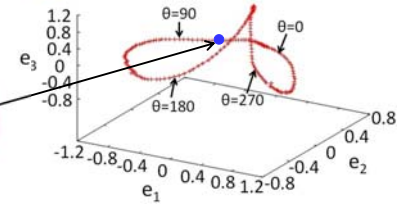
主成分分析

多数の画像データを
k 次元の固有空間内の
多様体で表現

k << 元の画像次元

入力画像（姿勢未知）

主成分分析

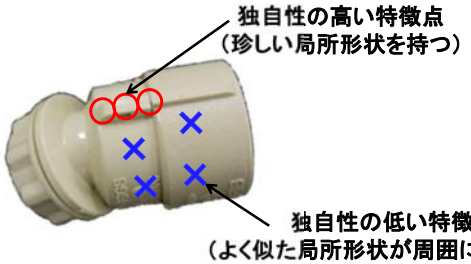


誤対応確率を最小化する3-D特徴点マッチング

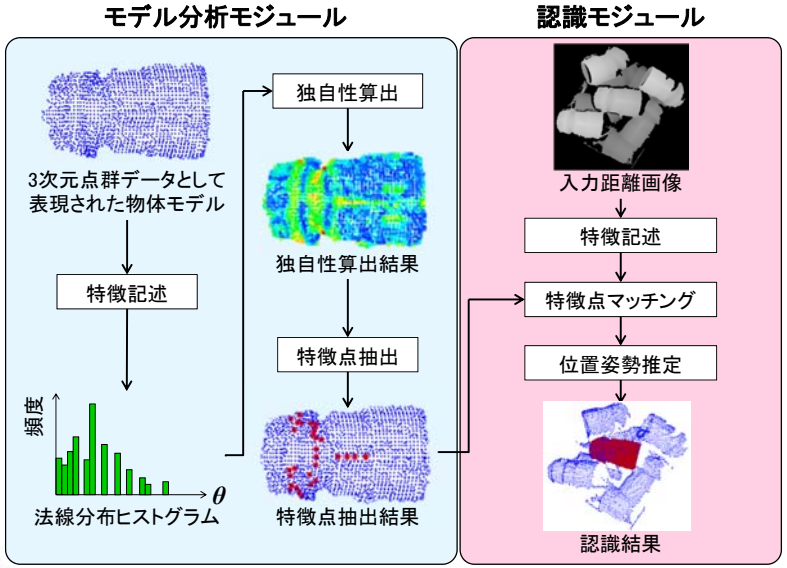
永瀬誠信，秋月秀一，橋本学，誤対応確率を最小化する3 - D特徴点を用いた高速ロボットビジョン，ビジョン技術の実利用ワークショップ（ViEW2012），pp.IS2-B5, 2012/12.

基本アイデア

- 目的
  - モデルベース認識の高信頼性と高速性の両立
- 基本アイデア
  1. 3次元点群で表現された物体モデル各点について，独自性を数値化
  2. 独自性の高い特徴点だけを使用→処理の高信頼化・高速化

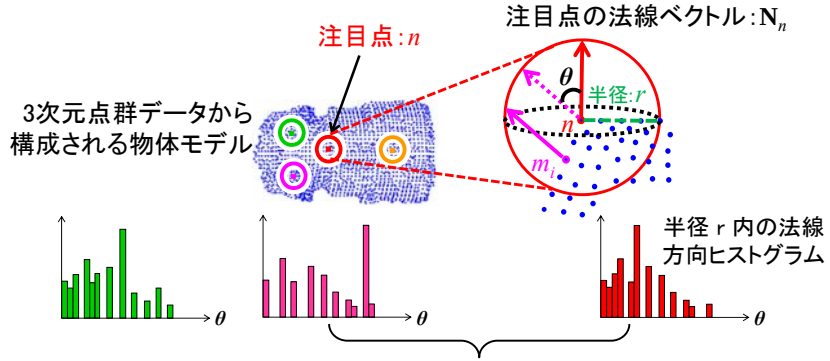


提案システムの概要



法線分布情報に基づく独自性指標の算出

- 全ての点について，局所形状を相互に比較する．

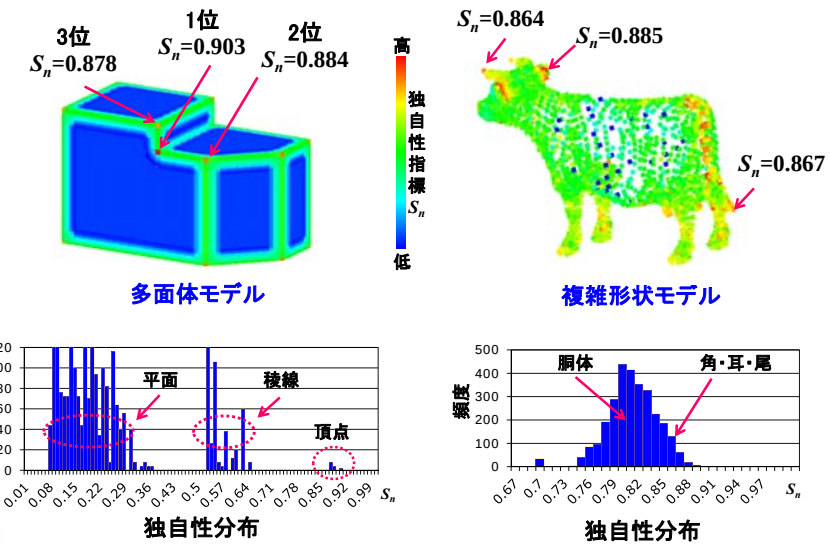


独自性指標 S_n

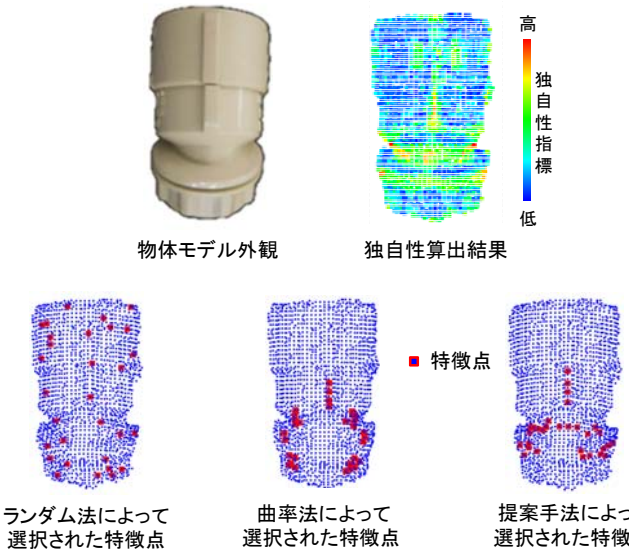
$$S_n = \frac{1}{M-1}\sum_{m=1}^{M-1}(B(p_n, q_m))$$

M ： 全モデル点数
B ： Bhattacharyya距離
p, q ： ヒストグラム

独自性評価の例



さまざまな手法によって選択された特徴点



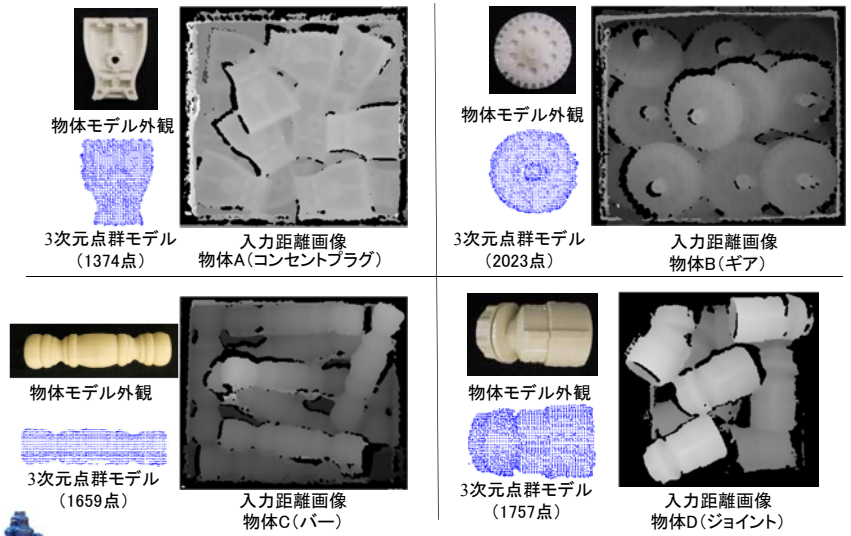
Cartesia 3D Handy Scanner HS-01 仕様

サイズ	W167 x D115 x H56 mm
重量	560g
撮影範囲	水平垂直 50～200mm，奥行き250～500mm
測定精度	RMSE 0.3mm
分解能	水平垂直 0.3mm
テクスチャ解像度	640 x 480 画素
撮影時間	0.5秒

出典：http://www.space-vision.jp/JP-Handy_Scanner.html

実験に用いたモデルと距離画像

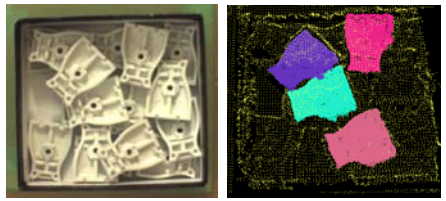
- ばら積みシーンをそれぞれ約130枚.



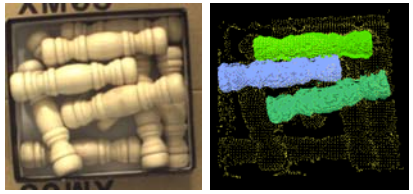
さまざまなばら積み部品に対する認識率と処理時間

		物体A	物体B	物体C	物体D	平均
Spin Image [Johnson, PAMI1999]	P_r [%]	49.6	50.8	35.2	70.6	51.6
	T [sec]	24.95	55.34	31.21	20.68	33.05
Correspondence Grouping (PCL)	P_r [%]	74.4	96.2	65.6	84.9	80.3
	T [sec]	45.41	52.85	29.26	26.10	38.41
ランダム法	特徴点数	70	50	30	30	-
	P_r [%]	89.1	96.9	85.2	69.8	85.3
	T [sec]	5.87	4.77	2.06	1.74	3.61
曲率法	特徴点数	70	50	30	30	-
	P_r [%]	86.8	76.9	18.0	54.8	59.1
	T [sec]	6.01	4.94	2.21	1.97	3.78
提案手法	特徴点数	70	50	30	30	-
	P_r [%]	**89.1**	**97.7**	**94.5**	**93.7**	**93.8**
	T [sec]	**5.83**	**4.76**	**2.05**	**1.76**	**3.60**

提案手法による認識結果

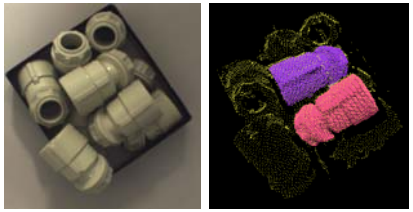


(a) 物体A



(b) 物体B

(c) 物体C



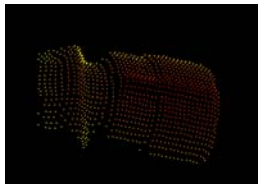
(d) 物体D

ISL Intelligent Sensing Laboratory, Chukyo University

特徴的ベクトルペアを用いた3次元物体認識

- [1] S.Akizuki, M.Hashimoto, High-speed and Reliable Object Recognition Using Distinctive 3-D Vector-Pairs in a Range Image, ISOT2012, 2012/10/30.
- [2] 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，第15回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2012)，IS1-65，2012/8.

基本アイデア



物体モデル
（メッシュ表現）

↓

マッチングデータ

特徴点

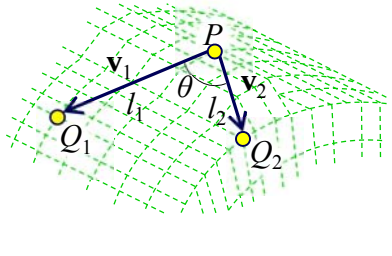
1. 少数の特徴点を用いる.（例：全点の1%）
   高速化に寄与する.

重要なこと…
どのような3次元特徴点が選択されるべきか？

2. 本研究では，共起発生確率が低い点を選択する．周囲には，これと似た形状が存在しないので，誤認識のリスクが低い.

3次元ベクトルペア

- 3つの3次元点
  - 3次元姿勢パラメータを決定するためには，3つの3次元点があればよい．



幾何学的パラメータ

$l_1 = |\mathbf{v}_1| = |PQ_1|,$
$l_2 = |\mathbf{v}_2| = |PQ_2|,$
θ

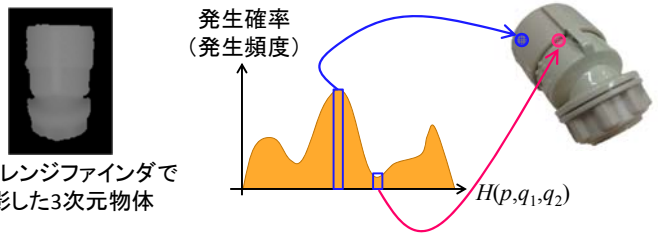
Shape description value

s_p, s_{q1}, s_{q2}

- 視点を共有する2本のベクトル　＝　3次元ベクトルペア
  - この表現により，幾何学的な表現がシンプルになる．

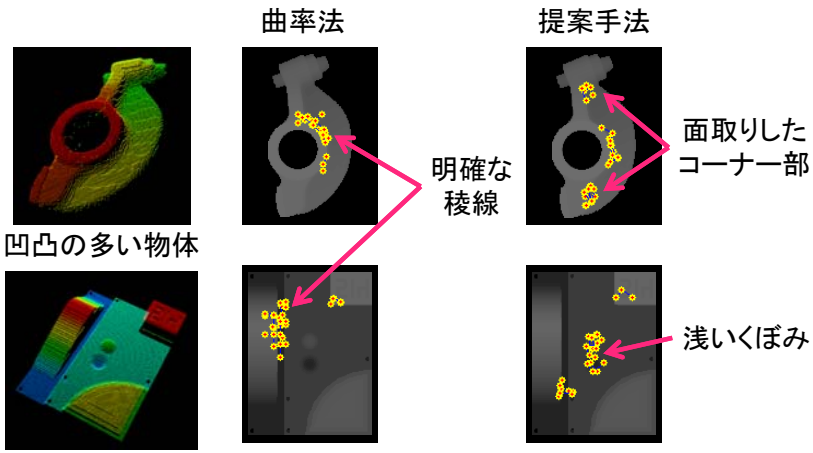
特徴的な3次元ベクトルペアの抽出

- 共起発生確率が低い3次元ベクトルペア　→　独自性が高い．
  1. 3次元ベクトルペアの共起発生確率を計算する．
  2. 各点のShape description value $H(s_p, s_{q1}, s_{q2})$ を計算する．
     Shape description value: Shape Index値を使用（Dorai1997）



このヒストグラムを分析することによって，
3-Dベクトルペアの独自性を評価することができる．

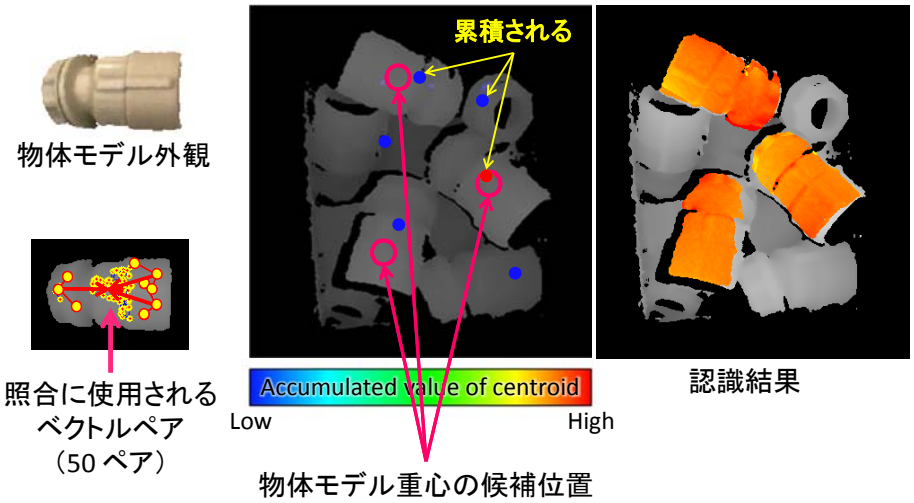
特徴抽出：　曲率法 v.s. 提案手法



3次元ベクトルペアは独自性の高い形状から抽出される．

この3次元ベクトルペアを照合に使う．

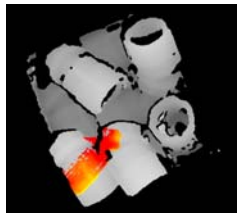
3次元ベクトルペアマッチング



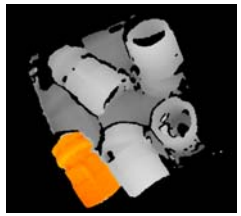
複雑シーンに対する認識性能

N: 抽出されたベクトルペア数
Pr: 認識成功率
T: 処理時間

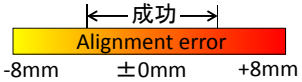
手法	特徴量	N	Pr	T(sec)
Spin Image 法	Spin maps	-	93.7%	20.68
ランダム法	Vector pairs	10	47.6%	8.66
曲率法	Vector pairs	10	77.0%	0.74
提案手法	**Vector pairs**	**10**	**81.7%**	**0.21**
		40	**92.9%**	**1.19**



Spin Image法による結果（失敗）



提案手法による結果（成功）



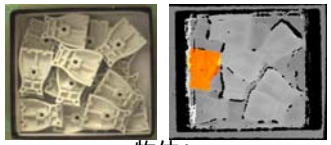
さまざまな物体に対する認識性能

3種の異なる物体による性能評価

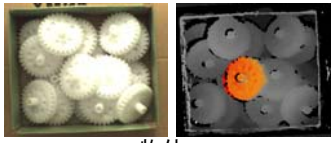
物体	N	Pr	T(sec)
A: 電気プラグ	10	94.6%	0.42
B: 歯車	10	99.2%	0.64
C: 木製の取手	10	79.7%	0.64

N: 抽出されたベクトルペア数
Pr: 認識成功率
T: 処理時間

提案手法は，さまざまな形状の物体に対して高い性能を実現した．

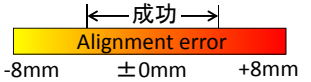


物体A



物体B

物体C



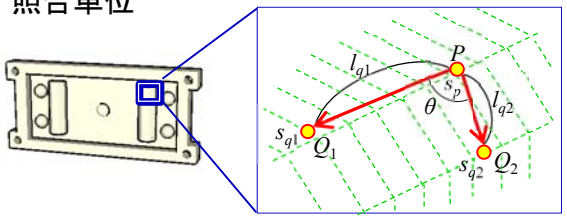
ISL Intelligent Sensing Laboratory, Chukyo University

準リアルシーンの生成学習とベクトルペア最適化に基づくばら積み部品の認識

VPM：ベクトルペアマッチング（従来法）

記述長の短い特徴量を少数使うことで高速化を実現する手法

- 照合単位



幾何学パラメータ
l_{q1}, l_{q2}, θ

Shape Index(Dorai1997)
s_p, s_{q1}, s_{q2}

一つの始点と二つの終点からなる3-Dベクトルペア

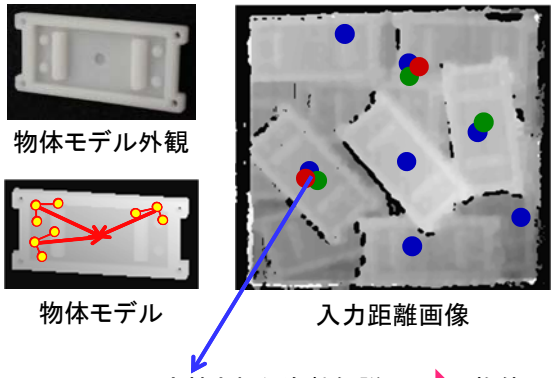
- ベクトルペア選択
  - s_p, s_{q1}, s_{q2}の共起発生確率の低いベクトルペア

↓

独自性の高いベクトルペア

VPM:ベクトルペアマッチング(従来法)

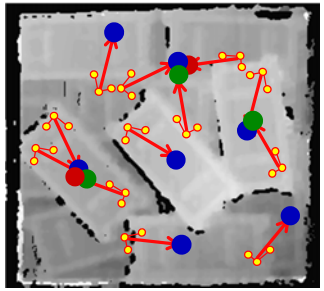
- 照合
  - 選択したベクトルペアを入力距離画像に照合



多くのベクトルペアによって支持された姿勢仮説 ➡ 物体の位置姿勢

研究の目的

- 問題点
  - 複数物体間に発生するベクトルペアと誤照合してしまう.
    原因:照合に用いるベクトルペアは物体モデルのみから選択

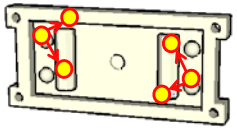


照合結果

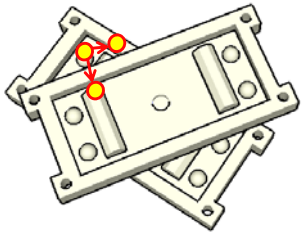
- 目的
  - **物体間との誤照合を低減する高速・高信頼な認識手法の提案**
    ➡ 高速化の観点から, 特徴量としてベクトルペアを用いる.

基本アイデア

- 従来のベクトルペア選択基準は, 物体内で独自性が高いこと.
- これに加え, 新たに「物体間には生じにくいベクトルペアであること」という条件を追加する.
  ＝物体間で発生確率の低いベクトルペア



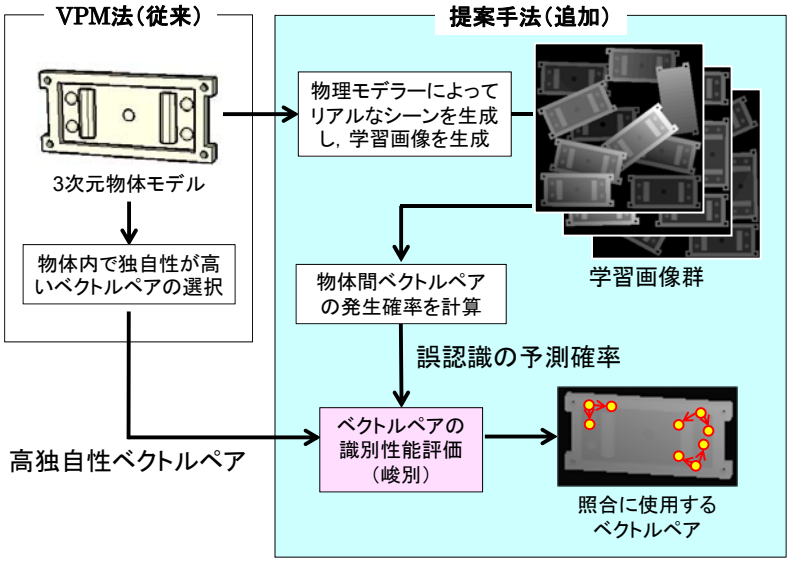
物体内で独自性が
高いベクトルペア
(従来の選択基準)



物体間ベクトルペア

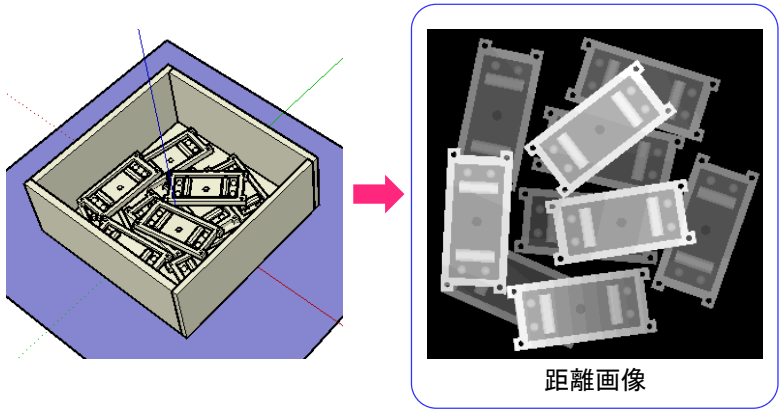
物体内では高独自性　かつ　物体間では低発生確率

提案手法の流れ



準リアルシーンと学習画像の生成

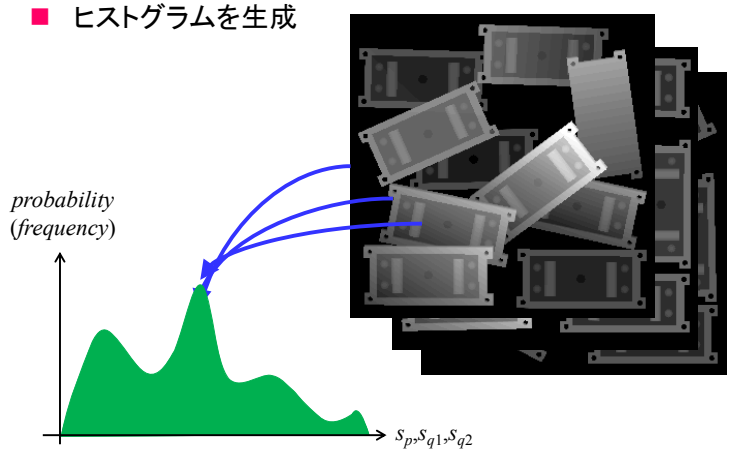
- シミュレータでリアリティの高いばら積みシーンを生成
  - 物理エンジンには SketchyPhysics を使用



物体間ベクトルペアの学習に利用

物体間ベクトルペアの学習

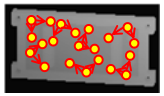
- 外輪郭をまたがって発生するベクトルペアを学習
  - ヒストグラムを生成



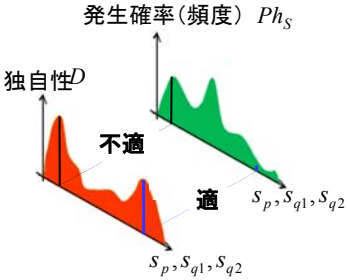
物体間ベクトルペアの発生確率を計算

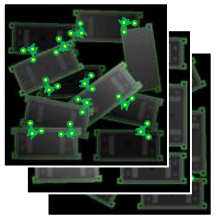
識別性能評価

- ベクトルペアの「良さ」を評価



物体内高独自性
ベクトルペア





物体間ベクトルペア

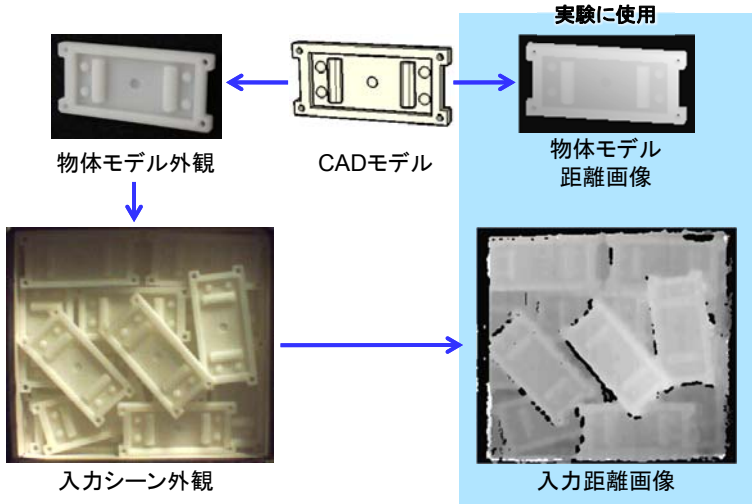
- 評価式

$$R = \frac{D}{Ph_S + \varepsilon}$$

Rの値の高いベクトルペア（Dが大きく，Phsが小さい）を選択

実シーンにおける認識実験（実験画像）

- レンジファインダで取得した140枚の画像に対する認識実験



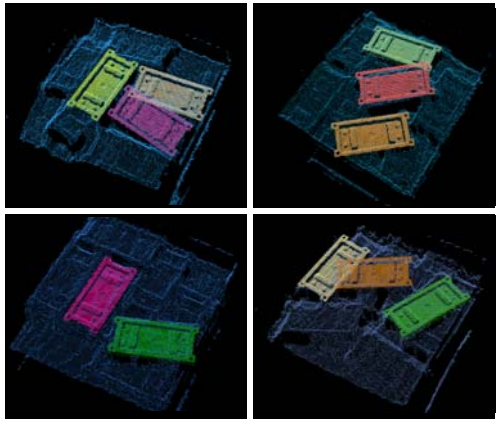
実シーンにおける認識実験（結果）

各手法の認識成功率と処理時間

	N	*Pr*	*T*(sec)
Spin Image	ー	71.4	57.99
曲率法	20	91.4	9.22
VPM法	20	75.7	1.06
提案手法	**10**	**94.3**	**0.91**

CPU：Intel®CORE™i7-2600
システムメモリ：16GB

N：ベクトルペア数
Pr：認識成功率
T：処理時間



認識結果

提案手法は従来のVPM法に対して認識成功率が18.6%向上

参考文献 （テンプレートマッチング　ロバスト化）①

[Kuglin1975] C.D.Kuglin, and D.C.Hines, "The phase correlation image alignment method", Proceedings of International Conference on Cybernetics and Society, pp.163-165, 1975.

[Goshtasby1985] A.Goshtasby, "Template Matching in Rotated Images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence（PAMI）, Vol.PAMI-7, No.3, pp.338-344, 1985.

[Li1986] X.Li, M.Ferdousi, M.Chen, and T.T.Nguyen, "Image matching with multiple templates", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR）, pp.610-613, 1986.

[Ritter1996] G.X.Ritter, and J.N.Wilson, "Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra", CRC Press Inc, 1996.

[Tang1991] Y.Y.Tang, H.D.Cheng, and C.Y.Suen, "Transformation-ring-projection (TPR) algorithm and its VLSI implementation", International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol.5, pp.25-56, 1991.

[Ojala1994] T.Ojala, M.Pietikäinen, and D.Harwood, "Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions", Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Vol.I, pp.582-585, 1994.

[Hashimoto1999] 橋本学, 黒田伸一, 鷲見和彦, 宇佐美照夫, 仲田周次, "シーン仮説と入力画像との大局的画像整合性評価に基づく複数物体の認識", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J82-D-II, No.12, pp.2288-2297, 1999.

[Tanaka2000] 田中弘一, 佐野睦夫, 大原秀一, 奥平雅士, "パラメトリックテンプレート法とその高精度ロバストマッチングへの応用", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J83-D-II, No.4, 2000.

[Muramatsu2000] 村松彰二, 大塚裕史, 小林芳樹, 清水英志, "テンプレートマッチングの高速化戦略とGAによる最適化", 電子情報通信学会D-II, Vol.J83-D-II, No.6, pp.1487-1497, 2000.

[Murase2000] 村瀬一朗, 金子俊一, 五十嵐悟, "増分符号相関によるロバスト画像照合", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J83-D-II, No.5, pp.1323-1331, 2000.

[Kaneko2002] S.Kaneko, I.Murase, and S.Igarashi, "Robust image registration by increment sign correlation", Transactions on Pattern Recognition（PR）, Vol.35, No.10, pp.2223-2234, 2002.

[Hayashi2001] 林健太郎, 橋本学, 鷲見和彦, "頑健性と精緻性を備えた顔特徴点追跡による顔方向推定", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J84-D-II, No.8, pp.1762-1771, 2001.

[Geusebroek2001] J.M.Geusebroek, R.V.D.Boomgaard, and A.W.M.Smeulders, "Color Invariance", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence（PAMI）, Vol.23, No.12, pp.1338-1350, 2001.

[Satoh2001] 佐藤雄隆, 金子俊一, 五十嵐悟, "選択的正規化相関によるロバスト画像照合", 電気学会論文誌C, Vol.121, No.4, pp.800-807, 2001.

[Ullah2001] F.Ullah, S.Kaneko, and S.Igarashi, "Orientation Code Matching for Robust Object Search", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E84-D, No.8, pp.999-1006, 2001.

[Satoh2001] 佐藤雄隆, 金子俊一, 五十嵐悟, 丹羽義典, 山本和彦, "Radial Reach Filterによるロバスト物体検出", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, No.204, pp.15-22, 2001.

[Satoh2002] Y.Satoh, H.Tanahashi, C.Wang, S.Kaneko, Y.Niwa, and K.Yamamoto, "Robust Event Detection by Radial Reach Filter（RRF）", Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Vol.2, pp.623-626, 2002.

参考文献 （テンプレートマッチング　ロバスト化）②

[Satoh2003] 佐藤雄隆, 金子俊一, 丹羽義典, 山本和彦, "Radial Reach Filter（RRF）によるロバストな物体検出", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J86-D-II, No.5, pp.616-624, 2003.

[Ryugo2002] 流郷達人, 宮本敦, 金子俊一, 五十嵐悟, "標本化順位相関に基づくロバスト画像照合", 画像電子学会誌, Vol.31, No.3, pp.363-369, 2002.

[Yamaguchi2002] 山口修, 福井和広, "定性的3値表現に基づく画像マッチング" ,電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.156, pp.23-30, 2002.

[Okuda2002] H.Okuda, M.Hashimoto, and K.Sumi, "Robust Picture Matching Using Optimum selection of Partial Template", Proceedings of the SICE Annual Conference, Vol.1, pp.550-552, 2002.

[Okuda2004] 奥田晴久, 橋本学, 鷲見和彦, 佐々木和則, "部分テンプレート組み合わせ最適化に基づくロバスト画像照合", 電気学会論文誌C, Vol.124, No.3, pp.629-636, 2004.

[Itoh2004] 伊藤誠也, 金子俊一, "選択的正規化相関による高速なロバスト画像照合", 電気学会論文誌C, Vol.124, No.3, pp.613-620, 2004.

[Ullah2004] F.Ullah, and S.Kaneko, "Using orientation codes for rotation-invariant template matching", Transactions on Pattern Recognition（PR）, Vol.37, No.2, pp.201-209, 2004.

[Mita2006] T.Mita, T.Kaneko, and O.Hori, "A Probabilistic Approach to Fast and Robust Template Matching and its Application to Object Categorization", Proceedings of International Conference on Pattern Recognition（ICPR）, Vol.2, pp.597-601, 2006.

[Mita2006] 三田雄志, 金子敏充, 堀修, "個体差のある対象の画像照合に適した確率的増分符号相関", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J88-D-II, No. 8, pp.1614-1623, 2006.

[Lin2008] Y.H.Lin, and C.H.Chen,"Template matching using the parametric template vector with translation, rotation and scale invariance", Transactions on Pattern Recognition（PR）, Vol.41, No.7, pp.2413-2421, 2008.

[Iwata2008] 岩田健司, 佐藤雄隆, 尾崎竜史, 坂上勝彦, "統計的リーチ特徴法に基づくロバスト背景差分", 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J92-D, No.8, pp.1251-1259, 2009.

[Venkatraman2010] V.Venkatraman, and F.M.Porikli, "RelCom: Relational combinatorics features for rapid object detection", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp.23-30, 2010.

[Ozaki2010] 尾崎竜史, 佐藤雄隆, 岩田健司, 坂上勝彦, "統計的リーチ特徴法に基づくサンプル学習型画像照合", 電気学会論文誌C, Vol.130, No.9, pp.1622-1629, 2010.

[Hinterstoisser2010] S.Hinterstoisser, V.Lepetit, S.Ilic, P.Fua, and N.Navab, "Dominant Orientation Templates for Real-Time Detection of Texture-Less Objects", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.2257-2264, 2010.

[Hinterstoisser2011] S.Hinterstoisser, S.Holzer, C.Cagniart, S.Ilic, K.Konolige, N.Navab, and V.Lepetit, "Multimodal Templates for Real-Time Detection of Texture-less Objects in Heavily Cluttered Scenes", International Conference on Computer Vision（ICCV）, 2011.

[Tan2010] X.Tan, and B.Triggs, "Enhanced Local Texture Feature Sets for Face Recognition Under Difficult Lighting Conditions", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.19, pp.1635-1650, 2010.

[Zhao2011] X.Zhao, Y.Satoh, H.Takauji, S.Kaneko, K.Iwata, and R.Ozaki, "Object detection based on a robust and accurate statistical multi-point-pair model", Transactions on Pattern Recognition（PR）, Vol.44, No.6, pp.1296-1311, 2011.

参考文献 （テンプレートマッチング　ロバスト化）③

[Koutaki2011] 上瀧剛, 内村圭一, "固有値分解テンプレートによる高精度な画像照合", 電気学会論文誌C研究開発レター, Vol.131, No.1, pp.237-238, 2011.

[Koutaki2011] 上瀧剛, 内村圭一, "明るさ変動および雑音に頑健な固有値分解テンプレート法", 電気学会論文誌C, Vol.131, No.9, pp.1625-1632, 2011.

[Hussain2012] S.U.Hussain, and B.Triggs, "Visual Recognition using Local Quantized Patterns", Proceedings of European Conference on Computer Vision（ECCV）, pp.716-729, 2012.

[Yuasa2013] 湯浅圭太, 和田俊和, 大池洋史, 坂田淳, "Diverse Densityに基づく画像データ検索用キーポイント抽出法について", コンピュータビジョンとイメージメディア（CVIM）, Vol.2013-CVIM-185, No.14, pp.1-6, 2013.

[Koutaki2013] G.Koutaki, and K.Uchimura, "Occlusion Robust Pattern Matching Using Shape Based Eigen Templates", IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems Vol.133, No.1, pp.134-141, 2013.

参考文献 （テンプレートマッチング　高速化）①

[Barnea1972] D.I.Barnea, and H.F.Silverman, "A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration", IEEE Transactions on Computers, Vol.C-21, No.2, pp.179-186, 1972.

[Nagel1972] R.N.Nagel, and A.Rosenfeld, "Ordered Search Techniques in Template Matching", Proceeding of the IEEE, Vol.60, No.2, pp.242-244, 1972.

[Tanimoto1975] S.L.Tanimoto, and T.Pavlidis, "A Hierarchical Data Structure for Picture Processing", Computer Graphics and Image Processing, Vol.4, No.2, pp.104-119, 1975.

[Tanimoto1981] S.L.Tanimoto, "Template Matching in Pyramids", Computer Graphics and Image Processing, Vol.16, pp.356-369, 1981.

[Rosenfeld1977] A.Rosenfeld, G.J.Vanderbrug, "Coarse-Fine Template Matching", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.7, No.2, pp.104-107, 1977.

[Vanderbrug1977] G.J.Vanderbrug, and A.Rosenfeld, "Two stage template matching", IEEE Transactions on Computer, Vol.C-26, No.4, pp.384-393, 1977.

[Barrow1977] H.G.Barrow, J.M.Tenenbaum, R.C.Bolles, and H.C.Wolf, "Parametric correspondence and chamfer matching: Two new techniques for image matching", International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol.2, pp.659-663, 1977.

[Gold1984] Y.I.Gold, "On The Order Of Examining Data-Points In Ssd Template Matching", Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Vol.84, pp.1077-1080, 1984.

[Goshtasby1984] A.Goshtasby, S.H.Gage, and J.F.Bartholic, "A two-stage cross correlation approach to template matching", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Vol.PAMI-6, No.3, pp.374-378, 1984.

[Tubbs1986] D.Tubbs, "A Note on Binary Template Matching, Pattern Recognition", Vol.22, No.4, pp.359-365, 1989.

[Margalit1988] A.Margalit, and A.Rosenfeld, "Reducing the Expected Computational Cost of Template Matching using Run Length Representation", Technical report of CfAR Univ. of MD., CAR-TR-406, 1988.

[Margalit1990] A.Margalit, and A.Rosenfeld, "Reducing the Expected Computational Cost of Template Matching using Run Length Representation", IEEE Transactions on Pattern Recognition Letters (PRL), Vol.11, No.4, pp.255-265, 1990.

[Sumi1994] 鷲見和彦, 三木美和子, 橋本学, 奥田晴久, "3値輪郭表現を応用した高速テンプレートマッチング", 電子情報通信学会春季全国大会, No.D-625, pp.7:361, 1994.

[Sumi1995] K.Sumi, M.Hashimoto, H.Okuda, S.Kuroda, "Three-Level Broad-Edge Matching and its Application to Real-time Vision System", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E78-D, No.12, pp.1526-1532, 1995.

[Li1995] W.Li, and E.Salari, "Successive elimination algorithm for motion estimation", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.4, No.1, pp.105-107, 1995.

[Hashimoto1991] 橋本学, 鷲見和彦, 坂上義和, 川戸慎二郎, "輪郭点情報を用いた高速テンプレートマッチングアルゴリズム", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J74-D-II, No.10, pp.1419-1427, 1991.

[Hashimoto1992] M.Hashimoto, K.Sumi, Y.Sakaue, and S.Kawato, "High-Speed Template Matching Algorithm using Information of Contour Points", Systems and Computers in Japan, Vol.23, No.9, pp.78-87, 1992.

[Hashimoto1995] 橋本学, 鷲見和彦, 広岡美和子, 奥田晴久, "自己相関マップ最適化に基づく分散テンプレート選択手法", 電子情報通信学会春季全国大会, p.330, 1995.

参考文献 （テンプレートマッチング　高速化）②

[Hirooka1996] 広岡美和子, 鷲見和彦, 橋本学, 奥田晴久, 黒田伸一, "階層化分散テンプレートマッチング手法", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)講演論文集, pp.II-325-330, 1996.

[Lee1997] C.H.Lee, and L.H.Chen, "A fast motion estimation algorithm based on the block sum pyramid", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.6, No.11, pp.1587-1590, 1997.

[Murase1998] 村瀬洋, V.V.Vinod, "局所色情報を用いた高速物体探索—アクティブ探索法—", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J81-D-II, No.9, pp.2035-2042, 1998.

[Muramatsu2000] 村松彰二, 小林芳樹, 高橋一哉, 清水英志, "テンプレートマッチングにおけるハードウェア化と高速化手法の開発", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J83-D-II, No.7, pp.1667-1675, 2000.

[Gao2000] X.Q.Gao, C.J.Duanmu, and C.R.Zou, "A multilevel successive elimination algorithm for block matching motion estimation", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.9, No.3, pp.501-504, 2000.

[Ikeda2000] 池田光二, 吉田昌司, 中島啓介, 浜田長晴, 依田晴夫, "正規化相関演算の単調関数化による高速テンプレートマッチング", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J83-D-II, No.9, pp.1861-1869, 2000.

[Saito2001] 斉藤文彦, "遺伝的アルゴリズムを用いた画素選択テンプレートによる画像マッチング", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J84-D-II, No.3, pp.488-499, 2001.

[Kanatani2002] 金谷健一, 金沢靖, "テンプレートマッチングによる対応探索の自動しきい値設定法", コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), Vol.2002, No.26, pp.23-30, 2002.

[Kaneko2002] 金子敏充, 堀修, "小領域のブロックマッチングを複数用いたロバストなオブジェクト追跡法", 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol.J85-D-II, No.7, pp.1188-1200, 2002.

[Kaneko2003] T.Kaneko, and O.Hori, "Feature Selection for Reliable Tracking using Template Matching", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol.1, pp.796-802, 2003.

[Kaneko2005] 金子敏充, 堀修, "ブロックマッチング誤差の上界に基づく追跡ブロック選択手法", 電子情報通信学会D-II, Vol.J88-D-II, No.3, pp.562-572, 2005.

[Shakunaga2005] T.Shakunaga, Y.Matsubara, and K.Noguchi, "Appearance Tracker Based on Sparse Eigentemplate", Proceeding of International Conference on Machine Vision & Applications (MVA), pp.13-17, 2005.

[Matsubara2005] 松原康晴, 尺長健, "疎テンプレートマッチングとその実時間物体追跡への応用", CVIM論文誌, Vol.46, No.SIG09, pp.60-71, 2005.

[Zhu2005] C.Zhu, W.S.Qi, and W.Ser, "Predictive Fine Granularity Successive Elimination for Fast Optimal Block-Matching Motion Estimation", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.14, No.2, 2005.

[Stefano2005] L.D.Stefano, S.Mattoccia, and F.Tombari, "ZNCC-based template matching using bounded partial correlation", IEEE Transactions on Pattern Recognition Letters (PRL), Vol.26, Vol.14, pp.2129-2134, 2005.

[Cristinacce2006] D.Cristinacce, and T.Cootes, "Facial Feature Detection and Tracking with Automatic Template Selection", Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp.429-434, 2006.

[Song2007] Y. Song, Z. Liu, T.Ikenaga, and S.Goto, "Lossy strict multilevel successive elimination algorithm for fast motion estimation", IEICE Transactions on Fundamentals, Vol.E90-A, No.4, pp.764-770, 2007.

参考文献 （テンプレートマッチング　高速化）③

[Mattoccia2008] S.Mattoccia, F.Tombari, and L.D.Stefano, "Fast Full-Search Equivalent Template Matching by Enhanced Bounded Correlation", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.17, No.4, pp.528-538, 2008.

[Oomori2009] 大盛善啓, "スケールフリーアクティブ探索法：入力画像の解像度を適応的に変更するテンプレート照合の高速化手法", 電子情報通信学会技術報告, Vol.109, No.182, pp.69-74, 2009.

CPTM技術と関連技術

[Hashimoto2009] 橋本学, 奥田晴久, 鷲見和彦, "画像の濃度共起情報に基づく画像照合のための参照画素選択手法", コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), Vol.2009-CVIM-169, No.43, pp.1-8, 2009.

[Hashimoto2010] M.Hashimoto, T.Fujiwara, H.Koshimizu, H.Okuda, and K.Sumi, "Extraction of Unique Pixels based on Co-occurrence Probability for High-speed Template Matching", Proceeding of International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT), MVI-3, 2010.

[Hashimoto2011] 橋本学, 奥田晴久, 鷲見和彦, 藤原孝幸, 奥水大和, "濃度共起確率に基づくユニークな画素群を用いた高速画像マッチング", 電気学会論文誌D, Vol.131, No.4, pp.531-538, 2011.

[Hashimoto2011] M.Hashimoto, and M.Saito, "High-Speed and Robust Image Matching using Spatially Distinctive and Temporally Stable Pixels", Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT), pp.209-214, 2011.

[Sakuramoto2012] 櫻本泰憲, 斎藤正孝, 橋本学, "類似物との識別に有効な画素群を用いた高速画像照合アルゴリズム", ビジョン技術の実利用ワークショップ(ViEW), 2012.

[Saito2012] M.Saito, and M.Hashimoto,"Robust Image Matching for Irregular Illumination Variation based on Spatio-Temporal Analysis of Image Intensity", Proceedings of International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT), 2012.

[Saito2013] 斎藤正孝, 橋本学, "濃度共起分析に基づく安定画素テンプレートを用いた照明変動にロバストな高速画像照合", 電気学会論文誌C, Vol.133, No.5, 2013.

参考文献 （特徴点ベースマッチング手法）

[Moravec1979] H.P.Moravec, "Visual mapping by a robot rover", Proceeding of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pp.598-600, 1979.

[Harris1988] C.Harris, and M.Stephens, "A combined corner and edge detector", Proceeding of the 4th Alvey Vision Conference, Vol.15, pp.147-152, 1988.

[Shi1994] J.Shi, and C.Tomasi, "Good features to track", Proceeding of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.593-600, 1994.

[Smith1997] S.M.Smith, and J.M.Brady, "SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing", Internal Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.23, No.1, pp.45-78, 1997.

[Lowe1999] D.G.Lowe, "Object Recognition from Local Scale-Invariant Features", Proceeding of International Conference on Computer Vision (ICCV), 1999.

[Matas2002] J.Matas, O.Chum, M.Urban, and T.Pajdla, "Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions," pp.384-393, Proceedings of British Machine Vision Conference (BMVC), 2002.

[Lowe2004] D.G.Lowe, "Distinctive image features from scaleinvariant keypoints", Internal Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.60, No.2, pp.91-110, 2004.

[Ke2004] Y.Ke, and R.Sukthankar, "PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors", Proceeding of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol.2, pp.511-517, 2004.

[Dalal2005] N.Dalal, and B.Triggs, "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection", Proceeding of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.886-893, 2005.

[Rosten2006] E.Rosten, and T.Drummond, "Machine Learning for High-speed Corner Detection", Proceeding of European Conference on Computer Vision (ECCV), pp.430-443, 2006.

[Bay2006] H.Bay, T.Tuytelaars, and L.V.Gool, "SURF: Speeded Up Robust Features", Proceeding of European Conference on Computer Vision (ECCV), Vol.3951, pp.404-417, 2006.

[Calonder2010] M.Calonder, V.Lepetit, C.Strecha, and P.Fua, "BRIEF : Binary Robust Independent Elementary Features", Proceeding of European Conference on Computer Vision (ECCV), pp.778-792, 2010.

[Rublee2011] E.Rublee, V.Rabaud, K.Konolige, and G.Bradski, "ORB : An Efficient Alternative to SIFT or SURF", Proceeding of International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011.

[Leutenegger2011] S.Leutenegger, M.Chli, and R.Y.Siegwart, "BRISK : Binary Robust Invariant Scalable Keypoints", Proceeding of International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011.

[Yoshioka2011] 吉岡勇太, 和田俊和, "整数化によるSURFアルゴリズムの高速化", ビジョン技術の実利用ワークショップ(VIEW), pp.137-138, 2011.

[Ambai2011] M.Ambai, and Y.Yoshida, "CARD : Compact and Real-time Descriptors", Proceeding of International Conference on Computer Vision (ICCV), 2011.

[Alahi2012] A.Alahi, R.Ortiz, and P.Vandergheynst, "FREAK: Fast Retina Keypoint", Proceeding of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.510-517, 2012.

参考文献 （3次元認識　キーポイントベース手法）①

[Ikeuchi1993] K.Ikeuchi, S.B.Kang, Assembly Plan from Observation, AAAI Technical Report FS-93-04, pp.115-119, 1993.

[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), pp433-449, 1999.

[Correa2001] S.R-Correa, L.G.Shapiro, M.Melia, A New Signature-Based Method for Efficient 3-D Object Recognition, IEEE Computer Society Conference onComputer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.I769-I776 2001.

[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.

[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.

[Chen2007] H.Chen, B.Bhanu, 3D Free-Form Object Recognition in Range Images Using Local Surface Patches, Pattern Recognition Letters, Vol.28, pp.1252-1262, 2007.

[Kitaki2007] 北明 靖雄，奥田 晴久，橋本 学，金子 俊一，距離アスペクト画像照合と階層化ICP照合による3次元物体認識，電学論(C)，Vol.127, No.4, pp.615-622, 2007.

[Rusu2008] R.B.Rusu, N.Blodow, Z.C.Marton, M.Beetz, Aligening Pointb Cloud Views using Persistent Feature Histgrams, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS), pp.22-26, 2008.

[Novatnack2008] J.Novatnack, K.Nishino, Scale-Dependent/Invariant Local 3D Shape Descriptors for Fully Automatic Registration of Multiple Sets of Range Images, European Conference on Computer Vision (ECCV), pp.440-453, 2008.

[Rusu2008] R.B.Rusu, Z.C.Marton, N.Blodow, M.Beetz, Learning Informative Point Classes for the Acuisition of Object Model Maps, 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICRARCV), pp.643-650, 2008.

[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), pp373-380, 2009.

[Rusu2009] R.B.Rusu, N.Blodow, M.Beetz, Fast Point Feature Histgrams (FPFH) for 3D Registration, The IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp3212-3217, 2009.

[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.

[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.

[Rusu2010] R.B.Rusu, G.Bradski, 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.

参考文献 （3次元認識　キーポイントベース手法）②

[Steder2010] B.Steder, R.B.Rusu, K.Konolige, W.Burgard, NARF: 3D Range Image Features for Object Recognition, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS), 2010.

[Kim2011] E.Kim, G.Medioni, 3D Object Recognition in Range Images Using Visibility Context, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS), pp.3800-3807, 2011.

[Steder2011] B.Steder, R.B.Rusu, K.Konolige, W.Burgard, Point Feature Extraction on 3D Range Scans Taking into Account Object Boundaries, International Conference on Robotics and Automation, pp.2601-2608, 2011.

[Tombari2011] F.Tombari, S.Salti, L.D.Stefano, A Combined Texture-Shape Descriptor For Enhanced 3D Feature Matching, IEEE International Conference on Image Processing(ICIP), pp.809-812, 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

[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.

[Tang2012] S.Tang, X.Wang, X.Lv, T.X.Han, J.Keller, Z.He, M.Skubic, S.Lao, Histogram of Oriented Normal Vectors for Object Recognition with a Depth Sensor, The 11th Asian Conference on Computer Vision (ACCV), 2012.

参考文献 （3次元認識　非キーポイントベース手法）

[Horn1984] B.K.P.Horn, Extended Gaussian Images, Proceedings of the IEEE, Vol.72, No.12, pp.1671-1686, 1984.

[Lowe1991] D.G.Lowe, Fitting Parameterized Three-Dimensional Models to Images, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Vol.13, No.5, pp 441-450, 1991.

[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.

[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.

[Hashimoto1998] 橋本 学，黒田 伸一，鷲見 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.

[Kawamura2000] K.Kawamura, K.Hasegawa, Y.Someya, Y.Sato, K.Ikeuchi, Robust localization for 3D object recognition using local EGI and 3D template matching with M-estimators, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1848-1855, 2000.

[Cyr2001] C.M.Cyr, B.B. Kimia, 3D Object Recognition Using Shape Similiarity-Based Aspect Graph, Proceedings. Eighth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Vol.1, pp.254-261, 2001.

[Hetzel2001] G.Hetzel, 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.

[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.

[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.

[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.

[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.

[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.

[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.

[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.

参考文献 （精密照合・その他）

[Chen1991] Y.Chen, G.Medioni, Object Modeling by Registration of Multiple Range Images, Proceedings. IEEE. International Conference on Robotics and Automation, pp.2724-2729, 1991.

[Yamamoto1991] 山本正信，ピエール・ボランジャー，アンジェロ・ベラルディン，距離動画像を用いた非剛体運動パラメータの直接的推定法，情報処理学会論文誌，Vol.32, No.9, pp.1129-1141, 1991.

[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.

[Zhang1994] Z.Zhang, Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces, International Journal of Computer Vision, Vol.13, Issue.2, pp.119-152, 1994.

[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.

[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.

[Nishino2002] 西野恒，池内克史，大規模距離画像群の頑健な同時位置合せ，電学論. D-II, Vol.J85-D-II, pp.1413-1424, 2002.

[ZinBer2003] T.ZinBer, J.Schmidt, H.Niemann, A Refind ICP Algorithm for Robust 3-D Correspondence Estimation, Proceedings. International Confrence on Image Processing(ICIP), Vol.3, pp.II-695-8, 2003.

[Fitzgibbon2003] A.W.Fitzgibbon, Robust Registration of 2D and 3D points sets, Image Vision Computing, Vol.21, pp.1145-1153, 2003.

[Kaneko2003] S.Kaneko, T.Kondo, A.Miyamoto, Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation, Pattern Recognition 36, pp.2041-2047, 2003.

[Masuda2003] 増田健，符号付距離場の一致による複数距離画像からの形状モデル生成，情報処理学会論文誌，Vol.44, No.SIG5, 2003.

[Ohishi2006] 大石　岳史，中澤　篤志，池内　克史，インデックス画像を用いた複数距離画像の高速同時位置合せ，電学論D, Vol.J89-D, No.3 pp.513-521, 2006.

[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.

[Phillps2007] J.M.Phillps, R.Liu, C.Tomasi, Outlier Robust ICP for Minimaizing Fractional RMSD, Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), pp.427-434, 2007.

[Tateno2010] 立野 圭祐，小竹 大輔，内山 晋二，実部品のピッキングのための距離・濃淡画像を最尤に統合する高精度高安定なモデルフィッティング法，画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2010），IS2-4, pp.714-721, 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.

[Rusu2011] R.B.Rusu, S.Couins, 3D is here: Point Cloud Library (PCL), IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1-4, 2011.

本セミナー講演に関する情報

WEBページ
http://isl.sist.chukyo-u.ac.jp/Archives/archives.html
関係するデータなどを公開しています.

Special thanks to :
資料作成に協力してくれた研究室のメンバー


M2 秋月秀一


B4 武井翔一


M2 斎藤正孝


M1 永瀬誠信


M2 柴田悠太郎


M1 櫻本泰憲

Thank you for your attention!