

3次元物体データベースのインデックス付けの一方法

星野 宏[†], 古山 恒夫[†]

本論文では、3次元物体データベースの中から目的とする対象物を容易に検索するために、3次元物体の位置や姿勢に不変なインデックスを付ける方法を述べる。インデックスは、物体の名称や意味によるキーワードではなく物体形状のみから計算する。まず、3次元物体の自由度を束縛するために主成分分析を行う。次に、主軸の固定された3次元物体上のz座標の値をx-y平面上の関数とみなして2次元フーリエ係数を求め、主成分分析で求められた固有値とともにこれをその物体のインデックスとする。いくつかの基本的な3次元幾何学的モデルの物体表面座標を計算機で擬似的に作成してインデックスを計算し、物体形状によりそれらが異なることからこれらのインデックスが3次元物体の識別に有効であることを確認した。

A Method for Indexing 3D Objects Stored in 3D Database

Hiroshi Hoshino[†], Tsuneo Furuyama[†]

This paper describes a method of providing indices to 3D objects stored in a 3D database system that are invariant to the position and attitude. Index is provided not from the name or meaning but from the 3D shape. First, the principal component analysis is used to fix the attitude of the 3D object to 3D standard axes. Next, 2D Fourier coefficients are calculated using z coordinate of the surface of the 3D object that is regarded as the function on x-y plane. These coefficients and 3 eigen values are used as the indices. These indices are effective to distinguish various 3D primitive objects that are synthesized in computer.

1. はじめに

近年各分野で3次元モデルを扱うソフトやツールが一般に広く使用されるようになってきた。また、実在の物体を撮影した写真やビデオから3次元物体を復元するソフトやツールが市販され個人ユースで扱えるまでいたっている[1]。これらのことから近い将来3次元物体を蓄積し管理するための3次元物体データベースが必要になると考えられる。

3次元データベースを構築するにあたっては、複雑でさまざまな位置や姿勢をとる可能性のある3次元対象物をどのように表現してデータベースに蓄積するか、また蓄積されたデータベースをどのようにして容易に検索するかを明らかにしなければならない。この際問題となるのは、3次元物体がさまざまな位置や姿勢をとりうることである。特に3

次元物体がさまざまな姿勢をとることが、同一物体であることを確認する上で大きな障害となり、その解決が3次元データベース構築の際の重要なポイントのひとつとなると考えられる。

3次元物体データベースに関連する研究としては、レンジデータから3次元物体をモデル化する方法を論じたもの[2][3]、3次元物体表面の表現法を論じたもの[4][5]、2次元画像群から3次元物体を認識する方法を述べたもの[6][7][8][9]、2次元画像を用いた3次元物体のグルーピングとマッチングの方法を述べたもの[10]、2枚の2次元画像から3次元物体のインデックスを付ける方法を述べたもの[11]などがある。しかし、3次元データベースの構築と検索を意識して3次元物体そのものにインデックスを付与する方法を論じたものは、Ming-Fang らによるレンジデータをフーリエ係数で記述して取り込む研究[2]や、村瀬らによる多数の2次元画像から固有ベクトル空間を求めて3次元

[†] 東海大学研究工学部情報通信工学科
Tohoku Univ. School of High Technology For Human Welfare

物体の特徴として検索に利用する方法に見られるだけである。前者は物体の位置を固定しているため、物体の位置や姿勢が変化した場合にはフーリエ係数が異なるという問題点を持つ。また後者はスカラ一値としてのインデックスではないため、検索処理に時間がかかると思われる。

本論文では、3次元物体データベースの中から目的とする対象物を容易に検索するために、3次元物体の位置や姿勢に不変なインデックスを付ける方法を提案する。インデックスは整数として与えられることができるため、それをを用いることにより3次元物体を容易に分類・検索することができる。この方法をさまざまな3次元の幾何学的なプリミティブや実在のパイプのジョイントに適用した結果、各3次元物体の形状に応じて異なったインデックスが得られ、3次元データベースの蓄積や検索において有効であることが示された。

2. インデックスの計算方法

2.1 基本的な考え方

考えられるインデックス付けの方法としては、物体の名称・付加情報を人間がテキストによりインデックス付けし、キーワードを用いて検索する方法が考えられる。しかし、キーワード検索によるものでは、物体の名称や付加情報に関する専門知識を必要とする。また、逆に名称や意味を得たいときには対応できない。

一方、2次元画像から3次元物体を検索する方法は有力な方法と考えられるが、一般に2次元画像から検索用の情報を計算する処理が必要となり、多量の3次元物体を対象とする場合、計算量が多くなると考えられる。

以上のことから3次元物体の形状のみから直接自動的に簡潔なインデックスを計算する方法を検討する。

2.2 対象物の表現法

物体形状の表現法としてさまざまな方法があるが、以下に示す理由からここでは3次元物体を物体表面上の多数の点群で表わすことにする。

(1)任意形状の物体を客観的に表現できる。

(2)写真から3次元復元を行う方法では最初に得られるのは点群であることが多い。

(3)CGデータの場合3次元メッシュに基づいてサンプリングを行うことにより任意の密度の点群を容易に得ることができる。

2.3 3次元物体の自由度の束縛方法

3次元対象物は6つの自由度（平行移動で3つ、回転で3つ）を持つため、同一物体でもその位置や姿勢によって異なったものと見られることがある。そのため位置や姿勢に対して不変のインデックスを定める必要がある。ここではそれらの自由度を制御(束縛)することにより位置や姿勢に不変のインデックスを抽出する方法を検討する。

(1) 平行移動の自由度の束縛方法

対象とする3次元物体は表面上の点群で表わされているので、それらの座標の平均から重心を求め、原点とする。ただし、ここで言う重心とはデータの平均値で一般的な体積によるものでなく、表面積に対するものである。

(2) 回転の自由度の束縛方法

重心を定め平行移動の自由度を束縛した物体の表面上の点群に対し、主成分分析を行って主軸を定めることにより回転の自由度をなくす*1)。すなわち、モデル表面上に貼り付けられた*i*個の点群の座標群を次の行列*A*で表わすとする。

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

次に共分散行列 $A^T A$ の3組の固有値と固有ベクトルを求める。

$$A^T A = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここでは最大固有値 λ_1 に対応する固有ベクトル（第一主成分）を *x* 軸とする。第一主成分が決まる

*1)主成分分析と力学の慣性モーメントを求めることは等しい。

と、それに直交する平面が一意に決まる。この平面における最大固有値 λ_2 に対応する第二主成分を y 軸とする。第一主成分と第二主成分が決まれば、第三主成分は一意に決まるので同様に、これを z 軸とし対応する固有値を λ_3 とする。

(3) 座標変換

重心と固有ベクトルにより、3次元物体を固定することができる。第1固有値の軸を x 軸として、第2固有値の軸を y 軸として物体を座標変換する。対角軸の長さの異なる8面体の自由度を束縛した例を図1に示す。

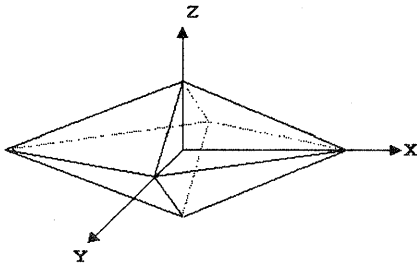


図1 自由度の束縛例 (8面体)

2.4 形状からの特徴抽出

自由度を束縛した物体に対して、その物体の形状固有の特徴量を抽出する。本論文では物体の形状情報を2次元フーリエ係数で要約する方法を提案する。

- (i) 扱う対象物が3次元物体の表面なので、 $x-y$ 平面を定義域とし、その平面からの距離 z を値とする関数 $z=f(x,y)$ から求めた2次元フーリエ係数を利用する。
- (ii) 2値関数にしないために $z \geq 0$ の範囲のフーリエ係数と、 $z \leq 0$ の範囲のフーリエ係数に分けて値を求める。
- (iii) 2次元フーリエ係数を表す式は x 軸、 y 軸それぞれの \cos と \sin の組み合わせで4つあるが \sin の項は奇関数なので左右打ち消し合い小さな値となるので、ここでは \cos の組み合わせのみ用いる。これを $a[m,n]$ と表すことにする。ただし m は x 軸方向、 n は y 軸方向のフーリエ係数の次数である。また各 $a[m,n]$ は $a[0,0]$ で正規化する。

$$a[m,n] = \frac{1}{c} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x,y) \cdot \cos \frac{2\pi mx}{L_x} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{L_y} dx dy \quad (3)$$

($m,n=0,1,2,\dots$)

x_{\max} と x_{\min} はそれぞれ x 軸方向の最大値と最小値を表し、 y_{\max} と y_{\min} は y 軸方向の最大値と最小値を表す。また、 $L_x = x_{\max} - x_{\min}$ 、 $L_y = y_{\max} - y_{\min}$ である。

また、扱う対象物が表面上の点群で表されているので、上記の式は次のような離散式に書き換えられる。

$$a[m,n] = \frac{1}{c} \sum_{y_{\min}}^{y_{\max}} \sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x,y) \cdot \cos \frac{2\pi mx}{L_x} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{L_y} \quad (4)$$

さらに、物体表面上にランダムにとられた3次元座標データ x_i, y_i, z_i ($i=1, 2, \dots, N$) に対しては次式のように書き換えられる。

$$a[m,n] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \cdot \cos \frac{2\pi mx_i}{L_x} \cdot \cos \frac{2\pi ny_i}{L_y} \quad (5)$$

形状情報は低周波の空間周波数部分に集約され、ノイズは高周波部分のみに影響すると考えられるので、ここでは、形状情報ははじめの数個の係数によって表わすことにする。

2.5 インデックスの構成法

2.3 で述べた方法では、物体が大きくなるとすなわち点群の座標が大きくなると固有値が大きくなる。このことは固有値の大きさにより物体の大きさを表わすことができることを示している。このことから、物体の大きさを各軸方向の固有値で代表させることにする。最大固有値 λ_1 が物体の大きさの目安となり、固有値の比率が物体の各軸方向の比率の目安となる。

フーリエ係数は $a[0,0]$ で正規化することにより、物体の大きさには依存せず、物体形状のみに依存した量となる。

実際のインデックスは、例えば2次以下の(正規

化された) フーリエ係数 8 個と最大固有値で正規化された 2 つの固有値のそれぞれについて小数点以下 2 桁の数を求め、それらを並べて 20 桁の整数とみなすことによって整数値化されたインデックスとすることができる。

3. 有効性の検証

3.1 検証項目

次の 2 つの項目について検証した。

[検証項目 1] 物体の形状を明確に分類できるか

フーリエ係数が各対象物に対してそれぞれ特定の値の組として出力されるかどうか調べる。

[検証項目 2] 対象物体の大きさを表現できるか

同一の物体を各軸方向に等倍または異なった比率で伸縮させた物体はフーリエ係数では見分けがつかない。そこで、対象物の大きさや各軸方向の伸縮に対する固有値の変化を調べる。

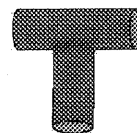
3.2 検証物体と検証方法

検証物体としては、CAD の世界でプリミティブと呼ばれる基本的な 3 次元幾何学モデルと実在物体のモデルを選んだ。具体的には、3 次元幾何学モデルとしては 8 面体、正 6 面体 (立方体)、球、円柱、円錐を選んだ。また、実在物体としては、3 種類のパイプのジョイントを選んだ。図 2 に示すような (a) 2 本の円柱が直角に L 字に組み合わさった L 型ジョイント、(b) 2 本の円柱が直角に T 字に組み合わさった T 型ジョイント、(c) 3 本の円柱がそれぞれ直角に組み合わさったトライポット型ジョイントである。

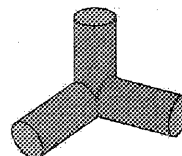
各物体の 2 次元フーリエ係数は一般的にはこれらの物体モデルの表面座標を計算機で擬似的に作成し、2 章で述べた方法によって求めることができる。しかし、[検証項目 1] を調べるためには、点群のばらつきによる影響を少なくすることができるように、解析的に求められる場合はなるべく解析的に求めることにする。また、幾何学的プリミティブに対しては、数式で書きおろすことが容易であることから、解析的には解けない場合でも数値積分によってフーリエ



(a) L 型ジョイント



(b) T 型ジョイント



(c) トライポット型ジョイント

図 2 パイプのジョイント

係数を求めることができるので、この方法を利用する。

表 1 に検証物体とフーリエ係数の求め方を示す。表 1 に示す方法に従って各々のフーリエ係数を計算して、各 3 次元物体間の差を調べた。

表 1 検証物体とフーリエ係数の求め方

検証物体		フーリエ係数の求め方		点群から計算
		解析解	数値計算	
幾何学的な プリミティブ	8面体	○		○注 1)
	正6面体(立方体)	○		
	球		○	
	円柱		○	
	円錐		○	
実在物体 モデル	L型ジョイント			○
	T型ジョイント			○
	トライポット型ジョイント			○

注 1) 誤差分析のため 2 つの方法でフーリエ係数を求めた

3.3 検証結果

(1) 8 面体

次の理論式より解析的に求めたフーリエ係数を図 3(a) に示す。ただし、この 8 面体の x 軸方向の長さは 6、y 軸方向の長さは 4、z 軸方向の長さは 2

である。

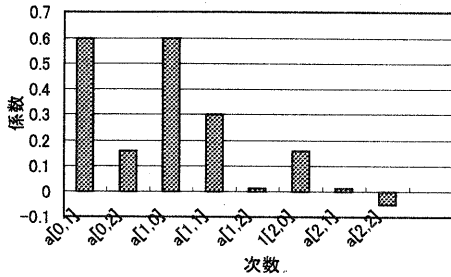
$$d[m,n] = \int_0^2 \int_0^{\frac{y}{2}} \left(1 - \frac{x}{3} - \frac{y}{2}\right) \cdot \cos \frac{2\pi mx}{6} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{4} dx dy \quad (6)$$

(2) 正6面体 (立方体)

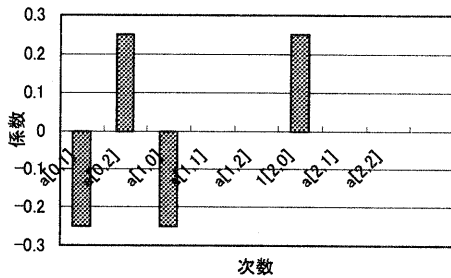
次の理論式より解析的に求めたフーリエ係数を図3(b)に示す。ただし、立方体の各辺の長さは1である。

$$a[m,n] = \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} 0.5 \cdot \cos \frac{2\pi mx}{2} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{2} dx dy \quad (7)$$

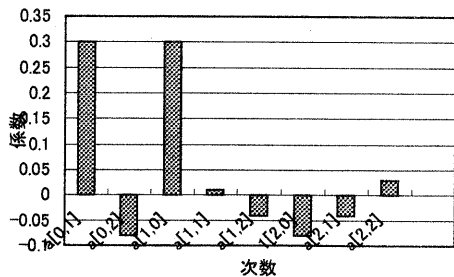
球, 円柱, 円錐に関しては解析解を求めること



(a) 8面体のフーリエ係数



(b) 立方体のフーリエ係数



(c) 球のフーリエ係数

ができないので、数値積分を用いてフーリエ係数を求める。

(3) 球

次の理論式から数値積分により求めたフーリエ係数を図3(c)に示す。ただし、球の半径は1である。

$$a[m,n] = \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} \int_{-1}^1 \left(\sqrt{1-x^2-y^2}\right) \cdot \cos \frac{2\pi mx}{2} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{2} dx dy \quad (8)$$

(4) 円柱

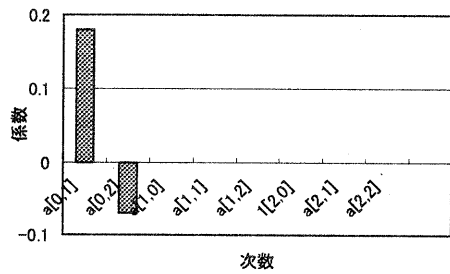
次の理論式から数値積分により求めたフーリエ係数を図3(d)に示す。ただし、円柱の半径は1, 高さは3である。

$$a[m,n] = \int_{-1}^1 \int_{-1.5}^{1.5} \sqrt{1-y^2} \cdot \cos \frac{2\pi mx}{3} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{2} dx dy \quad (9)$$

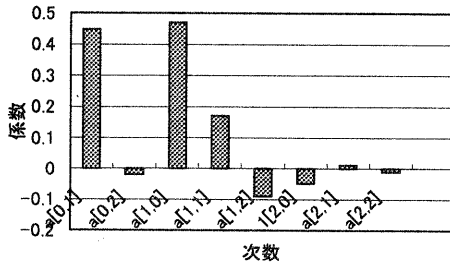
(5) 円錐

次の理論式から数値積分により求めたフーリエ係数を図3(e)に示す。ただし、円錐の底面の半径は1, 高さは3である。

$$a[m,n] = \int_{-\frac{2}{3}}^{\frac{2}{3}} \int_0^3 \sqrt{\frac{x^2}{9} - y^2} \cdot \cos \frac{2\pi mx}{3} \cdot \cos \frac{2\pi ny}{2} dx dy \quad (10)$$



(d) 円柱のフーリエ係数



(e) 円錐のフーリエ係数

図3 幾何学的プリミティブのフーリエ係数

(6) 実在物体

3種類のパイプのジョイントのフーリエ係数はジョイントの表面に貼り付けた点群データから求めた、その結果を図4に示す。

3.4 考察

(1) フーリエ係数による分類可能性

図3および図4に示したように、各物体から測定した各々の2次元フーリエ係数はそれぞれ異なるパターンをとっていることがわかる。よって、これらの係数を用いて3次元物体を分類することが可能だといえる。

(2) 固有値の役割

ある8面体を各軸方向に等しい倍数だけ伸ばした8面体の固有値の比率を表2に、x軸方向のみ引き伸ばした8面体の固有値の比率を表3に示す。

表2に示すように大きさが異なる物体は最大固有値 λ_1 により見分けがつく(フーリエ係数はすべて等しくなることに注意)。また、表3に示すようにある軸方向だけ物体を引き伸ばした場合はその方向の固有値だけが大きくなる。

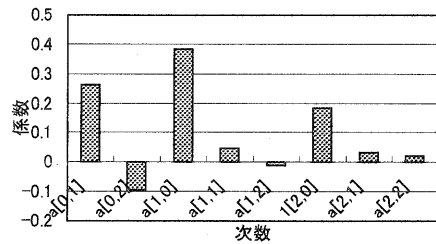
(3) 誤差の分析

3次元物体に貼り付けた点群の分布(面密度とそのばらつき)によってフーリエ係数と固有値の値が変化すると考えられる。

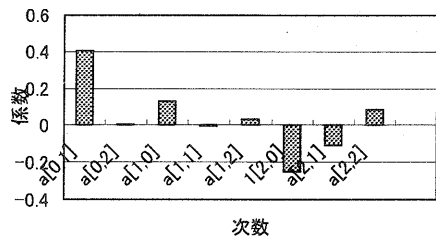
8面体を例に、貼り付けた点の数によるフーリエ係数の誤差の収束状況を図5に示す。ほぼ1万点で収束していることがわかる。

また、同様に固有値の収束状況を図6に示す。ほぼ8千点で収束していることがわかる。

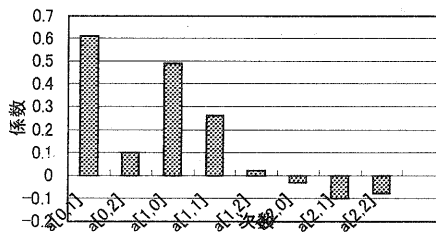
これらのことから、平面で構成されている物体において最低限必要な点の数が1万点程度であることがわかる。



(a) T型ジョイントのフーリエ係数



(b) L型ジョイントのフーリエ係数



(c) 三角形ジョイントのフーリエ係数

図4 実在物体(パイプのジョイント)フーリエ係数

表2 8面体の固有値の比率

(各軸方向に等倍引き伸ばした場合)

	標準	2倍	3倍
λ_1	1.49	5.97	13.5
λ_2/λ_1	0.44	0.45	0.45
λ_3/λ_1	0.11	0.11	0.11

表3 8面体の固有値の比率

(x軸方向のみ引き伸ばした場合)

	標準	2倍	3倍
λ_1	1.49	5.97	13.5
λ_2	0.66	0.66	0.66
λ_3	0.17	0.17	0.17

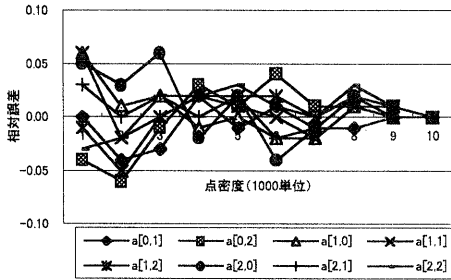


図5 相対誤差の収束状況 (8面体
フーリエ係数)

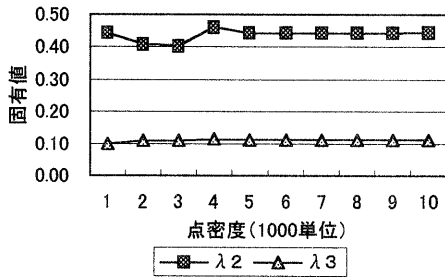


図6 固有値の収束状況 (8面体)

4. まとめ

3次元物体をその物体の表面上の点群で表し、その点群に対して主成分分析を行うことによって3次元物体の自由度を束縛できること、また、自由度を束縛した点群に対して2次元フーリエ係数を求めることにより、その物体固有の形状を要約できることを確認した。これにより、複雑で6つの自由度を持つ3次元物体をデータベース化した際に容易に検索できるインデックス付けの可能性が得られた。

<参考文献>

- [1] 尾崎裕・早瀬勝: 写真から3次元画像を作成するキット GenTrix Web Studio, 画像ラボ Jun., pp.57-62(1999).
- [2] Ming-Fang Wu,: Representation of 3D Surfaces by Two-Variable Fourier Descriptors, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.20, No.8, pp858-863(1998).
- [3] Heung-Yeung Shum, Martial Hebert: An Integral Approach to Free-Form Object

Modeling, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.19, No.12, pp1366-1370(1997).

- [4] Chitra Dorai : COSMOS-A Representation Scheme for 3D Free-Form Objects, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. 19, No. 10, pp1115-1130(1997).
- [5] Paul J. Besl,Neil D.Mckay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.14, No. 2, pp239-256(1992).
- [6] Andrew E. Johnson, Martial Hebert: Using Spin Images for Efficient Object Recognition in Cluttered 3D Scenes, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.21, No.5, pp433-449(1999).
- [7] Massimiliano Pontil, Alessandro Verri: Support Vector Machines for 3D Recognition, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.20, No.6, pp637-646(1998).
- [8] Ronald Alferz, Yuan-Fang Wang: Geometric and Illumination Invariants for Object Recognition, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.21, No. 6, pp505-537(1999).
- [9] 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77-D-II, No.11, pp.2179-2187 (1994).
- [10] Chitra Dorai, Anil K. Jain: Shape Spectrum Based View Grouping and Matching of 3D Free-Form Objects, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. 19, No.10, pp1139-1146(1997).
- [11] Jeffrey S. Beis, David G. Lowe: Indexing without Invariants in 3D Object Recognition, IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol.21, No.10, pp1000-1015(1999).