The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	感性計測技術による真珠品質評価システムの構築
Author(s)	長田, 典子
Citation	大阪大学, 1996, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3110112
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

感性計測技術による
真珠品質評価システムの構築

長　田　典　子

1996年1月

大阪大学基礎工学部

感性計測技術による
真珠品質評価システムの構築

長　田　典　子

１９９６年１月

大阪大学基礎工学部

目　次

1章　総　論 1

1.1　産業分野における計測システムの現状と課題 1
1.2　感性計測への期待 2
1.2.1　感性の定義 2
1.2.2　感性研究の流れ 3
1.2.3　感性計測の対象 5
1.2.4　感性計測の枠組み 6
1.3　真珠の品質評価と従来研究 8
1.4　本研究の目的と論文の構成 9

2章　感性計測技術の現状と動向 11

2.1　はじめに 11
2.2　感性計測の手法 11
2.2.1　分析的アプローチ 11
2.2.2　生成的アプローチ 11
2.3　感性計測の研究事例 12
2.3.1　感性を支援するための計測 12
2.3.2　感性を代行する計測 13
2.4　まとめ 14

3章　表面性状評価モデルに基づく真珠キズ評価 15

3.1　はじめに 15
3.2　表面性状評価モデルの構築 15
3.2.1　真珠のキズ・形状評価 15
3.2.3　キズ認知実験 17
3.2.4　表面性状評価モデル 20
3.3　キズ評価方式 22
3.3.1　光学系の構成 22
3.3.2　処理の概要 22
3.4　実験と考察 24

3.5 まとめ …… 27

4章 ニューラルネットの感度特性を用いた要因特定法と真珠色彩識別 28

4.1 はじめに …… 28
4.2 ニューラルネットワークの感度特性を用いた要因特定法 …… 28
4.2.1 入力層－出力層間の感度特性 …… 29
4.2.2 入力ユニットの寄与度と寄与要素の特定方法 …… 30
4.3 真珠色彩識別の概要と装置試作の手順 …… 32
4.4 要因特定法のスペクトルへの応用 …… 32
4.4.1 ネットワークの構成 …… 32
4.4.2 ネットワークの学習 …… 33
4.4.3 寄与度の計算 …… 33
4.4.4 寄与スペクトルの特定 …… 37
4.4.5 結果の評価と検討 …… 37
4.5 色彩識別装置の設計と要因特定法による最適化 …… 39
4.5.1 色彩評価装置の試作 …… 39
4.5.2 識別における入力要素の最適化 …… 41
4.5.3 ネットワークの構成と要因特定 …… 41
4.5.4 実験結果と考察 …… 41
4.6 まとめ …… 45

5章 品質評価のためのビジュアルシミュレーションによる真珠の表現 46

5.1 はじめに …… 46
5.2 真珠の光学的特徴と品質評価 …… 47
5.3 色み・照りに関する心理的評価ファクタ …… 50
5.3.1 心理学実験 …… 50
5.3.2 実験結果 …… 50
5.3.3 考察 …… 51
5.4 CGによる真珠の表現 …… 53
5.4.1 多層薄膜干渉の物理モデル …… 53
5.4.2 多層薄膜干渉の表示アルゴリズム …… 54
5.4.3 干渉光による深み感の表現 …… 61
5.4.4 映り込みによる輝き感の表現 …… 61
5.4.5 テクスチャによるきめ感の表現 …… 61

5.4.6　表示例 …… 63
5.5　まとめ …… 65

6章　真珠らしさの主観評価 **66**

6.1　はじめに …… 66
6.2　真珠らしさの主観評価１－写真－ …… 66
6.2.1　実験方法 …… 66
6.2.2　実験結果と考察 …… 66
6.3　真珠らしさの主観評価２－生成画像－ …… 69
6.3.1　実験方法 …… 69
6.3.2　実験結果と考察 …… 69
6.4　まとめ …… 70

7章　結論 **72**

参考文献 **74**

謝　辞 **78**

業績リスト **79**

1章　総　論

1.1　産業分野における計測システムの現状と課題

鉄鋼，化学，農林水産，食品など各種の産業分野で，信頼性向上，品質管理あるいは省力化を目的として，従来人手に頼っていた計測作業の自動化，無人化が進められている．その中で，随所に介在する熟練作業者の五感に頼った判断機能の自動化については，期待されたほどには進展していないのが現状である．

生産工程における製品の検査・計測プロセスの自動化を例に取ると，1970年代の専用自動装置，1980年代前半の位置計測や文字認識を行う各種ＦＡ機器など，実用化に成功したのは，対象物の面積，位置，方向といったシンプルな物理量をベースとする計測や認識であった．このように，計測すべき対象や内容が明確であり，数値として規定されている場合には，機械による計測は大きなメリットを有する．

しかしその後，品質評価や異常検知のような，複数の要因が絡んだ量やあいまいさを含んだ量など，複合的，高次的なものを計る要請が起こってきた[1][2]．例えば粗さを含んだ表面性状，印刷の色調，機器の騒音など「質」「良否」「見栄え」といった総合的な評価が求められるようになったが，これらは熟練作業員の勘や経験に基づいて判断されるものである．こうした作業は一般的に，検査基準がほとんど明確に規定されておらず，人が限度見本と比較して評価を決めていく場合が多い．そのため判断基準や判断要因があいまい，あるいは，要因と判断結果の因果関係が作業員の意識下に潜在してしまうなどの結果，システムの判断結果と人間の判断結果との不適合が生じるという問題があった．

システムと人との結果の一致を妨げる要因として，次のような項目が挙げられる[3]．

(1) 基準が定性的で明確でない．

(2) 隠れたパラメータが存在している．

(3) 検査基準とパラメータの因果関係が複雑である．

(4) 計測誤差が含まれている．

(5) 統計的誤差が含まれている．

このうち，(4) (5) については，センシング技術の高分解能化，学習・適応能力のアルゴリズム化などの研究開発が行われている．一方，(1) (2) (3)については，従来，官能検査の分野で行われていた作業者の感覚量の定量化などの研究があるが，産業現場での実用性を意識した開発事例はほとんどなく，これらの技術をどのようにして現場に導入していくかが，今後の大きな課題となっている．

こうした状況を背景に，人間の感じ方あるいは勘などを計測の分野でどう扱うかという課題を，感性を計測するという枠組みの中でとらえた新しいアプローチが求められている．

1.2　感性計測への期待

感性に関する研究は，これまでに広い分野で多岐にわたって行われている．本節ではまず，感性に関する一般的な研究の動向を述べ，その中で感性計測の位置づけについて説明する．

1.2.1　感性の定義

「匠の感性」とか「感性に訴えかける製品設計」などといわれるように，感性という言葉はさまざまな場面で用いられる多義的な言葉である．辞書には主に３つの意味「外界の刺激に対する感覚の感受性（鋭敏度）」，「外界の刺激によって呼び起こされる体験（イメージ）」，「感覚的欲望」が取り上げられている．しかし研究者達からは必ずしも現在の用法を適切に表してはいないとされていた．ちなみに英語ではsensibility, sensitivity , feeling, senseなどが，それぞれ一部の意味に相当しているが，感性という多様なニュアンスを持つ言葉はないという[4].

最近，感性関連のさまざまなプロジェクト[5][6]において活発な議論が重ねられ，感性の概念が次第に整理されてきた．例えば１つの仮説[5]の中では，感性は『外界の刺激との「相互関連」であり「直観」と「それによって引き起こされるものとしての心的体験」より形成される』として，心的体験に感覚(sensation)，感情(feeling)，気分(mood)の３つがあるとしている．また快・不快，善悪，嗜好，美醜といった人や社会の価値判断に関わる認知過程である[7]との定義も示されている．計測の立場からは，図1.1に示すように入力（刺激R）と出力（評価E）の相関から，感性モデル（評価者F）という関数を求めるという捉え方が一般的である．

いずれの考え方も，感性を単純な感覚としてでなく，直観，イメージ（心的体験），価値観など統合的な心の反応として定義し，それゆえ，状況依存性や主観性など，従来のパターン認識や知識処理で扱ってこなかった特徴に対応する独自のアプローチが必要である，という研究の意義を示すものである．

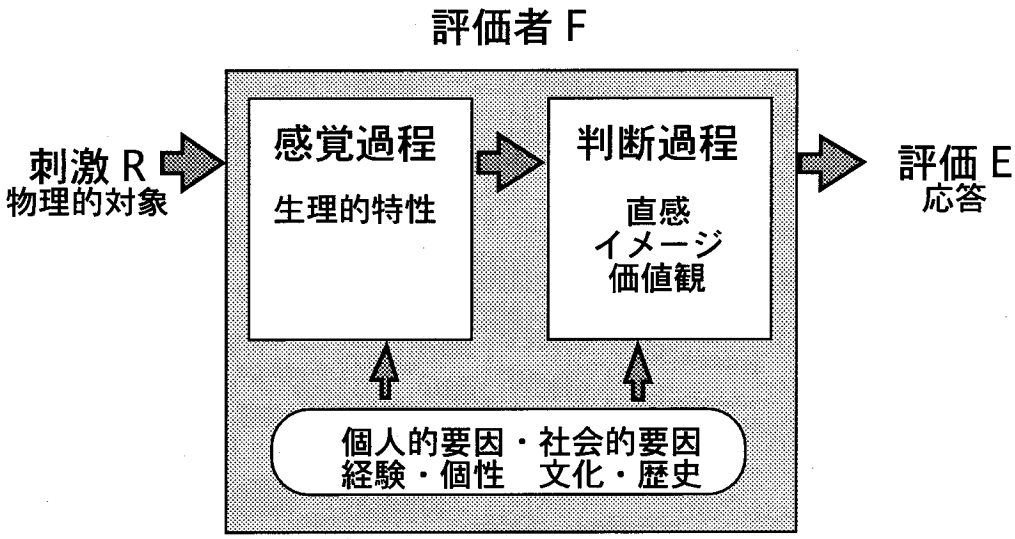


図1.1　感性モデルの例

1.2.2　感性研究の流れ

人間の感じ方に関する研究は古くから行われてきた．19世紀半ば，刺激の物理量と感覚の大きさとの相互関係を調べた感覚心理学に始まったとされ[4]，1930年代に生まれた官能検査[7]などの分野で，統計的な手法を持ち込むことによって人間の感覚を定量化する試みが行われた．その後，感覚に関する研究が心理学，統計学，あるいは生理学などの分野に広がり，そこでの研究成果が，多変量解析や尺度構成法など今日の感性研究の基礎的方法となった．

しかしそうした研究が感性というキーワードで統括され，改めて注目されるようになったのは，1980年代初めごろ，世の中で感性という言葉が頻繁に使われ出した以降のことである．この頃，人に優しいシステムという新しいコンセプト[8]や，AIや知識工学において非論理的な情報を切り捨ててきたという反省がきっかけとなって，人の感じ方を感性という観点から改めて扱おうという動きが各方面で芽生えた．とりわけ計算機と組み合わせた工学的な側面からのアプローチで大きな進展を見せ，感性工学，感性情報処理，感性計測といった新しい領域が急速に進展した．

(1) 感性工学

長町[9]が提唱した感性工学は，上述の感性の定義における価値感のまさに「価値」

を具体的なモノに置き換える考え方である．「こんなものが欲しい」というイメージを感性ととらえて，次々に概念のブレークダウンを行い，イメージを生み出す物理的特性までたどりつく．実際に車の製品開発支援などに応用されており，感性を商品化したエポック的な研究といえる．

(2) 感性情報処理

井口らが音楽の分野で展開した感性情報処理[10]では，非論理情報を感性ととらえて情報処理の対象とした．演奏家ごとに異なる演奏上のニュアンスから，従来のパターン認識ではノイズとされたパターンのゆらぎなどを感性情報として抽出し，演奏家モデルを構成した．また音楽的構成の解析によって，従来の情報処理では拍子や調性を出力するところを，曲に対するイメージ（憂鬱ななどの形容詞）を感性情報として出力してみせるなどの試みを行った[11]．これらは感性情報の具体例を示したことで，その後の感性研究に大きな影響を与えた．

また感性情報処理の対象を，感性情報の重要な切り口である「主観性」という立場から３つに分けて，それぞれの特徴を明確にした（表1.1）[12]．車のデザイン設計や顔の表情認識におけるマジョリティが感じる感性を「大衆の感性」とし，芸術家の作風に代表される個性的な感性を「芸術家の感性」に分類した．そして熟練検査員や特定分野の専門家などの，極めて感受性の鋭い感性を「専門家の感性」と呼んだ．専門家の感性は，いわゆる「違いが分かる」人にしかわからないという性質を持っているため，一見主観的と考えられるが，実際は傑出した計測機能に裏付けられた高い分解能と再現性をもっており，客観的で普遍的な感性である．なお本論文で扱うのは，この「専門家の感性」である．

表1.1　感性情報処理の対象

対象	特徴	適用分野
芸術家の感性	個性的主観性	芸術
大衆の感性	公共的主観性	設計
専門家の感性	高分解能的客観性	官能検査・計測

(3) 感性計測

これに対して感性計測は，従来の感覚計測[13]や官能検査の分野で個別に行われていた感覚に関するセンシングの研究をベースにして，高度化（高精度高分解能）されたセンシング技術，ニューロ・ファジィなどあいまいさや情報統合を扱う情報処理技術，あるいは脳や神経回路の研究で得られた感覚特性に関する知見などを導入することにより，直感，イメージ，価値観といった心の反応を計測対象として，これをシステムに代行もしくは支援させるのを目的とした計測技術分野である[14].

いうまでもなくこれらの技術分野は明確な区別があるわけではなく，互いに技術や対象のオーバーラップを許しながら進展を続けている.

1.2.3 感性計測の対象

前節で述べた一連の感性研究において，感性計測は，広義には感性を計る技術という解釈になり，感覚・感性を扱うあらゆる研究がこの範疇にはいる．しかし狭義の意味では，工学的な側面での感性の計測・解析・評価・定量化あるいは機器化に関する技術を指す．いずれの解釈でも，物理的刺激とそれに対する人間の感性的応答の対応関係（感性モデル）を構成することが基本となる.

感性計測の対象の具体例を表1.2[4][15]に示す．ここでは対象の分類を行っている．生理反応，単一の物理的刺激あるいはそれによって生じる一次感覚，複数の物理的要因が絡み合ったり，複数感覚が統合して生じる複合感覚，高次で心的な側面の強い高次感覚と高次の感性に分けられる．またこれらを感覚統合の度合いによって特徴付けて，生理量，感覚量，心理量，感性量，情緒量などと呼び分けることもある．なお，この中で生理量については，意識下（非知覚領域）の物理量であり直接計測が可能であるが，それ以外は意識上の量であり言葉などを介して間接的に計測するという違いがある.

本論文では主として感性量と呼ばれる複合感覚を対象とした狭義の感性計測について議論する.

表1.2　計測の分野と対象の分類

計測分野	対象	例	特徴づけ
物理計測		長さ，質量，温度，周波数	物理的
感性計測	生理反応 一次感覚 複合感覚 高次感覚 高次感性	脳波，心拍，反射 五感，圧覚，痛覚，温冷覚 ＜一次感覚における要因複合＞ 変形（形状異常），濁り，透明感， 色彩感，光沢感，質感，音色，香り ＜感覚統合＞ 騒音，触感，温熱感 質感（風合い，材質感，舌触り） 心地（乗り心地，座り心地） 快適さ，嗜好 感情（喜び，驚き，怒り） 気分・情緒（寂しさ，安らかさ）	生理的 感覚的 心理的 感性的 情緒的

1.2.4　感性計測の枠組み

1.1節で述べたように，熟練作業員を代替する計測システム開発の最大の問題点は，システムの判断結果と人間の判断結果との一致率が十分でないことにある．この主な原因は，システム開発の際に行う熟練者からのヒアリングが不十分なままで，H／W設計に進むことに起因すると思われる．そうした問題を避けるために，システム仕様決定の際に，十分な検討を行うための具体的な手法論を展開しなければならない．

感性計測の基本的な課題は感性モデルを構成することである．計測は「何を計るか」からスタートするが，感性量の場合，複合的で無意識的（潜在的）な要素が含まれていて，何を計ればいいかがわからない場合も多い．従って1.1節で示した，一致率向上を妨げる３つの要因 (1) (2) (3) を解決する手法，すなわち基準の定量化，潜在量の探索，因果関係の明確化，を解決するための手法開発が必要である．特に潜在量である「人間はどのような物理量に着目しているか」ということを顕在化させるプロセスを必要とする点が，従来の物理計測と異なるポイントである．

また，潜在量が明確化されても，その要因に対応するセンシング機能を実現できるわけではない．人間の五感の性能は，産業用センサとは根本的に異なる．しかも産業計測の場合は，コストと処理時間の制約が，分解能，ダイナミックレンジなどセンサとしての性能とトレードオフになる．そうした制約を満たし，人間の機能にできるだけ近いセンサを選択し計測システムを構成しなければならない．

さらに，構築された計測システムを，熟練作業者の判断機能に近付けるために，現場データを用いた各種パラメータの学習，最適化等を実施するとともに，モデルの評価を行いながら，センシングシステムにあわせた情報処理システムを構築する．

以上をまとめ，図1.2に示すような感性計測技術の枠組みを提案する．ここでは「解析・モデル化」-> 「センシング方式の設計」->「モデルの評価・最適化」という３つのフェーズを段階的に実施し，結果を前段階へフィードバックすることで，人間の価値判断と一致させていく．とくに「解析・モデル化」のフェーズは，その結果がセンシング方式の具体的な仕様に反映される意味で，最も重要と考えられる[16].

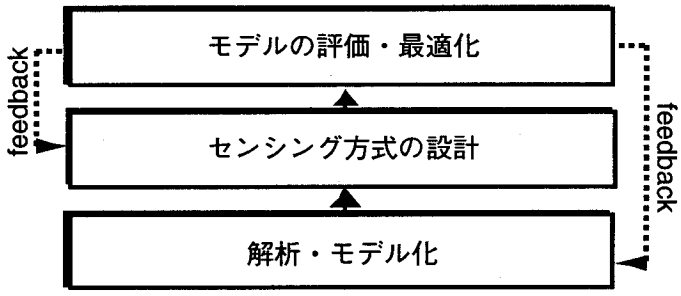


図1.2　感性計測の枠組み

1.3 真珠の品質評価と従来研究

真珠は「東洋の神秘」と呼ばれるように独特な色と輝きを持った宝石であり，その光学的特性については古くから多くの研究者が研究を重ねてきた[17]．しかしながら真珠の独特の輝きは，1000層以上にも及ぶ半透明の薄膜が球状にしかも天然に積層されている結果，表面の正反射，表層部の多重反射による光の伝播，および多重反射条件の良好な部分に発生する干渉等の光学現象が複雑にからみあった形で発生しており，この複雑さのために，光のふるまいに関する物理モデルを構築するまでには至っていなかった．

その一方で，こうした複雑な光のふるまいにもかかわらず，真珠の加工工程現場での検査員たちは，ある共通の評価価値観に基づいて，非常に精度の高い品質評価を行っている．

浜揚げされた真珠は，真珠が本来もつ美しさを最大限に引き出すとともに，リングやネックレスなどの宝飾品として完成させるための種々の加工が施される．この加工工程に伴って真珠の品質評価が進められるが，その際キズ，形状，色彩，照り，色み等と呼ばれるマクロ的な項目についてそれぞれ評価が下され，それらを総合したものによって品質の評価が決定される．これら評価項目は概念があいまいで尺度が定性的，しかも主観的であるので，評価の定量化，客観化が非常に難しい．

従来の研究[18]ではカラーカメラ等の汎用的な計測器や線形モデルに基づいた識別法が使われていたが，高分解能化や非線形的な応答など専門家に近い機能を実現するには不十分であった．

1.4 本研究の目的と論文の構成

本論文は，専門家の感性の代行というテーマを取り上げ，感性計測技術の枠組みと新しい手法の提案，およびそれを応用した真珠品質評価システム（図1.3）の構築についてまとめるものである．とくにシステムの判断結果と人間の判断結果との識別一致率の向上に着目し，感性計測の枠組みと提案手法の有効性を示す．

具体的には，以下の３つのアプローチを行っている．

(1) 感性量のモデル化・システム化の枠組みの提案

「専門家が何に着目しているか」という観点から，専門家から抽出した感性量に基づいてモデル化・システム化を行う，感性計測の枠組みを提案する．これを真珠のキズ識別装置の構築に適用し，専門家との一致率を評価する．

(2) 物理量の選択手法の提案

検査基準と物理量の因果関係の観点から，物理量選択（パラメータサーベイ）を行う手法を提案し，この方法が識別一致率の向上をもたらすことを実証する．

(3) 品質評価シミュレータの提案

感性量と物理量の対応付けを行うツールとして，仮想サンプルを生成する品質評価シミュレータを提案し，その中核技術となる，物理モデルとCGによる表現方法および評価について考察する．

本論文の構成を以下に示す．

２章では，感性計測技術に関する従来の研究をまとめ，問題点とアプローチの方法を整理する．

３章では，解析・モデル化の一例として，真珠の表面性状（キズ，形状）評価に関する評価モデルの提案とシステム化について述べる．心理実験によりキズの評価に関与する要素を明らかにし，表面性状評価モデルを提案する．そしてモデルに基づいたキズ形状評価システムを構築し，結果を評価する．

４章では，解析・モデル化の新しい手法として，ニューラルネットの感度特性を用いた要因特定法を提案する．学習後の階層型ニューラルネットの入出力間の感度が，ネットワークの入出力関係に対する寄与の度合いを示すことに着目し，入力要素の選択に利用する．本手法を真珠の色彩評価に応用し，評価に寄与する有効な物理量を明らかにするとともに，物理量の選択が識別一致率の向上に寄与することを示す．

５章では，モデルの評価の一手法として，真珠の仮想サンプルを生成するビジュアルシミュレータについて述べる．真珠の干渉現象は光源方向に依存しない，極めて特徴的な色相分布を示す．これを説明するため，球体の多層薄膜干渉の物理モデルを導入する．

また心理実験によって，真珠の評価に関する主要な感性量を明らかにする．物理モデルと感性量に基づいたCGによるシミュレーションを行い，真珠の光学現象を効果的に再現できることを示す．

6章では，真珠を生成する際の”リアルな真珠とは何か”という問題を，専門家でなく，一般大衆が真珠に対して抱く「真珠らしさ」の観点から評価する．心理実験によって，実際の写真と生成画像の双方の「真珠らしさ」を評価し，生成画像が真珠らしさを表現できていることを示す．同時に，真珠らしさに寄与する物理量についても議論する．

7章では，全体のまとめとして各章の概要を述べ，今後の課題について言及する．

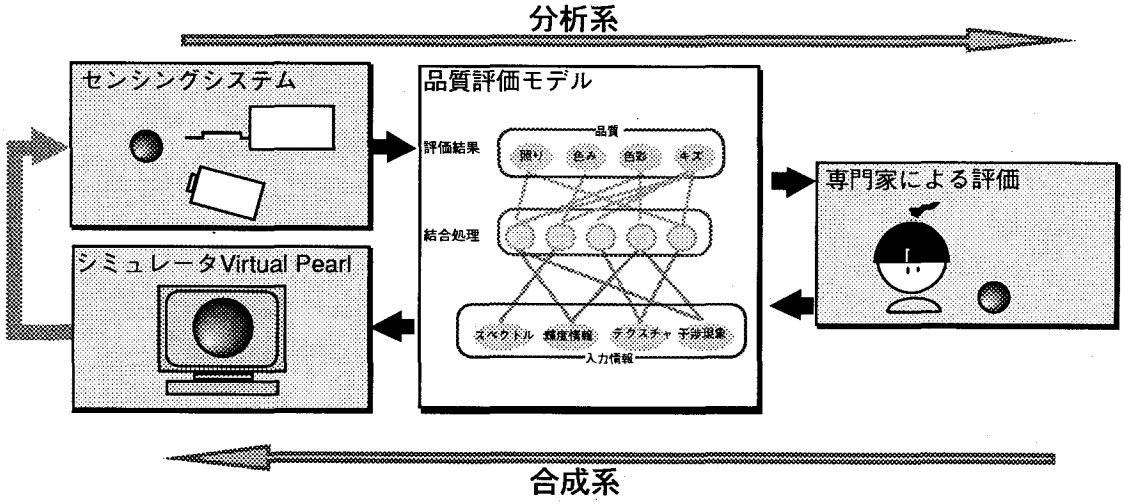


図1.3　真珠品質評価システムの構成

2章　感性計測技術の現状と動向

2.1　はじめに

本章では感性計測に関する従来の研究を整理する．まず手法に関して分析的アプローチと生成的アプローチの２つに分類してそれぞれの内容を説明する．次に具体的な研究事例について，計測の目的によって大別し紹介する．最後に従来の研究の問題点をまとめる[19].

2.2　感性計測の手法

解析・モデル化の手法を中心に述べる．これは大別して分析的アプローチと生成的アプローチの２つに分けられる[20]．ここではそれぞれの手法について説明する．

2.2.1　分析的アプローチ

計測したい感性量がどのような要因から構成されているか，潜在的な要因も含めて構造を抽出し，次に構造を説明できる客観的な物理量をたくさんの候補の中から選び出し要因との対応関係を求める．物理量の選択結果がセンシング方式設計のステージにおける具体的な仕様決定に反映される．ボトムアップ的なアプローチとも言われる．

ボトムアップ的アプローチの最も標準的な手法が，よく知られている計量心理学[7]，あるいは感覚計測[3]の枠組みとしてまとめられているものである．これは主に次の３つの手続きからなる[7]．まずSD法(Semantic Differential)などの心理評価実験手法により，感性量を言葉と程度で評価してもらい尺度データを収集する．次に因子分析など統計的解析によって尺度データの相関関係から評価に共通する因子のベクトルを求める．さらに抽出された因子と物理的特性との対応関係を重回帰分析などにより求める．

この手法は多くの研究によって有効性が確認されている．しかし万能というわけでなく，高次の感性のように非線形性を持つ問題にはこうした線形モデルを仮定した方法では精度良く近似できないという指摘もある．そこで最近，とくに高精度の計測・評価が必要な分野で，ニューラルネットなど非線形モデルを用いた解析・近似法[21]が提案されている．

2.2.2　生成的アプローチ

分析的アプローチと相対し，計測したい量の対応関係，要因，構造などに関しては，あらかじめわかっている知見に従って，少ない要因を使ってモデルをトップダウン的に

仮定する．次に物理的刺激（画像，音響，振動など）を模擬的に生成・制御するシミュレータの設計を行う．シミュレーション実験によって，モデルから予測される人間の応答と，実際の人間の反応を比較し，要因分析を行ってモデルにフィードバックする．この方法のメリットは，要因の変化が自由にしかも独立に行えることであるが，あくまでも模擬的な刺激であることを考慮した使い方が求められる．

モデル化の際には，生理学，実験心理学，認知科学などによって得られた問題に固有の知見をベースにしたり，エキスパートシステム法のように要素を細分化していくなどの方法がとられる．ニューラルネット，ファジィ，エキスパートシステム，学習制御などにもとづいた計算機モデルを構成し，CG, VRなどのシミュレーション技術によりシミュレーションや予測を行う．こうしたアプローチは最近のコンピュータ技術の成果を取り入れて急速に発展している．例えば生理学において得られた知見をニューラルネットによる計算機モデルで検証する試み[22]などもこの範疇にはいる．

2.3 感性計測の研究事例

感性計測の研究事例は，その目的によって次の２つに大別される．

(1) 感性を支援する．

(2) 感性を代行する．

(1)は製品設計支援の環境や，いわゆる人に優しい機能の実現が目的である．望ましい感性を引き起こすような物理的特性を作りだしたり調整したりするための計測機器を設計する．人間に提示することを主眼とし，判断したり決定したりするのは人間である．そのためには感性の内部構造をなるべく忠実にモデル化することが有効であり，メカニズムや関係を解きほぐすことが中心となる．

これに対して(2)は，検査・計測・認識装置の実現が目的である．最終的に刺激源である物理対象を定量化するため，感性を模倣した計測機器を作る．人間に理解させるというより，自立して動作（無人運転）することが重要である．だからモデル化といっても入力－出力の対応関係を探索することが主であり，内部表現が実際の人間と異なっていてもかまわない．

2.3.1 感性を支援するための計測

製品開発の支援環境については，実用レベルのシステムがいくつか開発されている．

小林らは色感（色によって喚起されるイメージ）と語感の対応関係をデータベース化するカラーイメージシステムの開発を70年代から進めてきた．130 種類の色と180の形容詞とを使い，SD法，カラープロジェクティブテクニック，因子分析などを繰り返し，色感がWarm - Cool とSoft - Hardの２軸で張られる２次元空間に分類されることを明ら

かにし，単色や配色の色感と語感との関係をイメージスケールという表現方法で数値化した．例えば赤，白，黒のようにイメージ距離が大きい配色は互いに競いあいダイナミックというイメージを持つ，というように配色から意味が求められ，逆に求めるイメージからそれにふさわしい配色を得ることもできる．分析的アプローチと生成的アプローチの両方からの研究によって，現在では映像シミュレーションなどにも拡張されている．インテリア，ファッション分野におけるカラーデザインの発想・計画支援など幅広い応用分野に展開されている[23].

また車の設計開発支援システムとして，人間の特性に関するデータベース，あるいは乗り心地や走行音などを評価する感性シミュレータの開発も行われている[10].

一方，エアコンに個人差学習機能を組み込んだ，温熱感覚モデル(Thermal Sensation）を用いたユーザ適応型制御に関する事例がある．温熱感覚は年齢，性別，体重／身長比などで個人差を生じる．エアコンの制御を個人差を含んだ温熱感覚に適応させるため，従来の温熱感覚モデルに個人のパラメータを採り入れた拡張PMV(Predictive Mean Vote)を提案した．ユーザが設定するCoolからHotまでの７段階の評価値に適応する制御パラメータの推定を行っている[24].

2.3.2　感性を代行する計測

感性を代行する計測機器は，人の能力と直接比較されるため，厳しい設計仕様が求められる．

感性の中でも１章で述べた「大衆の感性」と呼ばれる一般人の共通的な価値判断については，一次感覚やシンプルな構造の複合感覚に対して計量心理学の手法を用いてモデル化した例が数多くある．例えば視覚における濁りの定量化[25]，聴覚における音の拡がり感，透明感の心理評価と物理量との対応付け[26]などである．

感覚量のモデル化に成功しても，うまく装置化するためには適切なセンシング方式の選択が必要である．装置化まで行った例に低周波複合騒音[14]の装置試作，味覚センサを開発し主成分分析により定量化した研究[27]，複数のにおいセンサと主成分分析やニューラルネットワークモデルを用いた嗅覚の研究[28]が人と同等の識別機能を実現している．

これが，検査の自動化などにおける「専門家の感性」と呼ばれる専門家の勘や経験的な価値判断の場合はさらに難しくなる．この場合の感性は，高分解能，多次元（多数要因の複合化），高再現性を特徴としている．これまでに布の風合いの測定装置[29]など，まだわずかな事例しか報告されていないことからもわかるように，実用化は容易でない．

この問題には，対象の物理量と感性量の対応関係を求めることが主な課題となる．一致率をあげるためのモデルの精緻化，実際の物理量のセンシング方式をどのようにするか，不一致の原因をどのようにみつけるかなど，残された課題は少なくない．

2.4 まとめ

本章では感性計測技術の従来研究について整理した．感性計測の考え方については，昨今の感性ブームに乗って次第に広まってきているが，感性の構造解析や物理量との対応付けといった個別の手法については，感性の複雑さを十分に分析・表現できるものではなく，ここで述べた手法をはじめとする新しい観点からのアプローチが望まれる．とくに本論文で議論する「専門家の感性」を扱う手法については，ほとんど確立されていないといえる．またモデル化，センシング方式設計，最適化の段階を系統的に進めていくため，分析的・生成的の双方からのアプローチや，モデルの評価・フィードバックの仕掛けなど，システム構築の立場での方法を確立していくことが不可欠である．

3章　表面性状評価モデルに基づく真珠キズ評価

3.1　はじめに

1章で述べたように，専門家の評価に関する価値観を定量化するにあたって，専門家の意識下に隠れた潜在的な要因を明らかにする問題がある．この章では，真珠のキズの識別問題を取り上げ，心理学的手法によってキズと形状を統一的に説明する表面性状評価モデルを構築する．そしてモデルに基づいて，専門家の評価作業に着目した，リング光源投影法を用いたキズ評価方式を提案する．実際にキズ評価装置を試作し，実験結果から解析の有効性を示す[30].

3.2　表面性状評価モデルの構築

3.2.1　真珠のキズ・形状評価

キズ・形状評価については，その評価内容が比較的客観性を持っていると思われる．しかし実際には，評価基準が明文化できず，限度見本に従って評価が行われている．検討を進めていくうちに，これらが複数の要因がからみあった一種の感性量であることが予想された．また，キズ検査は自動化の中でも最も困難な対象であり，特に球体のキズということで，光学系等で種々の工夫も不可欠であると考えられた．

そこでまず，以下に述べる解析を実施した．

3.2.2　心理実験による評価ファクタの分析

真珠のキズに関する評価要因を明らかにするために，品質管理部門の専門家に対して評定実験と分析を実施した．

(1)評定実験

実験に用いる評定用語は，インタビュー調査によって集めた評価用語についてプリテストを行い，21項目を選んだ．キズ（6ランク），形状（ラウンド，セミラウンド，セミフラットの3種類）の異なる真珠サンプル60個を準備し，2人の専門家に「かなりそう思う」「ややそう思う」「どちらともいえない」「ややそう思わない」「かなりそう思わない」の5段階評定をしてもらった．また併せてキズがどのように見えているのかを，実際に絵に描いて示してもらった．

(2) 因子分析

評定実験の結果に対し，主因子法による因子分析を行った．表3.1にバリマックス回転後の各因子の因子負荷量を示す．この結果，４つの有意な因子が得られた．

第１因子は「密集している」「小キズが多い」など，細かいキズや凹凸の変化と相関を示しており，「高周波成分因子」と名付ける．

第２因子は「はがれ」「多大キズが多い」など，大きな形状の変化を代表していると考えられるので「低周波成分因子」と名付ける．

第３因子は「巻きがうすい」「照りが弱い」などの業界用語が高い得点を得ている．これらは表面がよく光る状態を表していると思われるので「輝き（光沢）因子」とする．

第４因子は「白キズが多い」「巻きムラがめだつ」などよく目立つキズの表現と，「くぼみ」など目立ちにくいキズの表現とが対になっているので「顕在性因子」と命名する．

表3.1　　因子負荷量

因子	第１	第２	第３	第４
寄与率	24.0%	11.2%	8.9%	8.4%
細かいキズが多い	-0.62	-0.22	- 0.32	- 0.34
小キズが多い	-0.72	-0.35	- 0.18	- 0.07
中キズが多い	-0.68	0.06	0.20	- 0.08
大キズが多い	-0.33	0.28	0.40	-0.08
多大キズが多い	-0.22	0.60	0.18	0.32
穴口に多い	0.00	0.38	0.03	-0.05
中央に多い	-0.80	-0.08	0.02	0.03
ふくらんでいる	-0.09	-0.33	0.02	0.01
くぼんでいる	-0.26	0.28	0.04	- 0.41
白キズが多い	-0.29	0.07	0.19	- 0.67
内部キズが多い	0.17	-0.33	0.21	- 0.14
はがれ	-0.36	0.64	0.14	0.40
密集している	-0.86	0.10	-0.18	-0.06
形がみだれている	-0.74	0.53	0.01	-0.07
対称性がない	-0.69	0.60	-0.09	0.04
しわが多い	0.13	0.30	-0.27	-0.14
てりが弱い	-0.19	-0.01	-0.76	0.00
巻きムラが目立つ	-0.15	0.08	-0.05	- 0.65
巻きが薄い	-0.13	-0.01	-0.70	0.15
形状評価	0.13	0.18	- 0.49	-0.51
総合評価	-0.83	0.28	-0.09	0.10

分析の結果，総合評価（キズのランク）に対して，第２因子である「低周波成分因子」の因子負荷量が0.28に上り，形状の要素がキズに対して関わりを持つことがわかった．また，光沢に関する要素についても，キズの評価に影響していることもわかった．

ただし，第４因子までの累積寄与率が60%に満たないことや，第４因子の意味が明白でないことなど，必ずしも十分ではなく，評価用語の選択など実験方法の見直しが必要であると思われる．しかし，当初推測したように，キズの評価に形状や光沢など他の要因が関わっていることが明らかとなった．

3.2.3　キズ認知実験

次に，専門家の眼が真珠の何（どのような物理現象）を視てキズを認知しているのかを，キズの認知位置との関係を調べることにより明らかにする実験を行った．

専門家によるキズ評価作業は，直射日光のはいらない北側の窓際で行われる．室内照明は行わず窓からのみ採光する（この光はJISで規定された北空昼光色に相当する）．白い布の上に置かれた真珠をピンセット等ですばやく回転させながら全周を観察する（図3.1）．図3.2に真珠のキズの例を示す．実験では，これと同じ光学条件のもとで，キズがどの位置にあるときに見えるのかを指示してもらった．

真珠の表面は図3.3に示すような領域Ａ（光源の正反射領域），Ｂ（光源の像の輪郭部分），Ｃ（非正反射領域）の３領域にあるキズについて，キズが見えるあるいは見えない，を答えてもらう．心理計測実験で用いた真珠の中から選んだキズの代表的なサンプル20個を用いて実験した．

実験結果を図3.4に示す．領域Ｂではすべてのキズが認知されたが，領域Ａ，Ｃではキズが見えなくなる現象が生じた．この結果をキズの種類と関連させて次の４つのタイプに分けることができる．

(Type1)　凹凸の激しいキズ
- 領域Ａ・Ｂ・Ｃで見えるキズ
- ひっかきキズなど

(Type2)　凹凸のあるキズ
- 領域Ａ・Ｂで見えてＣで見えないキズ
- 大半のキズがここに属する

(Type3)　色彩のキズ
- 領域Ｃでしか見えないキズ
- 巻きむら

(Type4)　凹凸のごく僅かなキズ
- 領域Ｂでしか見えないキズ

・なだらかな盛り上がり，なだらかなくぼみ，ぼけなど

この結果から，次のように考察する．一般的に眼は，表面にはっきり認められるような凹凸のある面では面そのものに自動的にピントをあわせるが，表面の凹凸が少ない時には，表面に映る光源の像にピントをあわせ，そのゆがみや鮮明度によって表面の凹凸を判断することが知られている[30]．しかも本実験では観測面が球面という特徴を持っている．平面であれば像は平面より後方にできるが，球面に反射した像の場合は球面上に結像される．従って，専門家は同じピントを保ったまま，大きな凹凸の変化（Type1, 2）や色彩の変化（Type3）をとらえると共に，真珠表面に映った光源の像のゆがみや鮮明度から微妙な凹凸の変化や光沢の変化（Type4）も同時にとらえられる．その結果，前の実験で示したようなキズの大きさや深さ（高周波成分から低周波成分まで），光沢や目立ち具合を総合的に評価していると推測される．

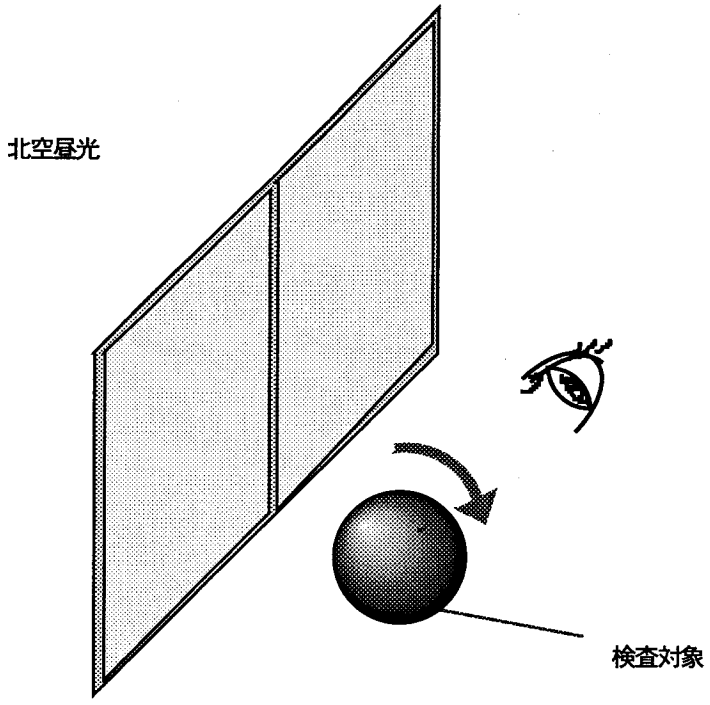


図3.1　評価作業環境

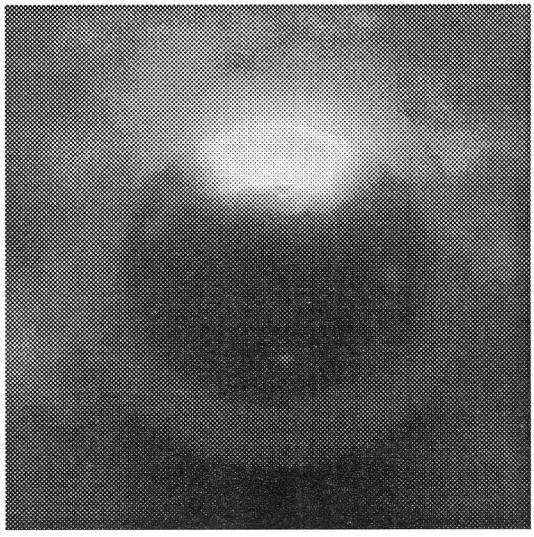


図3.2　真珠のキズ（中キズ）

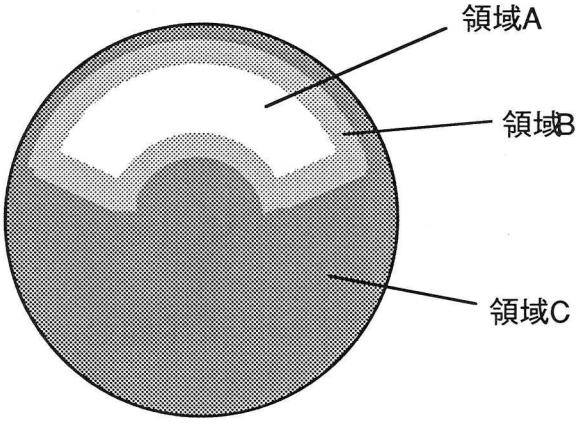


図3.3 キズの観察領域

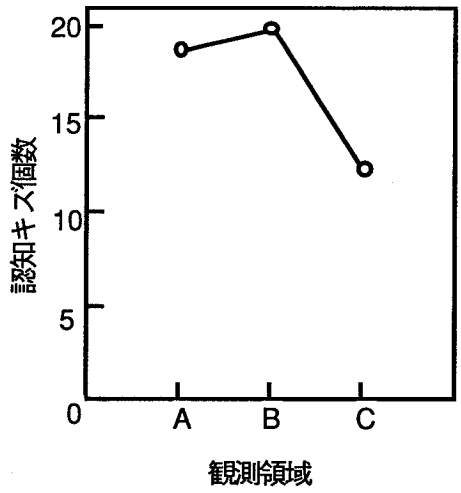


図3.4　実験結果

3.2.4　表面性状評価モデル

２つの実験結果から，専門家によるキズの評価は，単に表面に点在するキズを評価しているだけではなく，球面全体について様々な周期の凹凸の分布具合いを総合的に評価したものといえる．またキズの専門家の眼が，真珠表面の凹凸そのものに注目していると同時に，表面に映る光源の像のゆがみから表面の微細な凹凸を評価していると考えられる．

さらに専門家による形状の評価についても，インタビュー調査でキズに関する表現が含まれていることが確認されており，キズと同じように球面全体についての凹凸の分布具合いを評価していると思われる．

これまでの考察から，これまで「キズ」と「形状」というマクロな評価項目は，独立ではなく互いに関係しており，どちらも複数の表面性状の要素を統合的に評価した感覚量であると考えられる．この感覚量と表面の凹凸という物理量とを関係付けて図3.5のような表面性状評価モデルとしてまとめることができる．「キズ」は光沢や点在するキズ，あるいは形状欠陥などの主に高周波成分の変化を評価した感覚量であり，「形状」は輪郭の飛び出し，へこみやキズの量などの主に低周波成分の変化を評価した感覚量である．

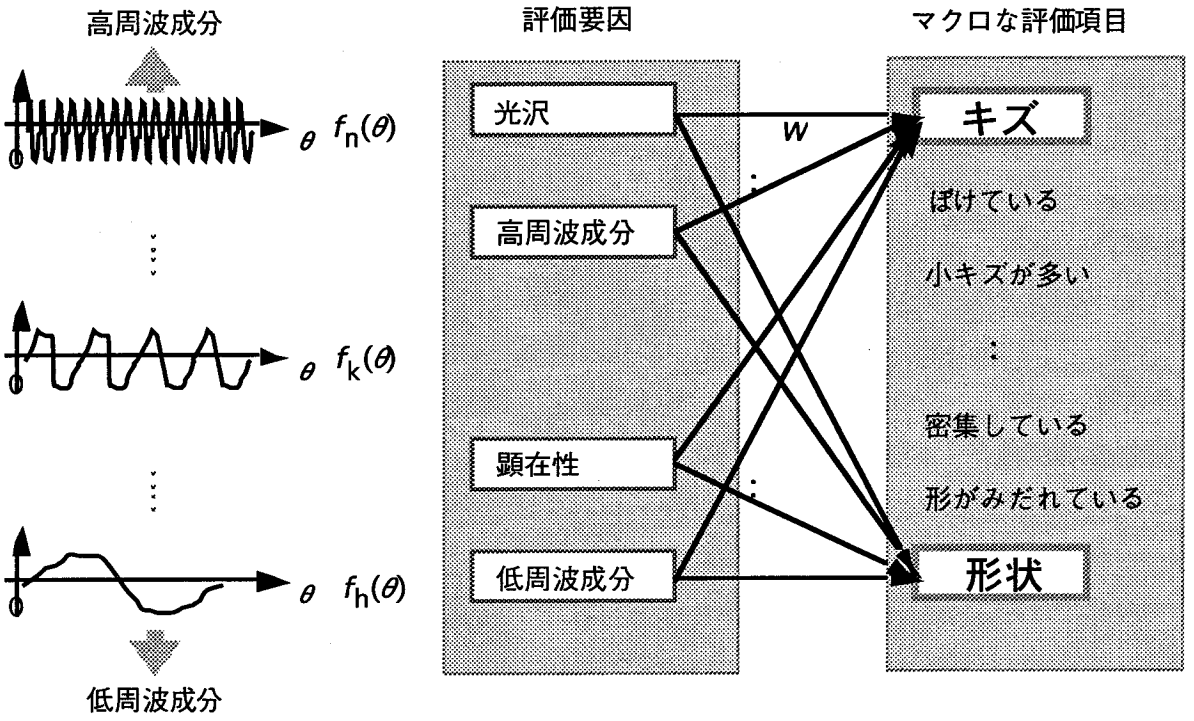


図3.5　表面性状評価モデル

3.3 キズ評価方式

本節では表面性状評価モデルに基づくリング光源投影法を用いたキズ評価方式を提案する．この方式は，専門家が球面に映る光源の像を観察している点に着目したものである．

3.3.1 光学系の構成

図3.6に光学系の構成を示す．図のように，対象物体を取り囲んで複数のリング光源を同じ中心軸上に多段に配置する．同じく中心軸上に配置したCCDカメラで真珠表面に映るリング光源の像を撮像する．こうして得られた画像上では，形状のみだれなどの低周波の凹凸は，図3.7に示すような光梃子効果により輪郭やリングのゆがみになって現れる．点在するキズは，リングのエッジの突起やへこみ，リングのとぎれ，二重化などになって現れる．もっと細かな表面の凹凸（ぼけ）は，リングの輝度の低下として検出できる．この光学系の特徴として以下の点が挙げられる．

(1) 光梃子効果とパターン化光源のゆがみ[32]を利用することによって，なだらかな凹凸の変化を高い分解能で検出できる
(2) 大きな凹凸と微小な凹凸とが同時に検出できる
(3) 球面なので必ず正反射成分をとらえられる．また焦点ずれの心配がない．

3.3.2 処理の概要

図3.8に処理の流れを示す．CCDカメラから入力された画像を極座標展開して一次元信号に変換する．この信号に対し，移動平均処理，平滑化微分処理によって高周波成分，低周波成分，光沢成分をそれぞれ取り出し，マージ処理によりキズ候補を抽出する．最後に統合処理を行い，キズの総合評価を行う．ただし，今回は顕在性因子については，内部のキズと表面のキズとの分離が困難との判断により，処理の対象としなかった．

このときキズの候補等を抽出するため実際に求める評価パラメータを選ぶ必要がある．ここでは試行錯誤の結果，高周波成分としては，信号のピークの面積によって極小キズ，小キズ，中キズ，大キズ，多大キズの５種類に分類し，それぞれの個数と総面積とを使用した．このときキズの位置が穴口（糸を通すための穴のまわり）付近であると，キズの評価の程度が軽くなるのを，穴口係数としてテーブル化し，面積算出の際に重みづけを行った．低周波成分としては，リングの縦横比，30°-150°方向の脹らみ度（FFTによる第６高調波成分），X軸，Y軸それぞれについてのリングの対称度（軸からの距離の差分），光沢因子としては，全体の平均輝度と，原点を中心として扇型に12等分したときの，各領域の平均輝度の変化を用いた．

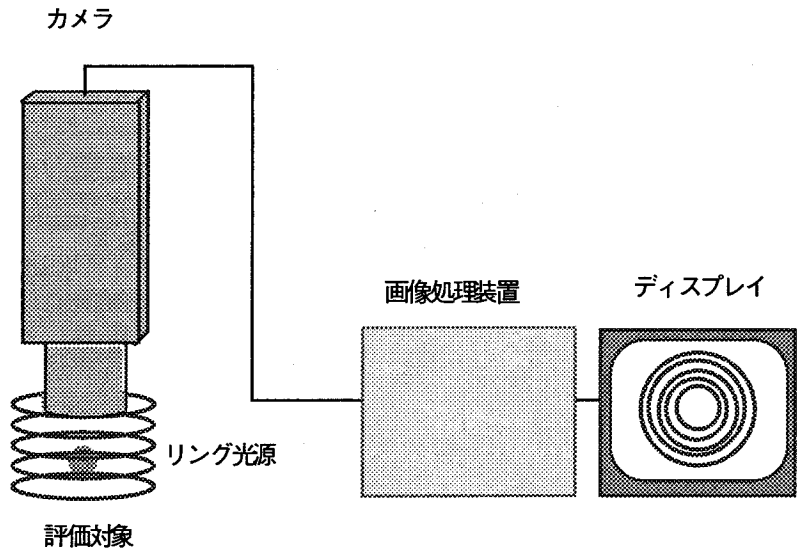


図3.6　光学系の構成

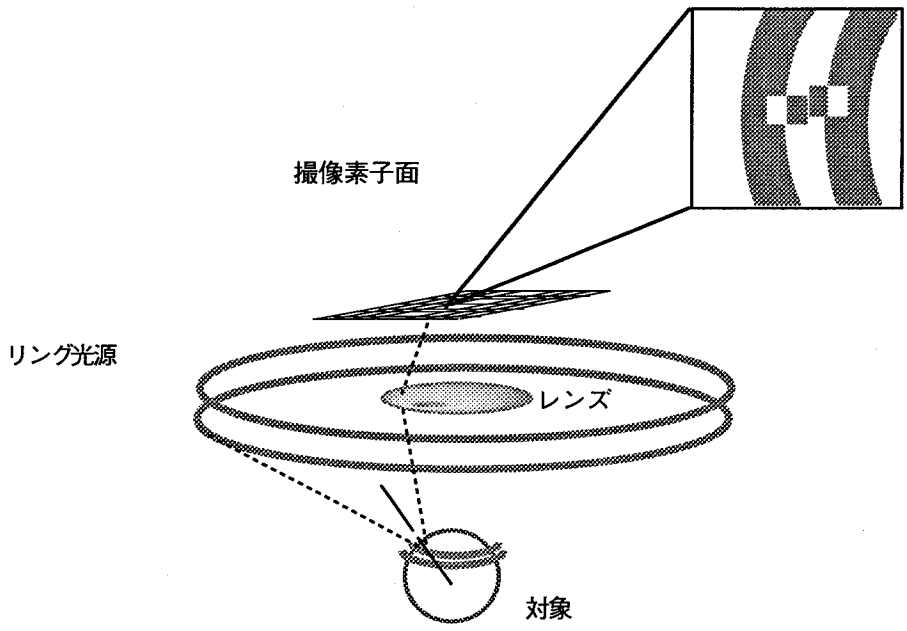


図3.7　光梃子効果による光源像のゆがみ

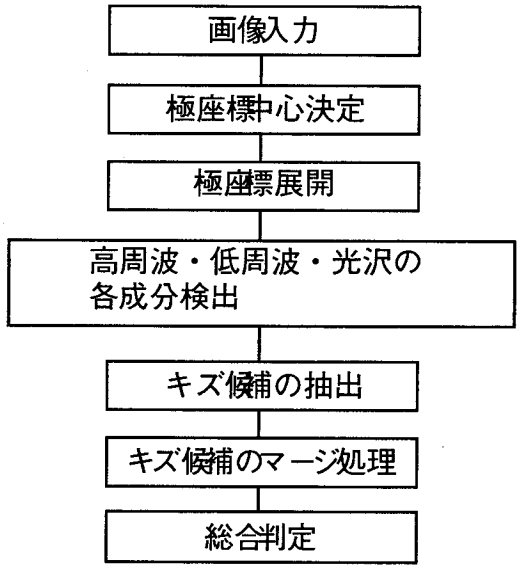


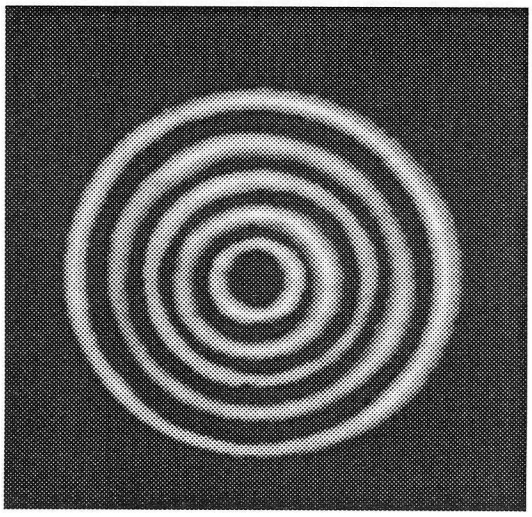
図3.8　処理の流れ

3.4　実験と考察

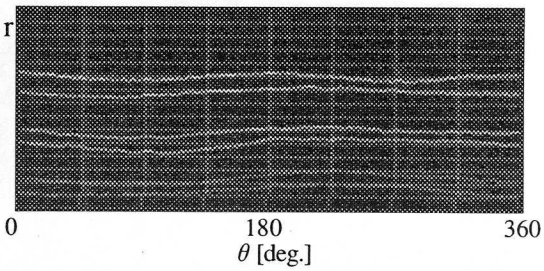
提案した方式をサンプルデータに適用し検討を行った．実験にはキズ認知実験に用いた真珠サンプルについて，専門家に見てもらったのと同じ観測面をCCDカメラで撮影し，得られた濃淡画像について処理を行った．検出限界相当の小キズ（なだらかなふくらみ）と多大キズ（凹凸のはっきりしたキズ）の各サンプルの処理結果の例を図3.9, 3.10に示す．(a) (b) (c) (d)はそれぞれリング光源像部分の濃淡画像，極座標展開結果，キズ候補の抽出処理結果，統合処理結果の画像である．

図3.9(a)においてリング光源のエッジ部分に，キズの影響と思われるピークが見られる．図3.10(a)ではリングの大きなみだれが見られる．(d)の処理結果により，それぞれのキズを抽出できることが確認された．

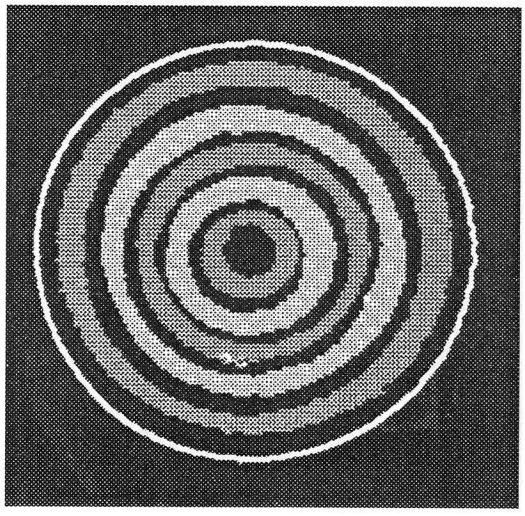
図3.11にパラメータの違いによる識別一致率の差を示す．ただしこの段階では，1枚の画像だけを処理した結果であり，真珠の全周を総合的に判断したものではないので，厳密な意味での識別一致率ではない．しかし従来方式のキズ要素だけから判断する方式と比較すると，低周波成分および光沢成分の導入によって，一致率が向上することが確



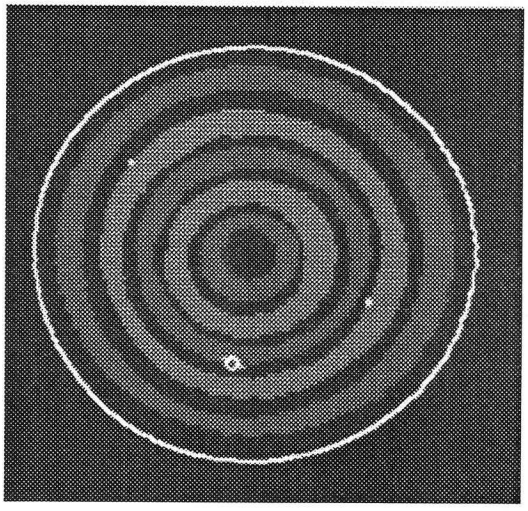
(a) 濃淡画像



(b) 極座標展開

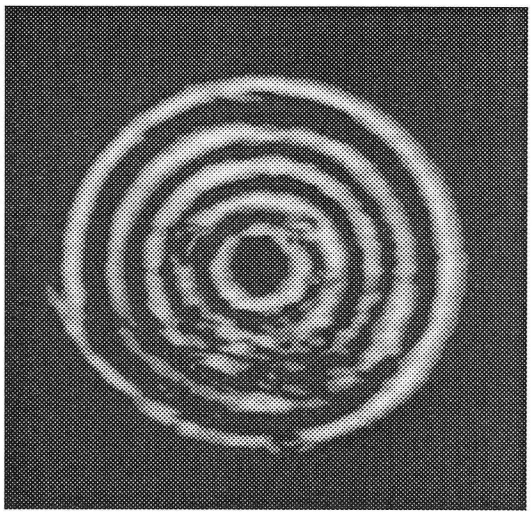


(c) キズ候補の抽出

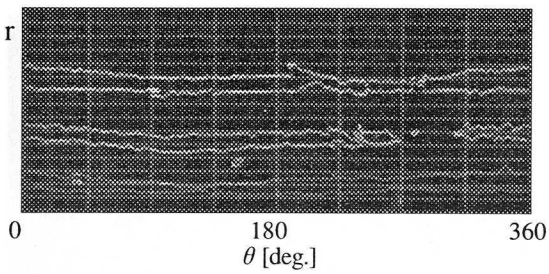


(d)マージ処理

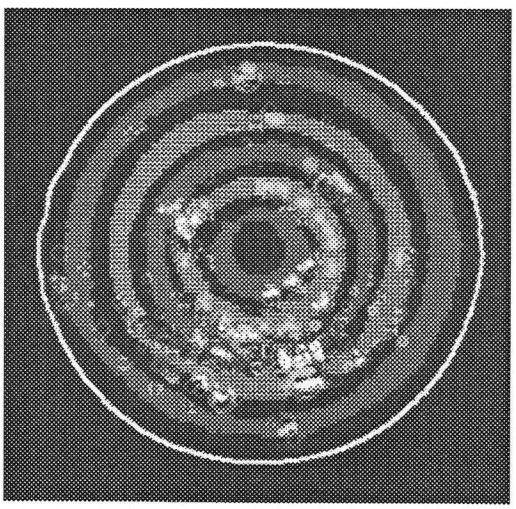
図3.9　処理結果(1)　小キズ



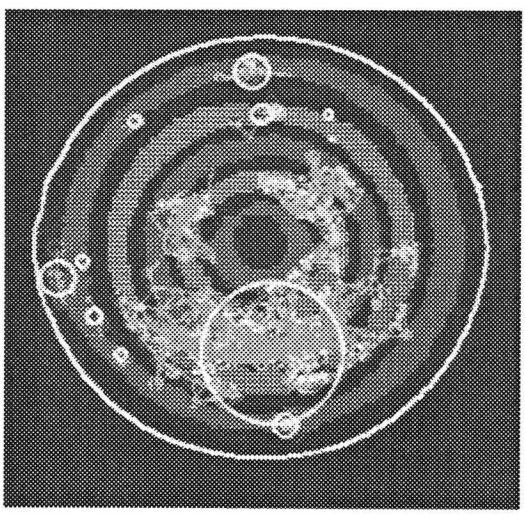
(a) 濃淡画像



(b) 極座標展開



(c) キズ候補の抽出



(d)マージ処理

図3.10　処理結果(2)　多大キズ

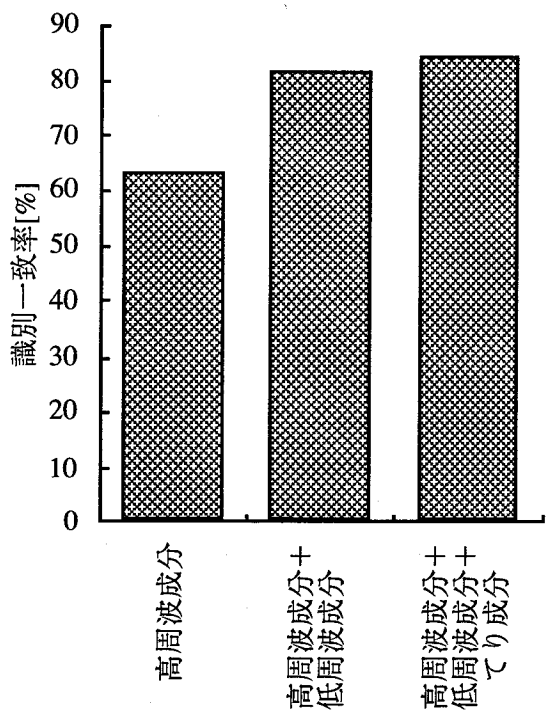


図3.11　パラメータの違いによる識別一致率の比較

認された．このことから，専門家の感性を解析し，評価モデルに組み込むことは有効であると思われる．

3.5　まとめ

キズの評価は自動化問題の中でも特に難しく，評価モデル，光学系，統合化処理などの個別の課題を系統立てたアプローチが必要である．本章では，真珠のキズ評価問題に感性計測の方法を応用し，キズに関する専門家の感性について分析実験と考察を行い，表面性状評価モデルを提案した．そして球体のキズ評価方式としてリング光源を用いた方式を提案し，試作システムにより実験を行い，その有効性を示した．

4章　ニューラルネットの感度特性を用いた要因特定法と真珠色彩識別

4.1　はじめに

この章では，専門家の評価の定量化にあたって，検査基準とパラメータの因果関係の問題のうち，特にパラメータ選択問題を取り上げる．

感性量と物理量の因果関係については，従来，計量心理学的手法による感覚量の定量化として扱われていた．また最近のニューラルネットワーク（以下，NNと記す）をはじめとする学習・適応手法[33][34]によって，一致率の高い判定アルゴリズムの自動生成が可能であることが報告されている．

しかし，判定アルゴリズムの結果が専門家と高い一致率を持つためには，使用される計測物理量が，専門家の感性量をよく反映していることが前提となる．つまり，どのような計測物理量を判定に用いるかの選択作業が極めて重要である．ただし，実用面からはできるだけ実現が容易で安価なハードウェアが望まれることから，考え得るあらゆる計測物理量を対象にした取捨選択ではなく，可能な範囲内で判定に寄与する計測物理量を選択する作業が，専門家の判定結果との一致率向上に有効であると考えられる．

本章では，計測物理量の選択が識別一致率の向上に有効であるとの仮定に基づき，NNの入力層－出力層間の感度特性を用いた要因特定法を提案する．これは装置設計における計測物理量の選択のための手法である．有効性の検証のため，専門家による色彩識別に対して，具体的なシステム構築の検討評価を行う．計測物理量の選択結果を反映した試作装置の性能評価を，実際の専門家の結果との比較により行い，本手法が専門家を代行する検査システムの構築に有効であることを確認する[16][21].

4.2　ニューラルネットワークの感度特性を用いた要因特定法

本章で提案する手法は，学習後の階層型NNにおいて入力層－出力層間の感度が求められることに着目し，この感度を利用して，多数の入力要素の中からネットワークの入出力関係に寄与する有効な要因を特定するものである．入力要素のまず感度特性を求める方法を述べ，次に要因特定アルゴリズムについて説明する．

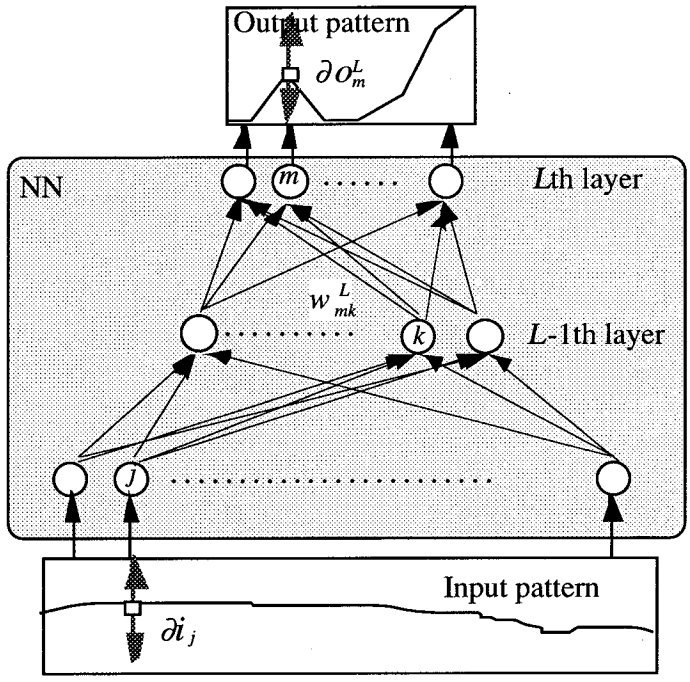


図 4.1　階層型ニューラルネットワークの感度特性

4.2.1　入力層ー出力層間の感度特性

NNとして図4.1に示す多層のネットワークを考える．第L層第mユニットの出力は次式で表される．

$$o_m^L = f(net_m^L) \qquad \cdots\cdots (4.1)$$

ただし　$net_m^L = \sum_k w_{mk}^L o_k^{L-1} + \theta_m^L$

$$net_m^1 = i_m$$

ここで，net_m^Lは第L層第mユニットの入力の総和，i_mは第1層すなわち入力層の入力ユニット，o_m^Lは第L層第mユニットの出力，θ_m^Lは第L層第mユニットのしきい値，fはユニットの入出力関数，w_{mk}^Lは第L層第mユニットと第$L-1$層第kユニットの間の結合荷重である．

今，第L層第mユニットの出力o_m^Lの入力層第jユニットi_jに関する偏微分係数D_{mj}^Lは次のように表わされる．

$$D_{mj}^{L} = \frac{\partial o_m^L}{\partial i_j} = \frac{\partial o_m^L}{\partial net_m^L}\frac{\partial net_m^L}{\partial i_j}$$

$$= f'(net_m^L)\sum_k w_{mk}^L \frac{\partial o_k^{L-1}}{\partial i_j} \qquad \cdots\cdots (4.2)$$

(4.2)式において$\frac{\partial o_k^{L-1}}{\partial i_j} = D_{kj}^{L-1}$であるから，任意の出力ユニットの入力ユニットに関する偏微分係数D_{mj}^Lは次式に示すように$L=2$からLに向かって再帰的に求めることができる．

$$D_{mj}^2 = f'(net_m^2)\, w_{mj}^2$$

$$D_{mj}^L = f'(net_m^L)\sum_k w_{mk}^L D_{kj}^{L-1} \qquad \cdots\cdots (4.3)$$

例えば$L=3$で，fとしてシグモイド関数を使用すると，

$$f'(x) = f(x)\,(1 - f(x)) \qquad \cdots\cdots (4.4)$$

であるから，出力ユニットの入力ユニットに関する偏微分係数は(4.3)(4.4)式より次式のとおり求められる．

$$D_{mj}^3 = \frac{\partial o_m^3}{\partial i_j} = o_m^3(1 - o_m^3)\sum_k w_{mk}^3 o_k^2\,(1 - o_k^2)\, w_{kj}^2 \qquad \cdots\cdots (4.5)$$

学習後のネットワークの結合荷重は既知であるから，適当な入力値i_mを与えることにより，(4.5)式は計算可能になり，任意の出力ユニットの入力ユニットに関する偏微分係数すなわち感度を求めることができる．

以上の定式化は，バックプロパゲーションアルゴリズムにおいて，誤差関数を最小にする結合荷重の修正量を導出する過程に類似している．しかし感度特性がi_jに関する偏微分であるのに対し，修正量はw_{mk}^Lに関する偏微分係数を用いる．また感度特性が感度そのものを扱うのに対し，修正量は誤差関数の最小化という目的を持つ．さらに再帰の計算も，修正量は上式とは逆に出力層から入力層へ向かって行われる．このようにここでの定式化は，バックプロパゲーションの基本原理の応用の１つではあるが，その内容や導出方法は異なっており，出力ユニットの挙動によって入力ユニットを評価するという独自の目的のために導かれたものである．

4.2.2　入力ユニットの寄与度と寄与要素の特定方法

次に(4.5)式を用いて寄与要素の特定を行う手順を説明する．まず偏微分係数D_{mj}^Lについて考察すると，図4.1において入力ユニットの値を微小に変化させたときの，出力

ユニットの値の変動を表している．今，逆に１つの入力ユニット j に着目すると，各偏微分係数 D^L_{mj} は入力ユニット j が各出力ユニットに及ぼす寄与の程度と考えることができる．そこで入力ユニット j それぞれについて，全出力ユニットの中の最大の偏微分係数を入力ユニットの寄与度 C_j とする．すなわち

$$C_j = \frac{\max_m |D^3_{mj}|}{M} \qquad \cdots\cdots (4.6)$$

ただし，$M = \max_{m,j} |D^3_{mj}|$

をすべての j について求める．

ここで寄与度 C_j が小さい入力ユニットは，ネットワークが表す対応関係に影響を与えない独立した要素か，あるいは他の入力ユニットと従属関係にある冗長な要素と考えられ，ネットワークから削除しても影響を及ぼさないと推測される．そこで適当なしきい値 T を設けて，

$$C_j < T \qquad \cdots\cdots (4.7)$$

を満たす入力ユニットを削除候補とする．従って，削除の初期段階では多数の入力ユニットを一度に削除し，後期段階では１つまたは数個ずつ削除するようになる．

残った入力ユニットについてネットワークを構成し，同様に学習を行う．そしてネットワークの収束状態が削除前のネットワークより悪化しなければ，削除された入力ユニットはネットワークの入出力関係に寄与していないと考えて，さらに同様の手続きを実行する．削除前のネットワークより収束状態が悪化した場合は，その入力ユニットを削除せず終了する．収束状態が悪化したかどうかについては，学習後のネットワークの未学習パターンに対する識別一致率を求め，この値が前回より下回った場合に悪化したと判断することにした．

こうして最終的に残った入力ユニットを，識別に寄与する要素と特定する．なお著書らの論文[16]では，感度を裏付ける解析的手法がなく，入力の微小変化に対する出力変化を数値実験的に求め，その相対的変化から寄与要素を選択していたので，一般的な議論にできなかった．本論文では入力層－出力層間の偏微分係数の計算を定式化し，入力要素選考の基準を寄与度として明確化した結果，与えられた入力要素の中から主要な要素を選択する手法として一般化できた．

また提案手法に類似したものとして，主成分分析等多変量解析の方法があるが，これらは入力要素を線形変換によって少数個の主要な因子で代表させる手法であり，入力要素自体の次元数を削減するものではない．一方，提案手法は，非寄与要素を入力から削除する目的を持つとともに，情報の分散表現や非線形変換など汎化方法として優れた機

能を持つNN[35]を用いることにより，拡張性，汎用性を向上させる目的を持っている．言い換えれば，入力に何を用いればよいか，あるいは専門家の評価との一致率をいかに上げるかといった，識別装置開発の現場的な問題に対して有効な手法と考えられる．

4.3 真珠色彩識別の概要と装置試作の手順

真珠はその複雑な光学的特性のため品質の定量化が難しく，専門家が色彩，照り，色みといった感覚的な指標と，詳細には限度見本との比較により識別する．色彩は，主に真珠の物体色を評価する指標であるが，薄膜干渉による様々な干渉色が現れるため，干渉現象に関わる色みの評価指標との関連も予想される．また今回対象とする ϕ 7.5mm 真珠の仕上げ前工程における色彩識別は，ホワイトからクリームまでの僅かな色彩差を 10 カテゴリに分けるもので，素人には見分けられない非常に高い分解能を要する作業である．なお複数の専門家による本作業の識別一致率 DR (Discrimination rates) は 80%（±1カテゴリの誤差を含めた拡張識別一致率 EDR (Extended DR) は100%），処理速度は数個 / 秒であり，これと同等の検査性能を持つ装置が要求される．

真珠の色彩識別におけるこれまでの研究[18]では，カラーカメラ等の汎用的な計測器が使われていたが，実用レベルで専門家と同等の検査性能を実現するには至っていない．

以上の背景のもとで，専門家と同等の識別一致率をめざして，感性計測の枠組みに沿って真珠の色彩識別装置を試作するプロセスについて述べる．色彩を精密に計測するためにまず分光スペクトルに立ち返り，前章で提案した要因特定法を用いて，識別に寄与する波長帯を選択する解析を行った．その結果，狭帯域の干渉フィルタとCCDカメラによる，低価格の色彩識別装置が実現できる可能性が得られたので，性能確認のため装置試作を行った．さらに識別一致率の向上のため装置の最適化を行う意味で，要因特定法を再度用いて画像上の特徴量の選択を行った．

以下に要因特定法を分光スペクトル及び画像に適用し，提案手法が識別一致率の向上に有効であることを示す．

4.4 要因特定法のスペクトルへの応用

4.4.1 ネットワークの構成

色彩によりホワイト（カテゴリ 0）からクリーム（カテゴリ 9）まで 10 段階にカテゴリ分けされる100個の真珠サンプルについて，積分球型分光光度計を用いて380 - 780 nm の可視範囲を 5 nm 間隔でサンプリングし， 81 点の分光スペクトルを測定した．図 4.2 にカテゴリ 0, 3, 6, 9 の分光スペクトルの例を示す．

3 層のNNにおいて，入力層には 81 個の分光スペクトル強度を学習パターンとして与

え，出力層にはカテゴリ分けの結果を教師パターンとして与える．教師パターンは専門家によるカテゴリ分け結果を10次元のベクトル表示 $\boldsymbol{t}_n = \left(t_0, \cdots\cdots, t_9\right)^T = \{ 0\,(k < n), 0.5\,(k = n), 1\,(k > n) \}$ したもので，例えばカテゴリ3であれば $(0, 0, 0, 0.5, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$ のようなベクトル表現となる．なお専門家のカテゴリ分けの精度である±1の誤差をネットワークに反映させるため，教師パターンに中間値0.5を設けた．また中間層については10個，20個，40個の場合で予備実験を行い，ネットワークが収束するのに十分と思われる20個を採用した．

4.4.2 ネットワークの学習

学習はバックプロパゲーションにより行い，各ネットワークに学習パターンを1000回ずつ提示して，その時点でのテストパターンに対する識別結果を得た．この学習・識別を繰り返し，テストパターンに対する平均2乗誤差が最小値に達した時（それ以上学習を行うと平均2乗誤差が増加する，すなわち過学習状態になる）で終了した．

なお識別結果はCross Validation[36]の方法によった．全サンプルを10サンプルずつ（各カテゴリ1サンプル）10個のデータセットに分割し，このうち9データセットを学習パターンに使用し，残りの未学習の1データセットをテストパターンにあてた．そしてデータセットの組み合わせを順次換えていき，合計で900個の学習パターン及び100個のテストパターンの識別結果から識別一致率を算出した．

4.4.3 寄与度の計算

(4.6)式を用いて学習終了後のネットワークの入力要素の寄与度を算出する．今，(4.5)式において偏微分係数を計算するために適当な入力値を与える必要がある．学習に用いた分光スペクトル全てを入力値として順に与えることも考えられるが，冗長である．ここでは学習に用いた分光スペクトルをカテゴリ毎に分け，それぞれ入力要素ごとの中央値を集めて構成した10種類の分光スペクトルを，カテゴリの代表パターンとして用いた．図4.3に削除処理前の状態のネットワークにカテゴリ0, 3, 6, 9の代表パターンを与えたときの偏微分係数を示し，図4.4(a)にこれから求めた寄与度を示す．図4.3のいずれの場合も，与えた代表パターンのカテゴリに相当する出力ユニット（例えばカテゴリ3の代表パターンを用いた場合は第3出力ユニット）の係数が大きい値を示しており，偏微分係数が問題の特性を反映していることがわかる．

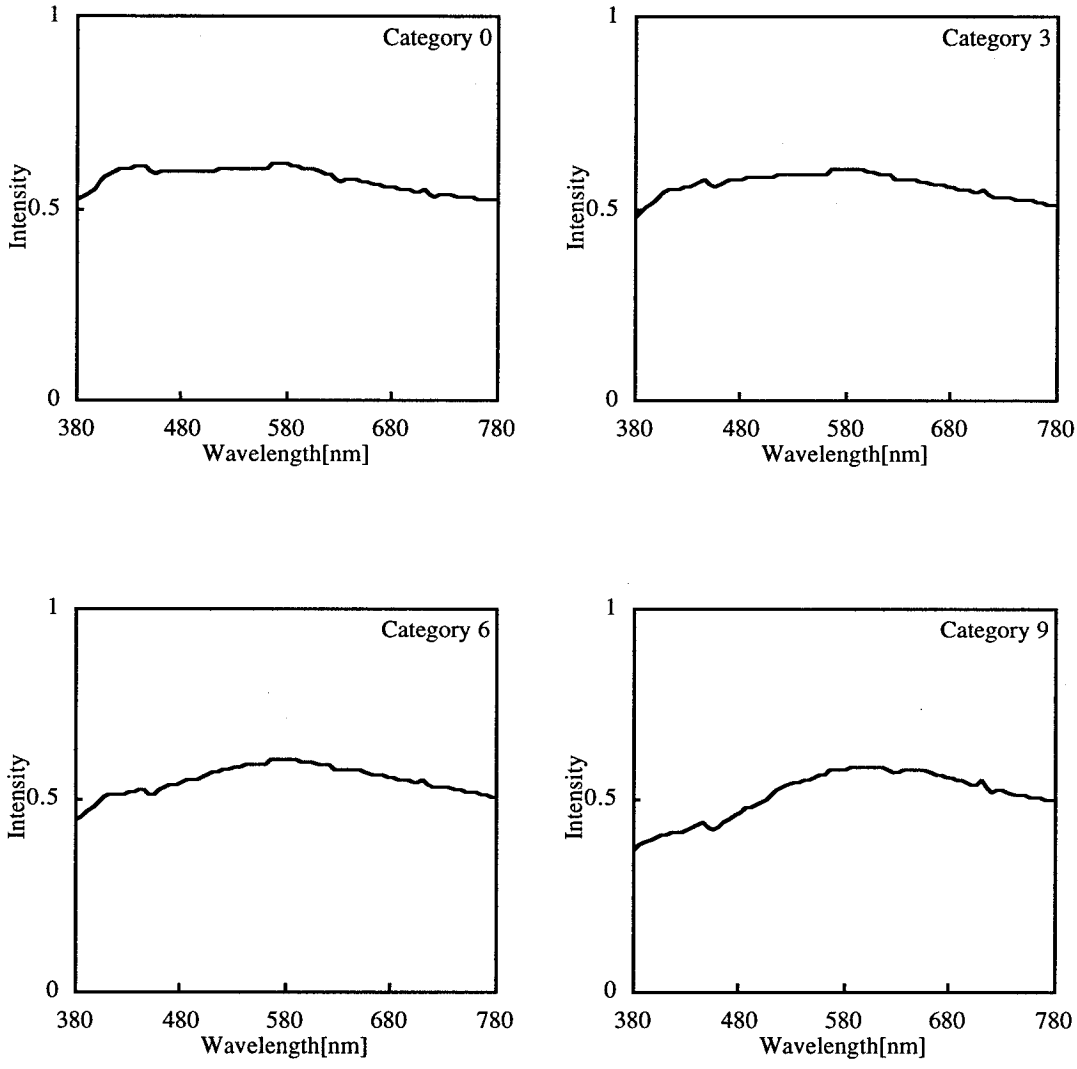


図 4.2　入力パターン（分光スペクトル）の例

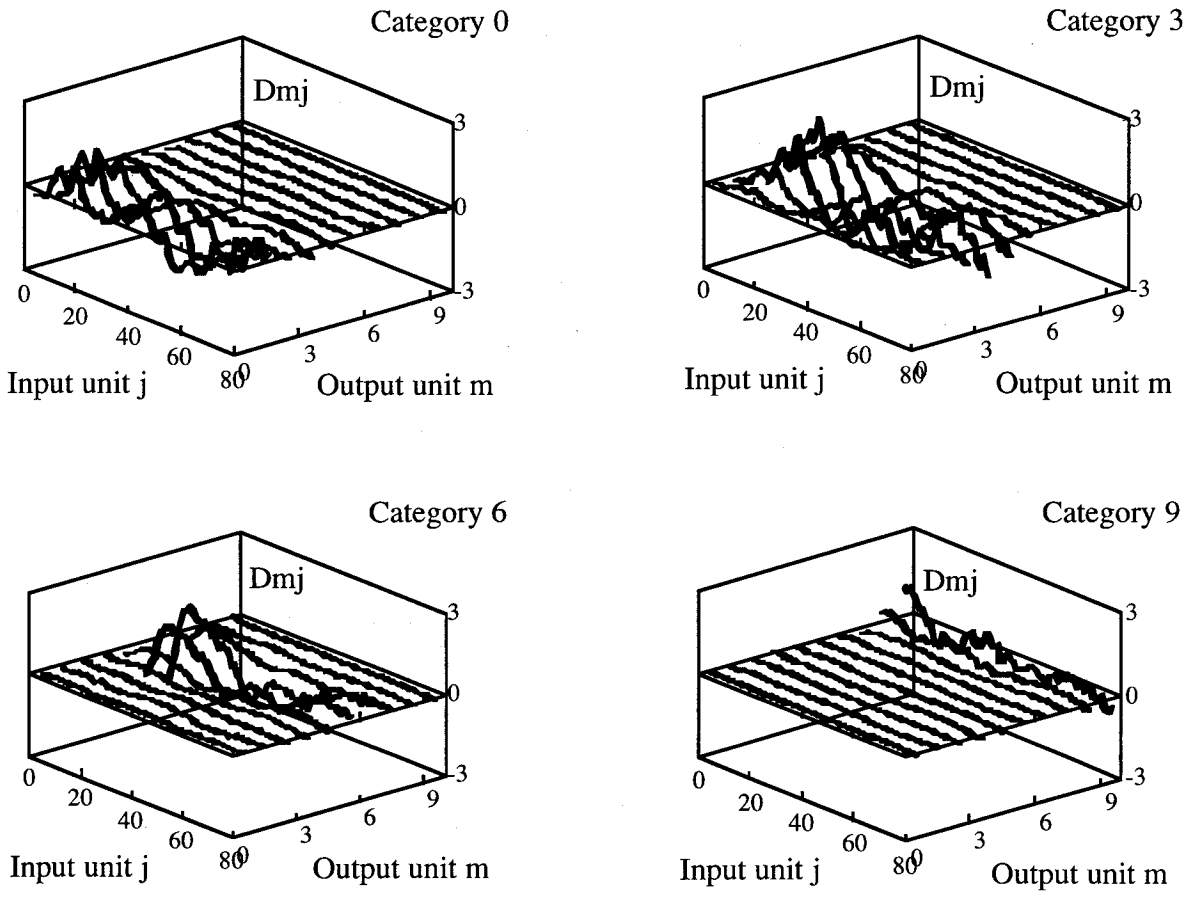


図 4.3　各カテゴリの代表データを与えたときの感度特性

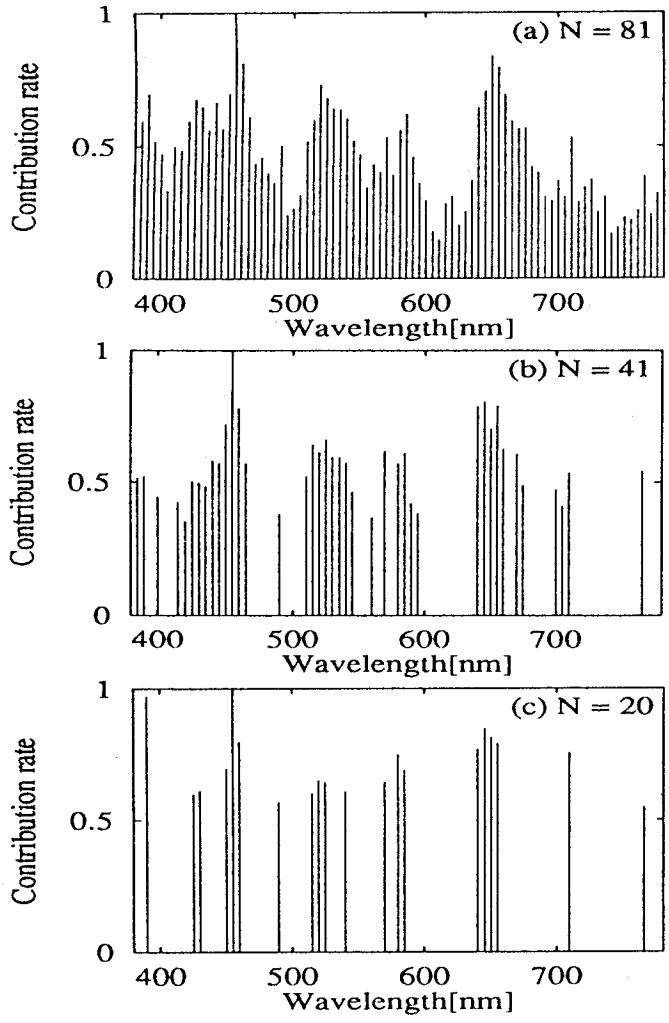


図 4.4　削除過程における各入力要素の寄与度

4.4.4 寄与スペクトルの特定

以上に述べた学習と寄与度計算を繰り返しながら，入力要素の削除を行い，寄与スペクトルの特定を行った．(4.7)式におけるしきい値 $T = 0.4$ とした．ただしスペクトルの連続した要素について同時に削除する数を制限し，主要な要素を削除してしまわないようにした．計 16 回の削除処理によって残り 10 要素になった時点で削除を終了した．

4.4.5 結果の評価と検討

図 4.5 に各削除段階の入力要素数とテストパターンの識別一致率の変化を示す．図より，第 1 回目（削除前）時点でのテストパターンの DRは54%（EDR = 95%）であり，入力要素数が20個付近に絞り込まれるまでは識別一致率が低下しないことがわかる．また図 4.4(b)(c) にそれぞれ入力要素数が 41, 20 の段階における寄与度を示す．図では削除過程での寄与度の変化が比較できるように，横軸に分光スペクトルの波長成分をとっている．寄与度が 0 で示されているものは，削除されたことを示す．

削除が適正に行われたかどうかを確認するための実験を行った．ちょうど半数の入力要素を削除した段階で，残った入力要素とすでに削除された入力要素のそれぞれで別々にNNを構成し，識別一致率を調べた．結果を表 4.1 に示す．(a) が残りの入力要素すなわち図 4.4(b)において残っている入力要素であり，(b) が削除された入力要素，すなわち，それ以外の波長成分に図 4.4(b)の寄与度のグラフで最小値を示している380[nm] の波長要素を加えたものを用いた．この表で，テストパターンだけでなく学習パターンに対する識別一致率，平均 2 乗誤差にも明らかな違いが見られ，識別に寄与する波長が選ばれていることが確認された．

以上の結果から，本アルゴリズムによって識別に寄与する要素を特定できることが確認できた．ここで注目すべきは，図 4.4 において示した識別一致率が削除の過程でわずかだが上昇していることである．これは非寄与要素や冗長要素が削除された結果，ネットワークの最適化が図られ汎化能力が高まったためと考えられる．これまでの研究で，中間層の最適化については多くの研究があり[37] [38]，中間層ユニット数が汎化能力に影響することは確認されてきたが，入力層ユニット数と汎化能力に関する研究はあまりなかった．この結果では本方法が寄与要素を特定することに加え，汎化能力を向上させるのにも有効であることが確かめられた．

従って，識別に寄与する波長を特定するという初期の目的については，識別一致率の高い時点である 20 個のネットワークの構成を採用することにする．これらは図から 10 個の波長域ととらえることができる．

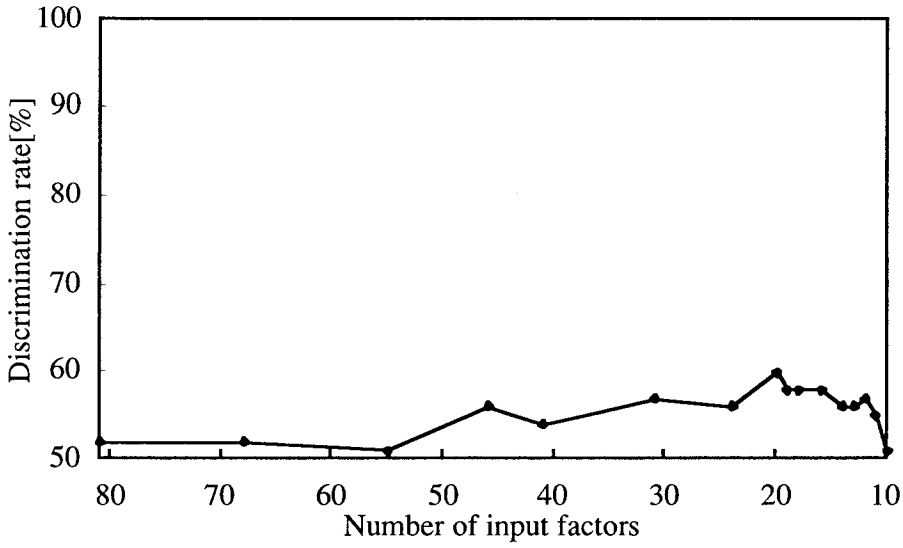


図 4.5　削除過程における入力要素数と識別一致率

表 4.1　識別結果の比較

	学習パターンに対する結果		テストパターンに対する結果	
	平均 2 乗誤差	識別一致率[%] DR (EDR)	平均 2 乗誤差	識別一致率[%] DR (EDR)
(a)	0.0105	65.3 (97.9)	0.0177	54.0 (94.0)
(b)	0.0178	53.8 (90.2)	0.0278	41.0 (86.0)

4.5　色彩識別装置の設計と要因特定法による最適化

前章の結果に基づき色彩識別装置の設計と最適化を行い，専門家との識別一致率を調べることによって，感性計測の手順および要因特定アルゴリズムの適用効果を検証する．

4.5.1　色彩評価装置の試作

複数の波長光を計る装置として，モノクロCCDカメラと干渉フィルタによる構成を採用した．表 4.2 に干渉フィルタ $F_0, \cdots, F_9$ の透過特性を示す．フィルタのピーク波長とバンド幅は，干渉フィルタの透過特性はガウス分布で近似されるという仮定に基づいて，求めた寄与度のグラフにガウス曲線をあてはめて決定した．

図 4.6 に試作した装置の外観を示す．白色光源を用い，光源－対象（真珠）－CCDカメラのなす角が 45 度になるように配置する．物体から反射した光は，干渉フィルタを介してカメラに取り込まれ，EWSに内蔵された画像処理ボードにより 256 階調 512 x 480 画素の濃淡画像に変換される．干渉フィルタを替えて撮像した画像の組が，一つの対象物に対するデータの単位となるので，これをまとめてマルチバンドイメージ（以後，MBIと記し，n番目の画像を mbi_n とする）と呼ぶ．なお，画像入力は外乱を避けるため暗室環境で行う．また各干渉フィルタにはNDフィルタを 1 ～ 3 枚組み合わせて，個々の干渉フィルタの透過率の差，あるいはカメラの波長感度の差等の大まかな補正を行っている．

表 4.2　干渉フィルタの透過特性

Filter No.	Center wavelength[nm]	width[nm]
F_0	390	19
F_1	428	13
F_2	455	12
F_3	488	20
F_4	520	21
F_5	540	23
F_6	580	25
F_7	648	15
F_8	710	12
F_9	768	12

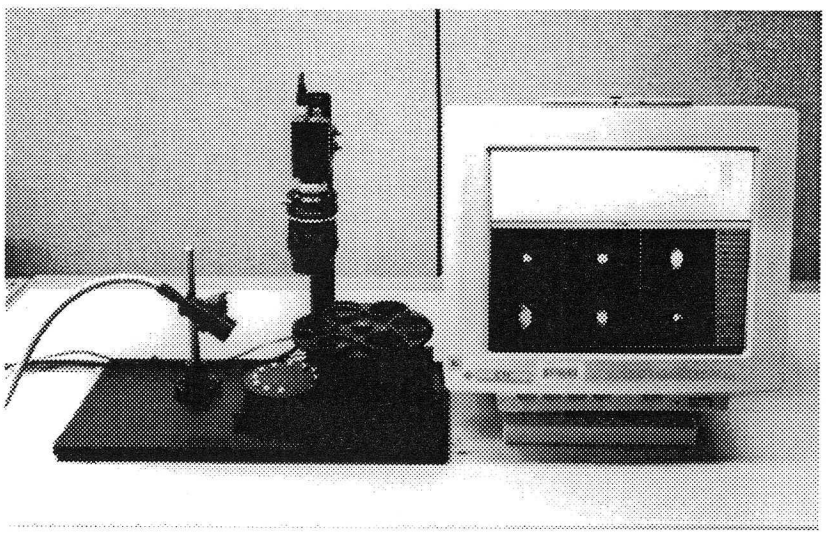


図 4.6 試作装置の外観

4.5.2　識別における入力要素の最適化

識別に用いる入力要素（画像上の特徴量）については，局所的な平均輝度，輝度の変化位置，濃度ヒストグラムなどが考えられるが，今回は代表的な局所平均輝度を用いる．

この場合，平均輝度を得る領域の選択が，識別機能に大きく影響する．5章で述べる専門家に対するインタビューで，真珠の検査は，真珠の「中」「表面」「境目」などの用語で表される部位に着目して行われることが明らかになっている．これは，球をある方向から眺めた時に観察される，同心円状の各領域に着目していると解釈できる．このことは，真珠が多層膜で構成されていることからも妥当である．そこで，真珠の直径方向の各領域を対象に要因特定アルゴリズムを適用し，要素の最適化と同時に識別一致率の向上を図る．

図4.7に真珠の画像（原画：カラー）とMBIの例を示す．真珠の画像の中心を通り照明方向と平行な直線上に，等間隔に20点をとり，各点を中心とした正方領域の平均輝度を考える(a)．1つの真珠サンプルに対し各画像mbi_n (b)から20点ずつ平均輝度を求めると，計200点のデータが得られる．これを入力要素として要因特定を実施した．

4.5.3　ネットワークの構成と要因特定

3層のNNで，学習パターンには輝度データを並べた200次元のベクトルを用い，教師パターンには前章と同様，専門家による識別結果を10次元のベクトル表示したものを用いた．中間層については予備実験により40個を採用した．(4.7)式におけるしきい値$T = 0.4$（ただし隣接した領域を同時に削除する要素数には制限を設けた），計16回の削除処理によって，残り10要素になった時点で削除を終了した．

4.5.4　実験結果と考察

図4.8に，入力要素数が200個の初期段階と21個の段階における寄与度を示す．初期段階の時点ですでに，各画像のハイライト部分に相当する入力要素は低い寄与度を示しており，この部分には識別に必要な色彩情報が存在しないことが確認できる．

また図4.9に，各削除段階の入力要素数とテストパターンの識別一致率の変化を示す．この場合も入力要素数を絞り込むにつれて識別一致率がわずかに上昇し，21個の入力要素が選ばれた段階で最高値の80%を示し，その後低下した．以上の結果を(1)識別一致率，および(2)要因特定の妥当性，の2つの点から考察する．

まず識別一致率の最高値は80%（EDR = 98%）であった．識別結果を詳細に調べると，±1を越える誤認識を起こした2つのテストパターンは，削除処理の過程で構成されたネットワークで常に-2の誤識別を起こしたカテゴリ4及びカテゴリ5の特定のパター

ンであった．そこでこれらの真珠を観察したところ，どちらもてりが他の真珠とやや異なる傾向にあることがわかった．このことは専門家の色彩の判断に色彩情報以外の要因が関与している可能性も考えられ，今後，てり，色みなどの要因分析を進め，総合的な品質評価を行っていくことにより，識別率の改善が図れると思われる．なお複数の専門家による本作業の識別結果の再現性は 80%（EDR = 100%）であり，人間との識別一致率という点ではほぼ満足できる結果に達したといえる．

次に要因特定の妥当性については，以下の比較実験を行った．選択された 21 個の入力要素を，画像単位で別の要素と入れ替えて比較用のネットワークを構成し，識別一致率を調べた．すなわち各画像 mbi_n が k_n 個の入力要素を含むとき，すでに削除対象となった179 個の要素の中から削除時の寄与度が高かった順に k_n 個分を選んで入れ替える．これを $mbi_0, \cdots, mbi_8$ の 9 枚について実施した．mbi_9 は，属する入力要素が残っていないため実施対象とはならなかった．結果は表4.3 のようにすべてが 80% 未満を示しており，前章の波長特定において F_9 の透過波長以外については，識別に必要な情報を含んでいたことを確認した．

以上の結果，真珠の色彩識別装置の設計において，波長特定および MBI の領域特定で提案手法を適用し，識別において有効な計測物理量が選択でき，識別一致率の向上に有効なことを確認できた．F_9 についての結果が一致しなかったことについては，寄与度の評価の精度向上などが今後必要と考えられる．

本章では，高分解能が要求される色彩識別装置の設計において，限度見本を利用して解析的に行う方法を示した．これはセンシング段階で効果的な計測情報を得ることが，識別の信頼性を向上させるという考えに基づいている．確認のため，分光スペクトルの解析結果を試作装置に反映し，次に局所平均輝度という簡単な画像特徴量により性能評価を実施し，専門家との識別一致率で満足できる結果に達した．この結果，実システムにおいても，フィルタとCCDカメラ及び簡単な画像処理により，識別一致率，装置コスト，処理速度を満足する検査装置を構築できる見通しを得た．それとともに，分光スペクトルに立ち返った解析の手法が，他の色彩を基準とする品質評価対象にも拡張可能であることを示した．

なお，識別に寄与すると判断された 9 波長帯の物理現象との関連については，現在のところ F_1, F_2 がアコヤガイ真珠の固有吸収波長である 430nm および 460nm に一致しており，また F_4, F_5, F_6 は干渉色の反射極大点 510nm - 580nm に関係しているなど，部分的に説明できることがわかっている．このように，物理現象との因果関係が明らかでない識別問題において，限度見本から有効な要因を選択し，識別一致率の向上を図るところがこの手法の特徴であり，今後感覚量や感性量を対象とした自動化技術にとって重要な手法になると考える．

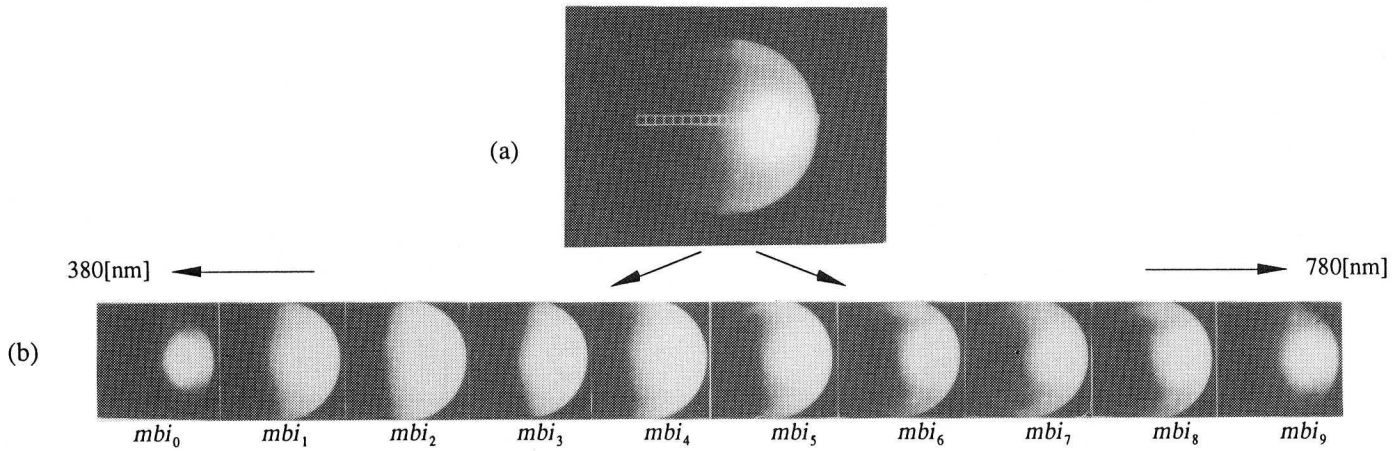


図 4.7 (a) 真珠の画像（原画：カラー）と平均輝度を得る領域　(b) MBI の例

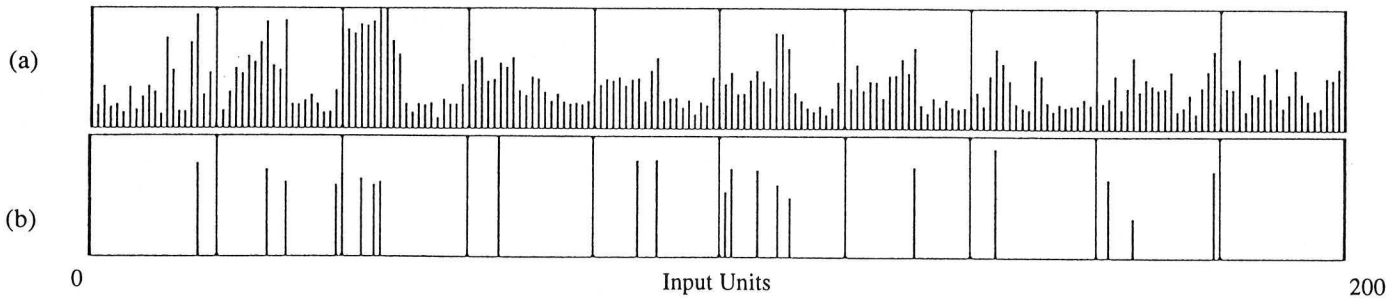


図 4.8　要因特定結果　(a)入力要素数 200　(b) 入力要素数 21

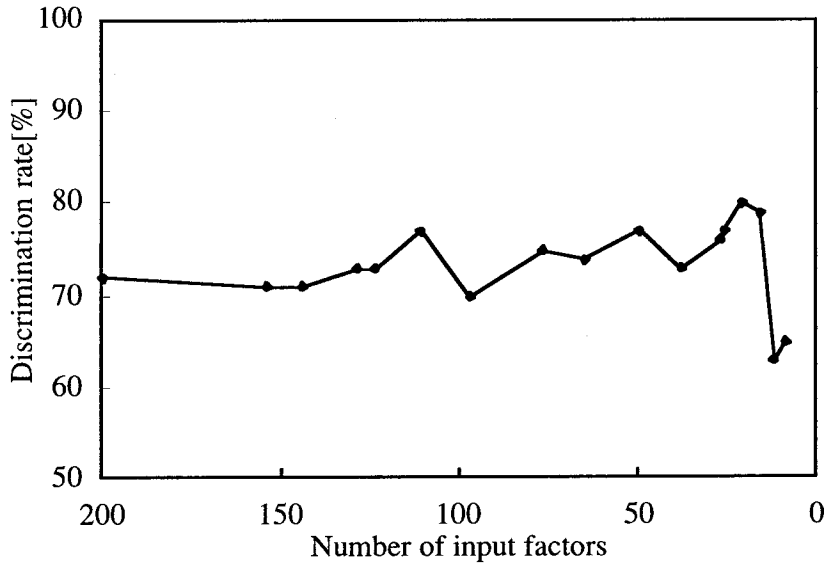


図4.9　削除過程における入力要素数と識別一致率

表 4.3　入力要素を MBI 単位で入れ替えたときの識別結果

入れ替え対象とした*MBIn*	要素数	識別一致率[%]
mbi_0	1	77.0 (98.0)
mbi_1	3	68.0 (97.0)
mbi_2	4	65.0 (96.0)
mbi_3	1	74.0 (97.0)
mbi_4	2	68.0 (97.0)
mbi_5	5	71.0 (97.0)
mbi_6	1	75.0 (98.0)
mbi_7	1	77.0 (98.0)
mbi_8	3	74.0 (97.0)

4.6 まとめ

専門家による実際の色彩識別問題において，具体的なシステム構築の検討評価を行った．とくに，計測物理量の選択が識別一致率の向上に有効であるとの仮定に基づき，NNの入力層－出力層間の感度特性を用いた要因特定法を提案し，これまで試行錯誤的に行われていた装置設計における計測物理量の選択に応用し，実際に装置試作を行った結果，提案手法が識別一致率の向上に有効であることを確認した．

提案した要因特定法は，識別に寄与する入力要素の特定が可能であり，しかも非寄与要素や冗長要素を削除し，ネットワークの最適化と識別一致率の向上を実現できること確認した．これは従来の線形モデルをベースとした方法と異なり，感覚や感性といった非線形性を持つ対象の解析手法として期待できると考えられる．

また感性計測のシステム構築手順を用いて色彩識別装置の設計を行い，最終的に専門家と同等の識別性能を実現した．こうした枠組みが専門家に替わる計測システムの実現に有効であることを検証したといえる．

5章　品質評価のための ビジュアルシミュレーションによる真珠の表現

5.1　はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)やバーチャルリアリティ(VR)によるビジュアルシミュレーション技術が，最近，生産工程における検査・計測システムの構築にも利用されるようになった[39][40]．これは，検査対象のシミュレーションによって最適な検査条件や検査基準を求めるもので，一種のAnalysis by Synthesis 手法といえる．検査システムの高度化，高精度化のニーズに対応していく上で，重要な技術になると考えられる．

3章，4章では専門家の感性を定量化する，アナリシス的なアプローチを行ってきた．この章では，シンセシス的なアプローチとして，仮想の真珠サンプルを生成するビジュアルシミュレータの構築を目的に，その中核技術となる，CGによる真珠表現について提案する．

真珠は淡い輝きを持つ生物性宝石（organic gemstone）[17]であり，自然物の一種である．その独特の色と輝きは，結晶層による屈折，干渉，回折，多重反射などの光の振る舞いによる．光の屈折についてはガラス[41]，ダイヤモンドなどの無生物性宝石[42]，さらには異方性物質[43]などのCG画像の生成例がある．また光の干渉についても，しゃぼん玉[44]，薄膜干渉[45]，あるいはパールマイカ塗料の光学現象をシミュレートした研究[46]などがある．しかし，真珠をリアルに表現するには，真珠層の多層薄膜干渉を表現する必要があるが，これまでに多層薄膜干渉に注目した研究はほとんど行われていなかった．

一方，生物など自然物体の表現については，雲[47]，樹木[48]，果実[49]をはじめとして多数の研究がなされている．これらの表現法に共通するのは，対象に強く依存した特徴や機能，例えば動きの要素，成長の要素，ゆらぎ・質感の要素などをうまく取り入れた物理モデルを用いていることである．また表示の目的に応じて，フォトリアリズムを追求するだけでなく，計算速度や操作性を考慮したアルゴリズムを採用している．

ここでの最終目標は，種々の仮想サンプルを提示して検査員の判定結果を収集解析し，検査基準を明確化していくことである．真珠の品質評価は熟練した勘と経験に依存したあいまい，微妙なものである．従って，仮想サンプルの写実精度が検査精度に反映するため，フォトリアリスティックな表示が求められる．それと同時に，検査員の直感的判断（心理的な要因）と物理的な要因との対応付けが容易であることが重要となる．

本章では，上記の目的のためのシミュレータの中核技術となる，物理モデルに基づい

た真珠の生成アルゴリズムを提案する．真珠の干渉現象は光源方向に依存しない，極めて特徴的な色相分布を示す．これを説明するため，球体における多層薄膜干渉の物理モデルを提案する．また心理実験によって，照り，色みという真珠の最も本質的な評価項目が，深み感，輝き感，きめ感の感性量により構成されていることを明らかにする．そしてCGの生成アルゴリズムを，３つの感性量に対応した干渉成分，映り込み成分，テクスチャ成分の３つの物理的特徴から構成する．CGシミュレーションによって，真珠の光学現象が表現できることを示し，物理モデルに基づいた手法の妥当性を検証する．

なお生成画像の評価については，６章で述べる．

5.2　真珠の光学的特徴と品質評価

真珠の外観を図5.1に，その物性的構造を図5.2に示す．真珠は直径3～6mm程度の核と，核の周りを囲む厚さ30～500μmの真珠層からなる．真珠層は，300～800nmのアラレ石の結晶層と20nm以下のコンキオリン膜（蛋白質）とが，交互に同心球状に60～1000層積み重なって形成される．透明度の高い結晶層が均一に積層すると，薄膜干渉による干渉色や，多重反射などによる独特の色と輝きが現れる．また真珠の表面には図5.3に示すような，結晶層が階段状に積み重なってできる不規則な縞模様が観察される．真珠光沢と呼ばれる独特の光沢感は，こうした不規則な表面状態や，真珠内部の結晶の配向むらなどによって起こる[17].

１章で述べたように，真珠の品質評価は大きく分けてキズ，形状，色彩，照り，色みの５項目によって行われる．この中で照りと色みの２項目は，真珠の最も特徴的な多層構造に関する評価項目であり，とりわけ定性的で，感性的な評価量である．

そこで，この２項目について検査員を被験者として心理実験を行い，主要な心理的要因を明らかにする．そしてその結果に基づいて真珠の表現を行うことにより，リアリティを高めるとともに，最終目的である検査員の評価基準と真珠の物理的特性との対応付けを容易にする．

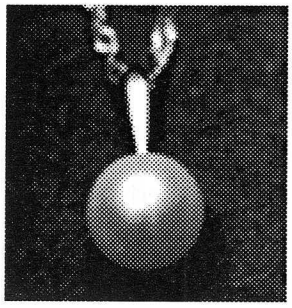


図5.1　真珠の外観

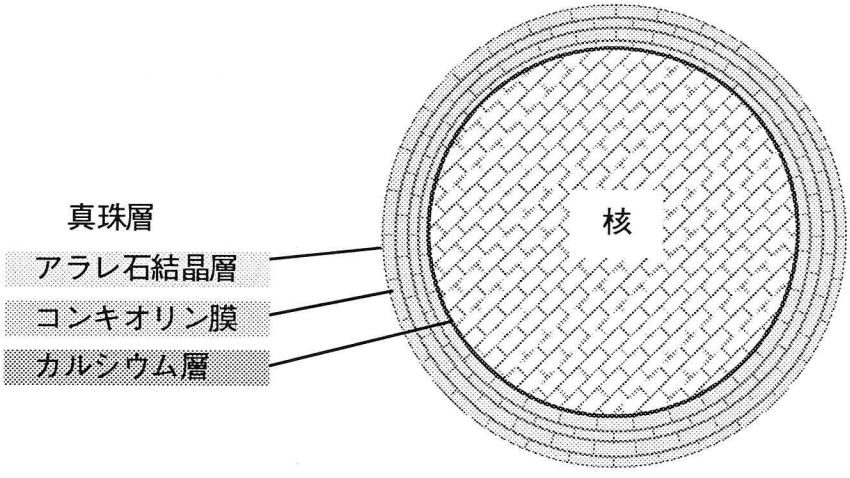


図5.2　真珠の物性的構造

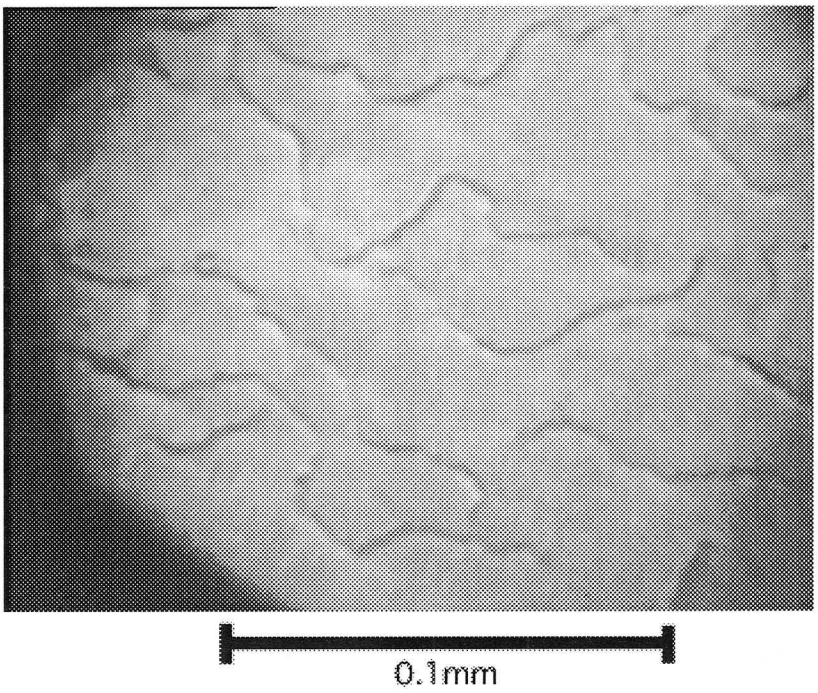


図5.3　真珠の表面

5.3　色み・照りに関する心理的評価ファクタ

本節では，真珠の色み・照りという品質評価の本質的な項目について，基本的な評価ファクタ（因子）を明らかにするために，心理実験を行い因子の抽出を試みた結果について述べる．

5.3.1　心理実験

（1）評価用語の選定

真珠の評価項目を選定するための予備実験として，全ての加工工程の検査員を対象にアンケートを実施し，評価用語の収集を行った．結果から，工程が異なる検査員の間では，同一用語に対して異なるイメージを持たれている場合があること，また，通常の検査作業において使われている用語数自体があまり多くないなどの事実を得た．そこで次に，真珠の評価で用いられている用語に辞書などから選んだ色と光沢に関係のある用語を加え，約５０種類の用語を用意した．そして調査対象を仕上げ前工程の検査員に絞り，用意した用語を示しながら聞き取り調査を行った．その結果これらの用語のうち，用語に対応したイメージが検査員の中にないと思われるもの，もしくは検査員間で共通でない，言い換えればばらつきが大きいと判断されるものを除き，最終的に19の評定用語を選定した（表5.1中，番号を振って示した）．

（2）評定実験

以上の準備作業の後に，仕上げ前工程を担当する２人の熟練検査員を被験者として，色彩をそろえた40サンプルの真珠について評定実験を行った．選定した評定用語それぞれに対し「かなりそう思う」「ややそう思う」「どちらともいえない」「ややそう思わない」「かなりそう思わない」の５段階の評定結果を得た．

5.3.2　実験結果

実験により得られた結果に対し，主因子法による因子分析を行った．表5.2はバリマックス回転後の各因子の因子負荷量である．この結果，３つの有意な因子が求められた．各因子の寄与率は第１因子から順に58.3%，15.8%，11.7%である．

第１因子は「軽い」「かちっとしている」など，一般にしまり状態を示すと考えられる用語のグループと高い相関を示し，真珠層が薄く均一に巻いている状態を代表していると考えられるので「層の均一性（深み感）」因子と命名した．

第２因子は「表面がよく光る」「透明感がある」など，表面反射，内部反射，透明度

等の要因による光の二次元的な強度分布，すなわち表面の輝き状態を代表していると考えられ「輝き（感）」因子と命名した．

第３因子は「ざらざらした」「中がメラメラ」など光の二次元的な指向性分布（滑らかさ）を代表していると考えられるので「面の均一性（きめ感）」因子と命名した．

5.3.3　考察

以上の実験結果を分析検討した結果，あいまいであった真珠評価因子のグルーピングと寄与率の定量化が実現した．寄与率に関しては，第１因子の寄与率が他と比較して非常に高く，まだ検査員の感覚とのずれが一部に存在することが指摘された．しかしこれは，最初の実験ということで評定用語の選定に不十分な部分があったことと，被験者が２名と少なかったことに起因しているものと考えられ，今後の実験規模の拡大に伴って因子の細分化が進むものと思われる．また，第３因子すなわち「面の均一性」因子という，現行の評価項目には取り上げられていないが，品質評価に寄与する因子が存在することが明らかになった．

表5.1　評価用語の選択

1	表面がよく光る	力強さがある
2	表面に亀甲がある	暗さを持つ
3	中がぼけた感じ	境目の色がはっきりする
4	中がメラメラ	色目にむらがある
5	表面がでこぼこ	片巻である
6	すっとしている	内部からの光がうすい
7	色みが強い	ほのか
8	自分の顔が良く写る	鈍い
9	ざらざらした	淡い
10	表面に被膜がある	半透明
11	照りがある	鮮やか
12	巻きが厚い	はっきりし
13	輪郭がある	くっきり
14	軽い	清か
15	明るい	黒光り
16	ピンク	つやつや
17	透明感がある	てかてか
18	かちっとしている	ぎらり
19	総合評価	きらきら
	ぬけがいい	ぴかぴか
	白く濁る	好き
	すかっとしている	暖かい
	きめが細かい	上品な
	なっぱ色	新しい
	赤みがある	派手な
	コントラストがある	鋭い

表5.2　因子負荷量

因子	第1	第2	第3
寄与率	58.3%	15.8%	11.7%
軽い	-0.93		
巻きが厚い	-0.85		
ピンク	-0.83		
かちっとしている	-0.82		
総合評価	-0.69		
色みが強い	-0.67	0.66	
すっとしている	-0.67	0.61	
自分の顔が良く写る	-0.64	0.66	
表面がよく光る		0.86	
輪郭がある		0.79	
てりがある		0.78	
透明感がある		0.73	
中がぼけた感じ		-0.72	
ざらざらした			-0.80
表面がでこぼこ			0.78
中がメラメラ			0.75
表面に被膜がある			0.64

絶対値が0.6未満は省く

5.4 CGによる真珠の表現

CGによって写実的な真珠を表現するための物理モデルと，画像生成アルゴリズムについて説明する．

まず，干渉光の色相分布が光源方向に依存しないという，真珠特有の光学現象を表現するため，多重反射を考慮した多層薄膜干渉の物理モデルを提案する．

次に，前節の心理実験により明らかになった，３つの主要な心理的要因である

(1) 深み感（層の均一性）

(2) 輝き感（表面の反射性）

(3) きめ感（面の均一性）

のそれぞれに対応する物理的特徴を表現するCG生成アルゴリズムを提案する．アルゴリズムの概略は以下の通りである．

(1) 干渉光と拡散光の強度比計算

(2) 分散レイトレーシングによる映り込みの計算

(3) FFT／逆FFTによるテクスチャの抽出とマッピング

まず，基本となる多層薄膜干渉の物理モデルと生成アルゴリズムについて述べたあとに，上の３つのアルゴリズムについて順に説明する．

5.4.1 多層薄膜干渉の物理モデル

真珠層は，膜厚が可視光の波長オーダの結晶層と，20nm以下の極めて薄い結晶層間気質（蛋白質層）が交互に積み重なっている．これは屈折率の異なる２種類の光学的薄膜からなる多層膜構造と見なされる[50].

真珠の干渉現象でとりわけ特徴的なのは，干渉色の色相分布である．真珠の干渉色は，光源と反対側の光が当たらない面にも現れ，かつ，常に球の中心から同心円状に変化する．すなわち干渉色は，視線方向にのみ依存し，光源方向には依存しない．

これを通常の薄膜干渉と対比して考える．狭帯域フィルタや多層薄膜コーティングなどの多層薄膜の透過光スペクトル（あるいは反射光スペクトル）は，入射角を大きくすると短波長側にシフトする．実際に光源に向けた狭帯域フィルタを徐々に傾けていくと，光が緑→青→紫→赤→‥‥と変化していくのが容易に観察できる．ところで，真珠の母貝であるアコヤ貝の貝殻内側にも，真珠と同様の真珠層が平面状に形成されるが，この場合は，視点または光源を移動すれば色相が変化する．つまり色相は入射角すなわち光源の方向によって変化する．このことから，真珠の干渉色の色相分布は，形状（球体）により引き起こされた光学特徴と考えることができる．

この現象をシミュレートするために，図 5.4 に示すような，真珠層における光の多重

反射を考慮した，多層薄膜干渉の物理モデルを提案する．図において，光源から真珠表層部に達した光の一部は真珠内部にはいり込み，層内で反射と屈折を繰り返して核の裏側まで伝搬し，真珠層全体に分布する．そして各点で図 5.5 のような局所的な干渉を起こす．すなわち自然光の極めて短いコヒーレンス距離内において，各層の境界面で反射した波同士が干渉する．この局所的な干渉が真珠層のいたるところで起こっており，反射波の角度によって異なる位相差すなわち異なるスペクトル分布を持つ干渉光が，真珠外部のあらゆる方向へと伝わっている．今，全干渉光のうち，視点方向へ伝わる波だけに注目すると，ある同心円上の各点からの光は同じ反射角で返ってくる干渉光なので，位相差すなわちスペクトル分布が等しくなる．このように考えると，干渉光の色相が光源方向に依存せず，同心円状に変化する現象が説明できる．

5.4.2　多層薄膜干渉の表示アルゴリズム

前節で述べた干渉現象のモデルに従って計算を行う．

干渉色計算は，視点に伝わる光に対してのみ行う．図 5.5 において，結晶層膜と薄い蛋白質層とが交互に L 層ずつ平行に重なった，厚さ d_l の多層構造を考える．n_0 , n_1 , n_2 はそれぞれ空気層，結晶層，蛋白質層の屈折率である．

点 P_0 から視点に到達する光は，まず層内のある光が第 l 層～第 $l+2m$ 層で反射しコヒーレントな光 i_l ～ i_{l+2m} となって互いに干渉し，次に屈折率 n_1 の真珠層から屈折率 n_0 の空気中に角度 θ_1 で入射し，角度 θ_0 で屈折した光であると考える．すると視点と点 P_0 の位置関係から，屈折角 θ_0 が一意に決定する．

よって計算上の課題は，反射率・透過率計算，膜厚生成計算，および干渉光スペクトル強度計算の 3 点である．

(1) 反射率・透過率計算

反射率と透過率は本来，物体の屈折率と光の入射角とで決定される量であり，フレネルの公式によって導かれる[41]．2 つの物体の屈折率の差が大きいほど，反射率は入射角によって大きく変化する．本問題の場合，考慮すべき反射率は結晶膜層・蛋白質層間と結晶膜層・空気層間の 2 つの場合がある．後者については屈折率の差が大きく，光の見え方に大きく関与していると考えられる．前者については，蛋白質層の屈折率が明らかでないが，真珠層が高い透明度を示すことから考えると，屈折率の差は小さいと思われる．

例えば，結晶膜層から空気層へ光が入射する（直感的には出射であるが，光の進行方向に従って計算を行う都合上，入射と表現する）ときのエネルギー反射率 R_1（以後単に反射率と記す），およびエネルギー透過率 T_1（以後単に透過率と記す）は，フレネ

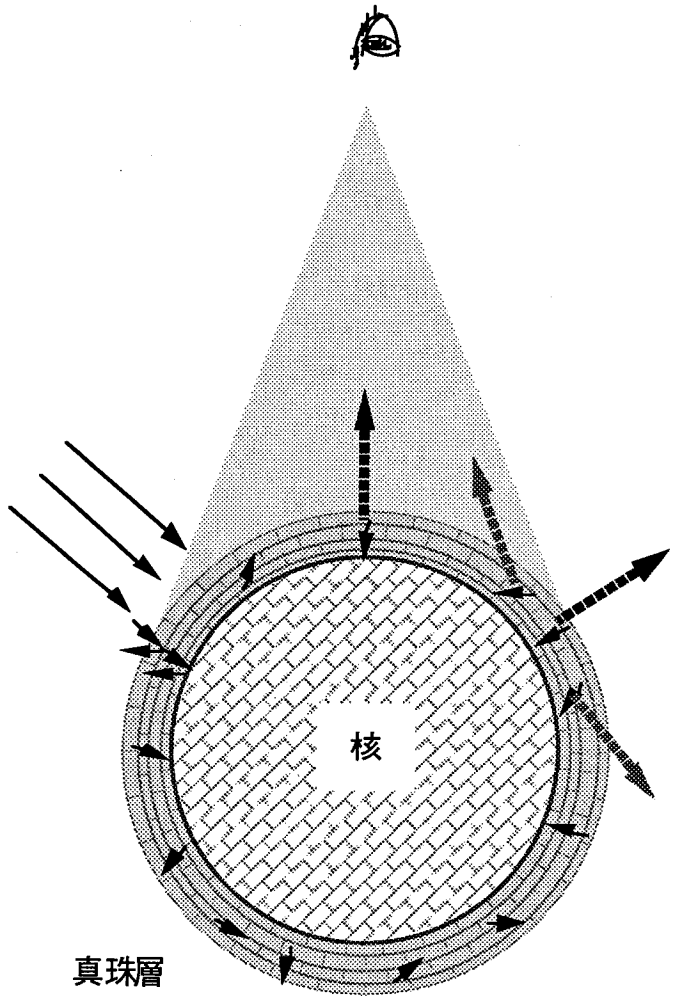


図5.4　真珠層における多層薄膜干渉の物理モデル

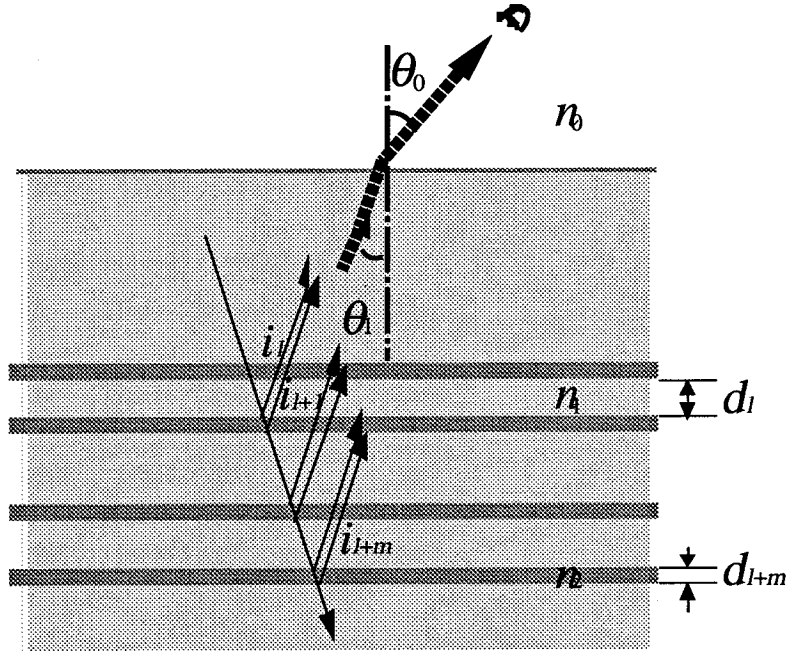


図5.5　多層薄膜における干渉のようす

ルの公式から次式で求められる．

$$R_1 = \frac{1}{2}\left(\left|r_1^p\right|^2 + \left|r_1^s\right|^2\right) \qquad \cdots\cdots (5.1)$$

$$T_1 = 1 - R_1$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{n_1\cos\theta_0}{n_0\cos\theta_1}\left|t_1^p\right|^2 + \frac{n_0\cos\theta_0}{n_1\cos\theta_1}\left|t_1^s\right|^2\right) \qquad \cdots\cdots (5.2)$$

ただし $r_1^p = \dfrac{n_1\cos\theta_0 - n_0\cos\theta_1}{n_1\cos\theta_0 + n_0\cos\theta_1}$ $\quad r_1^s = \dfrac{n_1\cos\theta_1 - n_0\cos\theta_0}{n_1\cos\theta_1 + n_0\cos\theta_0}$

$$t_1^p = \frac{2n_0\cos\theta_1}{n_1\cos\theta_0 + n_0\cos\theta_1} \qquad t_1^s = \frac{2n_1\cos\theta_1}{n_1\cos\theta_1 + n_0\cos\theta_0}$$

ここで r_1^p，r_1^s，t_1^p，t_1^s はそれぞれ p 偏光，s 偏光に対する振幅反射率と振幅透過率である．自然光では両偏光が半分ずつ含まれているので，両者の平均をとったものとして R_1 が与えられる．図 5.6 に，視角に対する入射角 θ_1 と反射率 R_1 の変化を示す．この場合，視角とは真珠層に対する視線方向，すなわち真珠層の法線ベクトルと視線ベクトルとの成す角を指し，屈折角 θ_0 に等しい．視角とともに反射率も大きくなっており，真珠の周辺部へいくほど干渉色の透過率，すなわち強度が小さくなる様子を表している．ここで屈折率 n_1 はアラレ石結晶の C 軸の屈折率 1.53を用い，屈折率 n_0 は1.0として計算した．

結晶膜層・蛋白質層間の反射率 R_2・透過率 T_2 についても，同様に計算を行う．ただし，蛋白質の屈折率 n_2 が明らかでない．ここで，多重反射は結晶層で起こっていると考えるのが妥当であるから，n_2 は n_1 より小さいとする．そして真珠層が薄い（60～100 層）場合には中の核が見えてしまうことから，かなり透過率が高い，言い換えれば屈折率 n_1 とあまり差がないと考えて，$n_2 = 1.43$とした．

(2) 膜厚生成計算

結晶層膜および蛋白質膜の厚さの分布は均一ではない．真珠の養成期間は１～２年で，真珠層の成長は水温に支配されるため，季節によって生成する膜厚や１日あたりの膜数に差が生じる．１年で見ると夏は膜厚，膜数ともに大きいが透明度は低く，秋から冬にかけて500nm以下の薄くそろった透明度の高い結晶層膜がつくられる．そのため真珠の浜上げは１２月頃に行われる[51]．従ってこうした成長過程を考慮した膜厚の生成方法

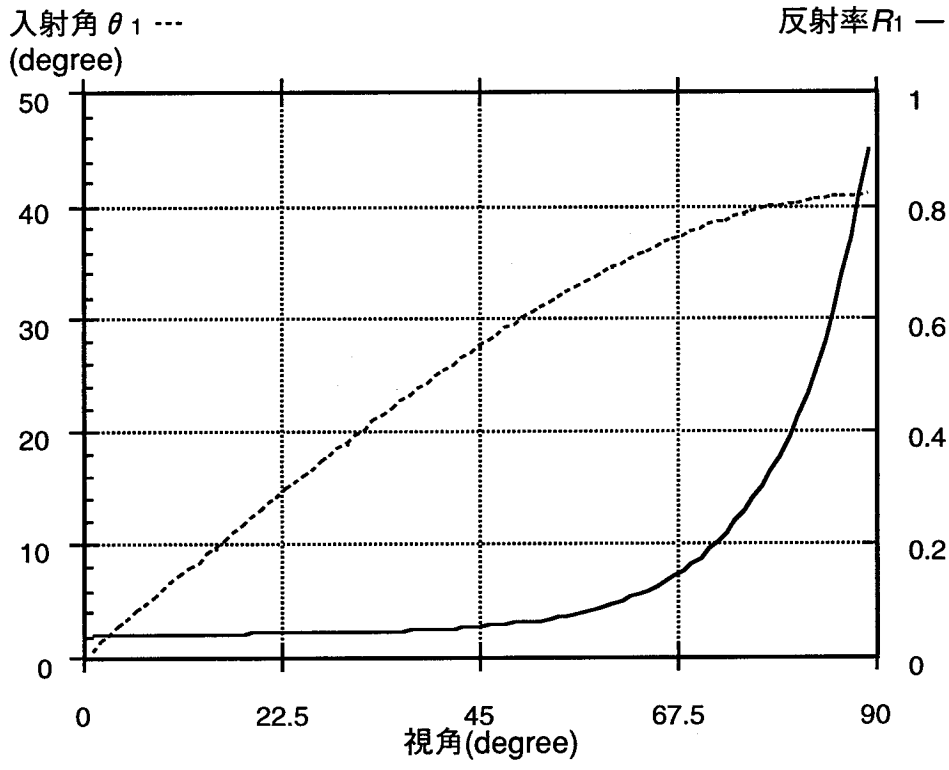


図5.6　視角に対する入射角と反射率の変化

を導入することで自然な真珠の表現が可能になると考えられる．

ここでは真珠層膜厚列 d_l の生成方法として，結晶層膜の膜厚および１日あたりの膜数の１年における変化をそれぞれ正規分布の確率密度関数でそれぞれ表した．そして一様乱数を用いて膜厚並びに膜数に変動を与えながら，結晶層と20nm前後の蛋白質層が交互に形成されるようにした．

(3) 干渉光スペクトル強度計算

(1) (2)で求めた反射率・透過率・膜厚列を用いて干渉光のスペクトル強度を計算する．

視点に到達する干渉光は表層ほど強いので，表層から順次，深層に向かって計算を行う．まず視角すなわち屈折角 θ_0 より，結晶層における入射角 θ_1 が決定する．そこで入射角 l 層と第 $l+m$ 層との反射光の位相ずれ

$$\xi = 4\pi \sum_{k=l}^{m} d_k \cdot (n_2 / n_1)\cos\theta_1 / \lambda \qquad \cdots\cdots (5.3)$$

から，干渉光の振幅計算を可視波長帯 (380 ～ 780nm) について１nm毎に行う．この干渉計算を，光路差が自然光のコヒーレンス距離に相当する膜厚に達するまで続け，最後に(1)で述べた真珠層から空気層に対する透過率を乗じてスペクトル強度に変換する．これを表層（第１層）からはじめて，振幅が閾値を満たさなくなる時点まで続け，得られたスペクトル強度を加算していく．最後にスペクトル強度を等色関数によってRGB値に変換する．なおコヒーレンス距離は５ μ mとし，終了条件の振幅の閾値は0.05とする．

図 5.7に，ある点における干渉光スペクトル強度の例を示す．膜厚に変動を与えているので，スペクトルのピークが広がっており，自然物の不均一性を表現している．また図 5.8(a) に干渉光成分の画像例を示す．真珠の干渉色でもっとも美しいとされる青系の虹色の干渉色が観察される．

以上，真珠の基本的な表示アルゴリズムについて説明した．次節以降に，心理的要因に基づいた真珠の表現について述べる．

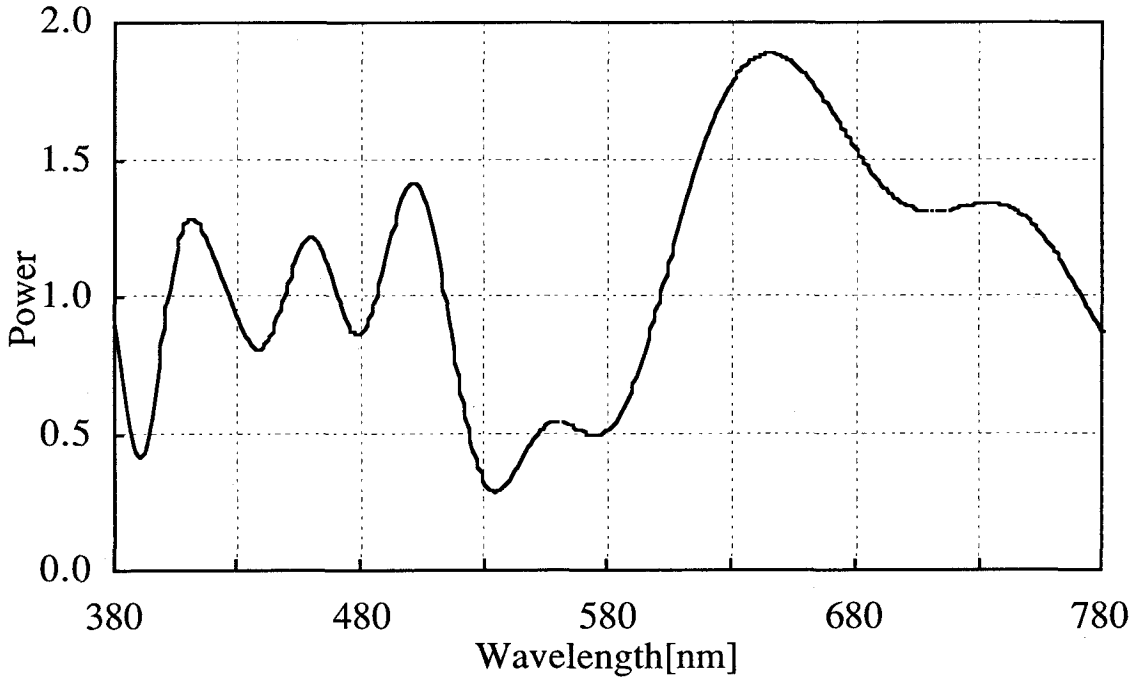


図5.7　干渉光のスペクトル強度の例

5.4.3　干渉光による深み感の表現

深み感は，検査員へのアンケートで得られた「巻きが厚い」「色みが強い」などの表現に対応するもので，主に干渉色の強さと関係すると考えられる．深み感を変化させるためのパラメータとして，膜厚（膜数）以外に拡散反射が考えられる．すなわち，前節では真珠層を理想的な薄膜として計算したが，実際は

$$T_i + R_i + D_i = 1 \qquad \cdots\cdots (5.4)$$

なる拡散反射係数 D_i が存在する．これは通常のレンダリングモデルにおける拡散光成分および環境光成分とみなして良い．従って，拡散反射光および環境光を真珠の物体色を用いて計算し，干渉光と合成する．合成比率を変化させることによって，深み感を表現する．図 5.8(b) に拡散反射光と環境光による画像の例を示す．

5.4.4　映り込みによる輝き感の表現

真珠を観察すると，周囲の背景や照明が，真珠表面に非常によく映り込んでいるのが見える．検査員へのインタビューでも「自分の顔がよく映る」という評定用語がある．また，映り込みは透明物体の質感に重要な役割を果たす[41]ことも知られており，輝き感を表現する有効な方法と期待される．

真珠の表面性状による映り込みのちがいを表現するために，分散レイトレーシングの手法を用いた．通常のレイトレーシングでは視線を正反射方向のみにたどるのに対し，分散レイトレーシングでは正反射方向を中心とした多数のレイを飛ばすことによって，影や，映り込みのぼけを表現することができる．レイの分散の程度を変えることによって，輝き感を変化させる．また真珠表面と物体までの距離による光の減衰効果も同時に与えている．図 5.8(c) に映り込みによる画像の例を示す．

5.4.5　テクスチャによるきめ感の表現

真珠の表面には，ざらざら，めらめらと表現される独特のテクスチャが観察される．これは，5.2節で述べたように，結晶層が階段状に積み重なってできた真珠表面の不規則な縞模様や，真珠内部の結晶の配向むらなどによって起こる．

こうしたテクスチャを簡易的に生成する手法として，実物の真珠の画像から二次元FFT／逆FFTによって生成した高周波成分のテクスチャを真珠表面にマッピングした．ただし直感的理解を助けパラメータ設定を容易にするために，画像のRGB 値を Munsell 表色系（HVC 空間）に変換し，色相 (H)，明度 (V)，彩度 (C)それぞれのテクスチャを扱うことにした．

まずカラーカメラで撮像した真珠のRGB画像から一部（64 * 64）を切り出し，まずHVC画像に変換する．それぞれの画像に対してハニング窓関数をかけた後，二次元FFTによりパワースペクトルを求める．バンドパスフィルタ処理を施し，逆FFTを行うことによって，HVC空間のテクスチャ画像が得られる．バンドパスフィルタには，パワースペクトル平面の原点を中心に，空間周波数$r=\sqrt{u^2+v^2}$の適当な区間$r_s \le r \le r_e$を通過帯域1.0とした同心円状の窓関数を用いてフィルタ処理を行う．図5.9にテクスチャの例として，明度(V)テクスチャ（濃度スケールを拡大したもの）を示す．

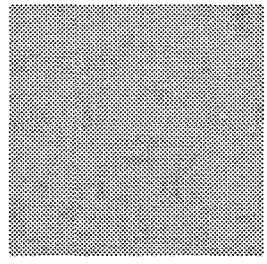
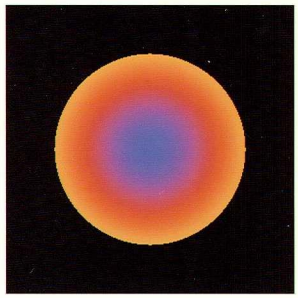


図5.9　明度テクスチャの例

5.4.6 表示例

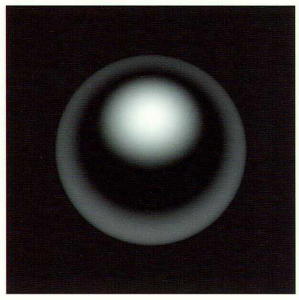
生成された干渉光画像，拡散反射光画像，映り込み画像およびテクスチャを用いてレンダリングを行う．テクスチャをマッピングするために，光強度を一旦HVC画像に変換し，あらかじめ用意したHVCそれぞれのテクスチャを適切な重み値によりマッピングした後，RGB画像に変換して表示する．今回はHおよびCのテクスチャを拡散反射光に乗せ，Vのテクスチャを鏡面反射光に対して，明度に比例し，経験的に決めた重みをつけて乗せている．

本手法による表示例を図5.10，5.11に示す．図5.10(a) はテクスチャを乗せる前の画像，すなわち干渉光成分，拡散光成分，および映り込み成分を合成したものである．光源方向は視線方向と45°の角度を成しており，干渉光は光源方向と独立に色計算がされているが，矛盾を感じないばかりか，まさに真珠の干渉現象が表現できている．(a) と(b) とで干渉光画像と拡散光画像との混合比を変えることにより，深み感の違いを出している．また映り込みにより輝き感や透明感も表れている．図 5.11 は図 5.10 (a)にテクスチャを乗せたものであり，テクスチャの付加により，表面のきめ感とリアルさが表現されている．以上の表示例から，本方法が真珠の光学現象をシミュレートできることが確認された．



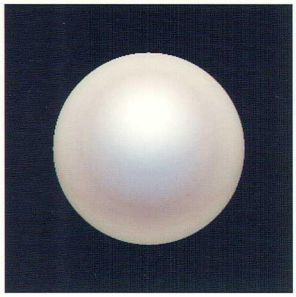
(a) 干渉光成分

(b) 拡散反射光成分

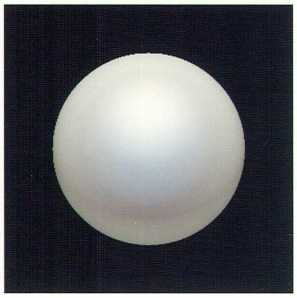


(c) 映り込み成分

図5.8　合成前の画像例



(a) 深み感（強）



(b) 深み感（弱）

図5.10　表示例(1)　深み感の表現

図5.11　表示例(2) きめの表現

図5.12　表示例(3) 実写との合成

5.5 まとめ

真珠のビジュアルシミュレータ構築にあたり，物理モデルに基づく真珠の表現方法について提案した．本方法では，実際の真珠観察によって得られた，光源方向に依らない真珠固有の色相分布を，視点へ伝わる光だけに着目した多層薄膜干渉の物理モデルにより表現した．また心理実験に基づいて，干渉，映り込み，テクスチャの３つの主要な物理的要因を選択し，真珠を効果的に表現した．これにより，最終目的である，検査員の評価基準の明確化への適用が容易になると思われる．今回はパラメータを経験的に決めているが，これまでCGの分野ではほとんど扱われていなかった多重薄膜干渉の表現として，ほぼ満足のいくものであった．

しかしながら，フォトリアリスティックな真珠の表現という点で，改良の余地がある．テクスチャにおいてダイナミックなゆらぎを表現するため，カオスなどのモデルを導入することや，映り込みの表現において表面荒さ関数を取り入れることなどが考えられる．

6章　真珠らしさの主観評価

6.1　はじめに

前章では，リアルな真珠のCG画像の生成について議論した．ここで改めて，リアルな真珠とはどのような真珠であるかを考えてみる．3，4，5章では，「専門家の感性」という側面で分析的・生成的アプローチを進めてきたが，リアルさということであれば非専門家にも共有できる感覚であるかもしれない．むしろ専門家とは別の，あるいは本質的な感性を持っているかもしれない．

この章では，リアルな真珠の画像を生成するにあたって，大衆の感性という側面から分析を行う．「真珠らしさ」という心理尺度を，真珠の写真の各領域から構成する．そしてこれらを，生成画像の各領域の真珠らしさと対応させて，生成画像を評価する．また，真珠らしさを醸し出す物理量の探索を行う．

6.2　真珠らしさの主観評価１ー写真ー

真珠の画像を生成するにあたって，「真珠らしさ」とはどのようなものかを把握するために，一般人（非検査員）を対象にして，サーストンの一対比較法[52]を用い，真珠らしさの心理尺度を構成する心理実験を行った．

6.2.1　実験方法

真珠の拡大写真から，図6.1に示すように各々異なる特徴を持つ７つの部分写真を切り出す．そして任意の２つを組み合わせた評価サンプル（計21通り）を作る．理系学生を中心に延べ104名に対して「どちらが真珠らしいか」を評価してもらった．比較のため，実物の真珠を見せながら評価してもらう場合と，見せずに評価してもらう場合との２通りについて実施した．

6.2.2　実験結果と考察

一対比較法による尺度距離行列及び心理尺度値を，表6.1及び図6.2に示す．写真１から７は，真珠の中心から外側に向けて順に番号を付けたものである．また参考データとして，実物の真珠を見せた場合と見せない場合，および男性と女性で分けて求めた場合の心理尺度値を，それぞれ図6.3(a) (b) (c) (d)に示す．

実験により以下の結果が得られた．

(1) 全体の結果では，鏡面反射部分と，高彩度で色相変化の大きい薄膜干渉色の部分

の双方を含む写真（写真２）を，最も真珠らしいと判断している．続いて干渉色部分のみの写真（写真４），鏡面反射部分のみの写真（写真１）を，真珠らしく感じている．一方で，輪郭を含む写真（写真5, 6, 7）についてはいずれも真珠らしさの評価が低い．

(2) 真珠を見せた場合は見せない場合に比べて，真珠らしい写真群（写真1, 2, 3, 4）とそうでない写真群（5, 6, 7）の間の心理尺度距離が，写真群内の分散に比較して増大している．同様に男女別の結果からも，一般に真珠に親しいといわれる女性の方が，男性に比べて心理尺度距離が広がっている．これらは母集団が等しくないため，単純な心理尺度値の比較はできないが，分散に対する相対的距離ととらえると，真珠らしさがクリアになったと考えられる．

以上の結果から，非専門家にも「真珠らしさ」という共通の心理尺度が存在することがわかった．真珠らしさは鏡面反射部分と干渉色部分の両方の要素によって引き起こされている．これは専門家が用いる「照り」「巻き」という業界用語が示す真珠固有の光沢と干渉色に対応していると思われ，専門家の評価と共通点がみられる．一方，球の輪郭部分つまり形状要素が真珠らしさに与える影響は少ないことが分かった．

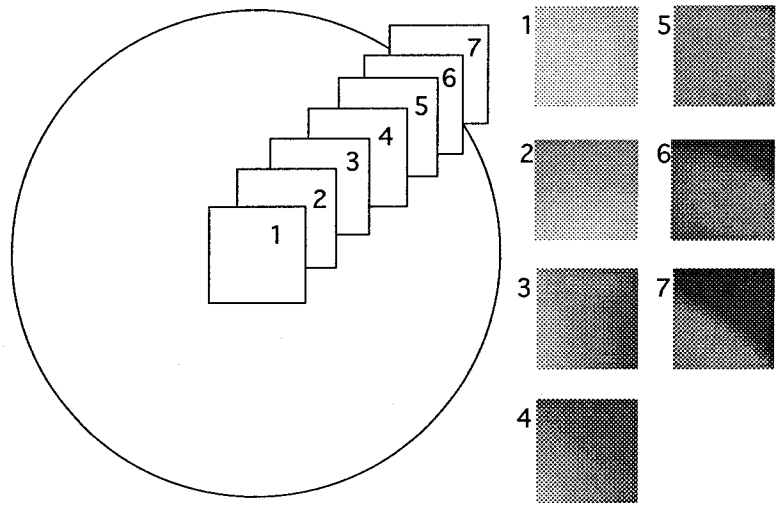


図6.1　部分写真と切り出し位置

表6.1　「真珠らしさ」の尺度距離行列１ー写真ー

	1	2	3	4	5	6	7	合計	平均
1	0.000	-0.739	0.643	-0.050	0.305	0.706	1.080	1.945	0.278
2	0.739	0.000	0.583	0.498	1.227	1.282	1.341	5.670	0.810
3	-0.643	-0.583	0.000	0.385	0.806	1.175	1.126	2.266	0.324
4	0.050	-0.498	-0.385	0.000	1.080	1.405	1.282	2.934	0.419
5	-0.305	-1.227	-0.806	-1.080	0.000	0.706	0.553	-2.159	-0.308
6	-0.706	-1.282	-1.175	-1.405	-0.706	0.000	0.915	-4.359	-0.623
7	-1.080	-1.341	-1.126	-1.282	-0.553	-0.915	0.000	-6.297	-0.900

6.3　真珠らしさの主観評価２ー生成画像ー

次に，５章で述べたCGによる生成画像を，前節と同じ心理評価の方法を用いて「真珠らしさ」の尺度で評価し，写真の場合と比較する．

6.3.1　実験方法

生成画像から図6.1と同様の７つの部分画像を作り，理系学生を中心に50名に対して「どちらが真珠らしいか」を評価してもらった．

6.3.2　実験結果と考察

一対比較法による尺度距離行列及び心理尺度値の結果を，表6.2及び図6.4に示す．

順序について写真の場合の結果と比べると，画像４のみが順序を２つ下げているだけで，残りの順序に変化はない．全体的な傾向としては，生成画像が本物の各部分の特徴をよくとらえているといえる．

画像４が順位を下げているのは，画像３と画像１が，色相の変化を滑らかに表現していたため，相対的に真珠らしさの評価が下がったと考えられる．

また，最も真珠らしいと評価された画像２が，順位こそ変わらないものの評価が下がっているのは，画像の粗さが目立つためと考えられる．逆に画像５の評価が上がっているのは，写真より滑らかな色相変化をなしているからと考えられる．

以上のことから，生成画像は，全体像としてだけでなく，部分的な真珠らしさも表現できていることが確認できた．また真珠らしさには，滑らかさ，とりわけ色相変化の滑らかさが関与すると考えられる．

表6.2　「真珠らしさ」の尺度距離行列２ー生成画像ー

	1	2	3	4	5	6	7	合計	平均
1	0.000	-0.842	0.583	-0.100	0.524	1.175	1.080	2.420	0.346
2	0.842	0.000	0.305	0.583	0.706	1.080	1.175	4.691	0.670
3	-0.583	-0.305	0.000	0.253	0.772	1.405	1.555	3.097	0.442
4	0.100	-0.583	-0.253	0.000	0.468	1.175	1.175	2.082	0.297
5	-0.524	-0.706	-0.772	-0.468	0.000	1.080	0.994	-0.396	-0.057
6	-1.175	-1.080	-1.405	-1.175	-1.080	0.000	0.994	-4.921	-0.703
7	-1.080	-1.175	-1.555	-1.175	-0.994	-0.994	0.000	-6.973	-0.996

6.4 まとめ

「真珠らしさ」という心理尺度により，実物の写真と本方法による生成画像のそれぞれを評価した．その結果，生成画像が全体像だけでなく，部分的にも真珠らしさを表現できていることが確認された．また，真珠らしさは非専門家にとっても共通な心理尺度であり，光沢と干渉色によって引き起こされていることがわかった．さらに，球という形状要素は真珠らしさと関係がない一方で，滑らかな色相変化が真珠らしさに関与しているなど，リアルな真珠を表現する上で，種々の知見が得られた．

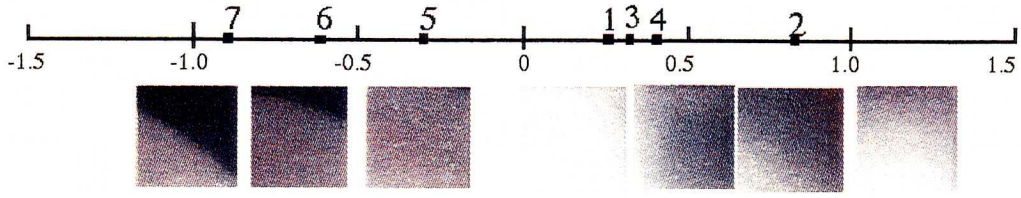
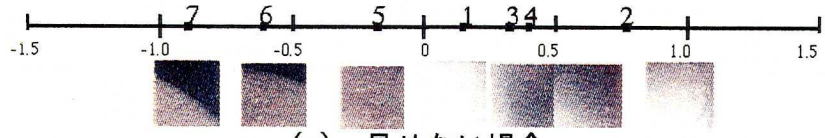
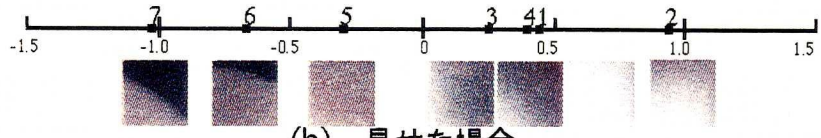


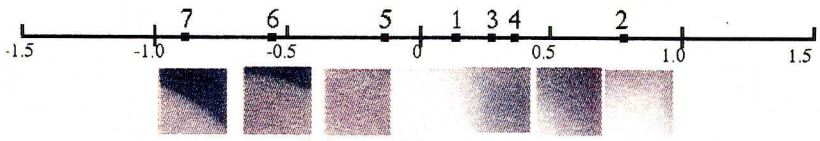
図6.2　「真珠らしさ」の尺度構成結果（写真）



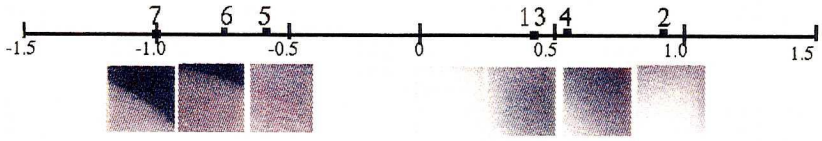
(a)　見せない場合



(b)　見せた場合



(c)　男性



(d)　女性

図6.3　「真珠らしさ」の尺度値の比較（写真）

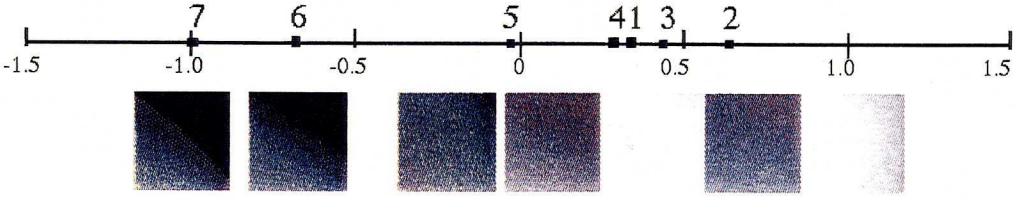


図6.4　「真珠らしさ」の尺度値の比較（生成画像）

7章　結論

専門家の感性の代行において，感性計測技術の枠組みと手法の提案，およびこれを応用した真珠品質評価システムの構築についてまとめた．

1章では，計測システムの現状と課題について述べ，これまでの感性に関する研究を概観した．そして専門家の感性を代行させるという観点から，感性計測技術の枠組みを提案した．

2章では，感性計測技術に関する従来の研究をまとめるとともに，専門家の感性の代行を目的としたときの問題点とアプローチを整理した．

3章では，解析・モデル化の一例として，真珠の表面性状評価に関する評価モデルとそのシステム化について述べた．心理実験によってキズの評価に形状の要素が関与していることを示し，キズと形状を総合的に説明する表面性状モデルを構築した．また球体のキズ形状評価方式として，検査作業における光学条件を実現する，リング光源を用いた処理方式を提案し，実験によってその有効性を示した．

4章では，解析・モデル化の新しい手法として，ニューラルネットの感度特性を用いた要因特定法を提案した．これは学習後の階層型ニューラルネットの入出力間の感度特性を用いて，入出力関係に寄与する度合いを定式化し，多数の入力要素の中から有効な要因を特定する方法である．本手法により，物理パラメータの候補の中から，有効な物理量の選択を行い，物理量と専門家の判断結果との因果関係を明確にすることができる．本手法を真珠の色彩評価に応用し，評価に寄与する物理量を明らかにするとともに，本手法による物理量の選択が識別一致率の向上をもたらすことを実証した．

5章では，モデル評価の一手法として，真珠の仮想サンプルを生成するビジュアルシミュレータの構築を行った．真珠の干渉現象は光源方向に依存しない，極めて特徴的な色相分布を示す．これを説明するため，球体における多層薄膜干渉の物理モデルを提案した．また心理実験によって，照り，色みという真珠の最も本質的な評価項目が，深み感，輝き感，きめ感の感性量により構成されていることを明らかにし，CGの表示アルゴリズムを3つの感性量に対応した干渉，映り込み，テクスチャの物理量から構成した．CGシミュレーションによって真珠の光学現象が表現できることを示し，物理モデルに基づいた手法の妥当性を検証した．

6章では，真珠を生成する際の”リアルな真珠の表現”という問題を，専門家でない一般人を対象に検討し，その要因を明らかにした．心理実験によって実際の写真と生成画像の各部分に対して「真珠らしさ」を評価してもらい，生成画像が真珠らしさを表現

できていることを検証した．また一般人も専門家と同様に，干渉や光沢を真珠らしさと感じていることを明らかにした．

感性計測技術は直感，イメージ，価値観といった心の反応を，システムに代行，支援させることを目的とした計測技術である．本論文では，とくに専門家の感性の代行という課題に対して，以下に挙げるアプローチを行った．

(1) 感性量のモデル化・システム化の枠組みの提案
(2) 物理量の選択手法の提案
(3) 品質評価シミュレータの提案

その結果，以下のような結論を得た．

(1) 「専門家が何に着目しているか」という点に関しては，専門家の意識下に隠れた要因を明らかにし，システムに組み込むことによって，人との一致率が向上する．とくに光学系などのH/W設計段階にフィードバックし，入力情報（計測物理量）の質を高めることが有効である．
(2) 「何を計ればいいのか」という点に関しては，多くの計測物理量から有効な要素を選択することによって，人との一致率が向上する．提案した要因特定法は，非線形モデルをベースとした手法であり，感性のような複雑な対象を解析・表現するのに適している．
(3) ビジュアルシミュレーションのような生成的手法は，計測物理量を操作する側からのアプローチであり，物理モデルに基づいて現象を適正に表現できれば，物理量と感性量の対応付けの上で，効果は非常に大きい．

今後の課題として，次の点が挙げられる．

(1) 専門家の意識下の要因を明らかにする解析手法が，現在では心理学的手法や多変量解析手法などに限られている．より柔軟な感性モデルや解析方法の確立が期待される．
(2) 総合的な真珠品質評価システムの構築が今後の課題である．最終的なシステム構築には，個別の感性モデルを統合化・最適化する手法や，モデルの評価をフィードバックする手法など，さらにシステム化の立場に立った方法を検討する必要がある．

参考文献

1章

[1] 小林彬：精密さとあいまいさ, 精密工学会誌, Vol.56, No.6, pp.51-55 (1990)

[2] 高辻利之：多元的計測とその情報技術に関する調査研究, 計量研究所報告, Vol.40, No.2, pp.149-159 (1991)

[3] 森村正直編著：先端センシング, （社）計測自動制御学会(1988)

[4] 栗山洋四：感性計測へのアプローチ, 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウム講習会資料, pp.199-207 (1991)

[5] 感性産業研究会基本報告書, 感性産業研究会 (1994)

[6] 重点領域研究「感性情報処理の情報学・心理学的研究」第2回全体会議予稿集 (1995)

[7] 増山英太郎, 小林茂雄：センソリー・エバリュエーション－官能検査へのいざない－, 垣内出版 (1989)

[8] 特集：人間中心の自動化システム, 計測と制御 Vol.32, No.3 (1993)

[9] 長町三生：感性工学, 海文堂出版 (1989)

[10] 原島博監修, 井口征士編：感性情報処理, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ, オーム社(1994)

[11] 片寄晴弘, 今井正和, 井口征士：”音楽における感性情報抽出の試み”, 人工知能学会誌, No.3-6, pp.748-754 (1988)

[12] 井口征士：”感性情報処理が目指すもの”, 情報処理学会誌, Vol.35, No.9, pp.792 (1994)

[13] 感覚計測に関するニーズ調査（上）, 計装, Vol.36, No.8, pp.63-73 (1993)

[14] 栗山洋四, 江原勝夫, 山根木正人編：感性計測先端技術集成, サイエンスフォーラム (1991)

[15] 計測アルゴリズムに関する調査研究報告書Ⅲ, 日本電子工業振興協会(1985)

[16] 長田典子, 亀井光仁, 赤根正樹, 中嶋紘之：”感性計測技術に基づく真珠品質評価システムの開発”, 電気学会論文誌C, Vol.112, No.2, pp.111-116 (1992)

[17] 和田浩蔵：真珠, 全国宝石学協会(1982)

[18] 中石浩志, 相田貞蔵：”ビデオカメラの焦点ぼかしによる真珠の色分類システム”, 電気学会論文誌C, Vol.107, No.8, pp.729 (1987)

2章

[19] 長田典子, 亀井光仁, 宇佐美照夫：”感性計測技術と真珠品質評価への適用”,

計測と制御，Vol.34, No.8, pp.654-661 (1995)

[20] 北島宗雄，宇津木明男：人間の感覚・感性を計測する，電子情報通信学会誌，Vol.76, No.3, pp.242-245 (1993)

[21] 長田典子，亀井光仁，宇佐美照夫：”ニューラルネットの感度特性を用いた要因解析と真珠の色彩識別への応用”，電気学会論文誌C（1996.5掲載予定）

[22] 臼井支朗，中内茂樹，中野正恵：”多層ニューラルネット恒等写像モデルによるマンセル色空間の特徴解析”，信学技報，NC89 - 40 , pp.45-50 (1989)

[23] 小林重順：カラーイメージスケール，日本カラーデザイン研究所編，講談社 (1990)

[24] Federspiel, C.C. and Asada, H.:"User - adaptable comfort control for HVAC systems", ASME Jour. Dynamic Systems, Measurement, and Control (1992)

[25] 山本純雄，佐藤啓仁，横田和隆，佐藤寛志：”視覚による濁りの認識とその計量化”，（社）計測自動制御学会第１０回記念センシングフォーラム, pp.29-34 (1993)

[26] 曽根敏夫他：計量心理学の音響学への応用小特集合，日本音響学会誌，Vol.42, No.10, pp.785-842 (1986)

[27] Kikkawa. Y. et al.:"Discrimination of taste of amino acids with a multichannel taste sensor", Jpn. J. Appl. Phys., No.32, pp.5731-5736 (1993)

[28] Nakamoto, T., Higuchi,Y. and Moriizumi, T. :"Study of fire - alarm system using plural semiconductor and quartz - resonator gas sensors", Sensor and Actuators A, No.40 pp.155-158 (1994)

[29] 川端季雄：”風合い客観評価法の応用研究；ニュージーランド羊毛夏服地の開発－ＳＣ／ＷＲＯＮＺ共同研究の報告－”，繊維工学，Vol.40, No.2, pp.66-75 (1987)

3章

[30] 長田典子，宇佐美照夫，亀井光仁，永尾俊繁，瀬藤誠，井田芳明：”感性計測技術の開発－真珠表面性状評価への適用－”，計測自動制御学会第11回センシングフォーラム (1994)

[31] 蓮沼宏：光沢，コロナ社(1960)

[32] 亀井光仁，橘幹夫：”表面微小うねりの検査装置”，精密工学会第３回「外観検査の自動化」ワークショップ (1991)

4章

[33] Asada, H. and Liu, S.: "Transfer of human Skills to Neural Net Robot Controllers", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2442-2448 (1991)

[34] 平野邦彦，宮道壽一 ：”調和配色を選定するニューラルネットの構成”， 信学論 Vol.J74 - D - 2, No.5 , pp.610-618 (1991)

[35] 臼井支朗，中内茂樹，中野正恵 ：”多層ニューラルネット恒等写像モデルによるマンセル色空間の特徴解析”， 信学技報，NC89 - 40 , pp.45-50 (1989)

[36] Tishby, N., Levin, E. and Solla, S.: "Consistent Inference of Probabilities in Layered Networks: Predictions and Generalization",Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks,Washington, D.C., No.2 403 - 409, IEEE (1989)

[37] Sietsman, J. and Dow, R.J.F.:"Neural Net Pruning-Why and How", IEEE International Conference on Neural Networks, I325 - 333 (1988)

[38] 押野隆弘，尾島潤，山本眞司 ：”誤差逆伝搬学習における中間層ユニットの逐次削減法”， 信学論(D-Ⅱ), Vol.J76 - D - Ⅱ, No.7, pp.1414-1424 (1993)

5章

[39] 高本健治，伊藤正弥，福井厚司，高田和政，西井完治，“浸み出し光を用いたセラミックのクラック検出”，計測自動制御学会第12回センシングフォーラム資料，pp.85-90 (1995)

[40] 奥田泰生，千葉直樹，安富文夫，松浦英文，河田宏，富田洋，“官能検査の判断に寄与する画像特徴量の特定”，日本機械学会講演論文集，No.324 pp.71-73 (1995)

[41] 安田孝美，横井茂樹，鳥脇純一郎，鶴岡信治，三宅宏康：”透明物体表示のための改良光線追跡法，”情報処理学会論文誌，Vol.25, No.6, pp.953-959 (1984)

[42] 井上一夫：”ダイヤモンドの特性の可視化と輝きの定量化について，”情処研報，GC51-3, pp.1-8 (1991)

[43] 斉藤泰，牧野光則，大石進一：”レイトレーシング法を用いた異方性不均質透明体の表現，”信学論(D-Ⅱ), Vol.J76-D-Ⅱ, No.8, pp.1755-1762 (1993)

[44] 安田孝美：”光線追跡法干渉色表現”，PIXEL, No.115, pp.150-153 (1993)

[45] 鈴木郁子，二上範之，新開謙三：”拡張光線追跡法による光伝播解析”，情報処理学会グラフィクスとCADシンポジウム論文集, pp.87-93 (1995)

[46] Gondek, Jay S., Meyer, Gary W. and Newman, Jonathan G.: "Wavelength Dependent Reflectance Functions", SIGGRAPH '94 Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.213-220 (1994)

[47] 西田友是，土橋宣典，金田和文，山下英生：”多重散乱および天空光を考慮した雲の表示法”，情報処理学会グラフィクスとCADシンポジウム論文集，pp.125-132 (1995)

[48] 千葉則茂，大川俊一，村岡一信，三浦守：”CGのための樹木の成長モデル－架

空の直物ホルモンによる自然な樹形の生成－”，信学論(D-Ⅱ), Vol.J76-D-Ⅱ, No.8, pp.1722-1734 (1993)

[49] 東海彰吾，宮城真，安田孝美，横井茂樹，鳥脇純一郎：”CGによる柑橘果実の質感表現の一手法，”信学論(D-Ⅱ), Vol.J76-D-Ⅱ, No.8, pp.1746-1754 (1992)

[50] Macleod, H.A.著：光学薄膜，日刊工業新聞社 (1989)

[51] 中原晧：”テトラサイクリンの使用による真珠層の生長度の測定”，国立真珠研報，No.6, pp.607-614 (1961)

6章

[52] 田中良久：心理学的測定法，東京大学出版会 (1977)

謝　辞

本論文は，著者が三菱電機株式会社産業システム研究所と大阪大学大学院基礎工学研究科において行ってきた研究を，井口征士教授のご指導のもとにまとめたものです．井口征士教授には，本研究の当初より多くのご示唆と励ましを賜り，様々な研究発表の機会を勧めて頂きました．また博士課程において研究を遂行し論文をまとめる機会を与えて下さり，懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました．さらに会社と大学の二重の研究生活に対し細部に渡ってご配慮頂きました。深く感謝し厚くお礼申し上げます．

本論文のまとめにあたり，有益なご教示を賜った谷内田正彦教授ならびに西田正吾教授に深く感謝いたします．産業科学研究所の北橋忠宏教授には，折に触れて温かい励ましを頂き，論文完成にあたって貴重なご示唆を賜りました．心から感謝の意を表します．

本研究の機会を与えて下さいました三菱電機株式会社産業システム研究所所長中堀一郎博士，同研究所センシングシステム開発部部長宇佐美照夫氏，同部第２グループグループマネージャ高嶋和夫氏に深く感謝いたします．亀井光仁主幹（現同社伊丹製作所）には，研究の立案，遂行方法をはじめ，研究全般にわたる具体的なご指導と示唆に富むご討議，ご助言を頂きました．井上悟主幹には，本研究を進めるにあたり温かなご援助とご配慮を賜りました．改めてお礼申し上げます．

大阪大学大学院基礎工学研究科在学中に様々なご指導，ご鞭撻を賜りました須田信英教授，田村坦之教授，藤井隆雄教授に厚くお礼申し上げます．

田崎真珠株式会社取締役大西弘一氏，同社真珠部部長中嶋紘之氏には，絶えず懇切なるご指導とご理解を賜りました．同部工程管理課係長赤根正樹氏には，本研究の評価において丁寧なご教示とご協力を賜りました．深く感謝いたします．

本研究にあたって様々なご援助，ご協力を頂いた三菱電機株式会社産業システム研究所センシングシステム開発部の先輩，同僚諸氏に感謝いたします．また本研究を進める上で多大なご協力を賜った同社伊丹製作所，関西支社の方々に厚くお礼申し上げます．

大阪大学真鍋佳嗣助手には，研究の全般的なご指導とご援助，ならびに論文の丁寧なご検討を賜りました．土橋外志正氏，山田剛士氏には，論文作成にあたって多大なご協力を頂きました．また加藤博一助手，山口証助手をはじめとする井口研究室のスタッフ，学生の方々には，多方面でご援助，ご協力を頂きました．ここに深くお礼申し上げます．

最後に，本研究を理解し，種々の議論や助言を通して，全面的に支え続けてくれた夫中須賀幹彦に感謝します．

業績リスト

学術論文・国際会議

[1] Fukada, Y.,Taniguchi, H., Nagata, N. and Inari, T.:"A bin picking system for cylindrical parts with automatic model construction faculty", Proc. Japan-U.S. Symposium on Flexible Automation, pp.725-732 (1984)

[2] Fukada, Y.,Taniguchi, H., Nagata, N. and Inari, T.:"Development of a model based bin picking system for cylindrical parts stacked randomly", Proc. SPIE Conference on Intelligent Robotics and Computer Vision, pp.388-395 (1986)

[3] Nagata, N., Kodaira, N., Bamba, T. and Tajima, S.:"A planning system for robotic palletization", Proc. International Robots & Vision Automation Conference and 22nd International Symposium on Industrial Robots, pp.7-37 - 7-48 (1991)

[4] 長田典子，亀井光仁，赤根正樹，中嶋紘之：”感性計測技術に基づく真珠品質評価システムの開発”，電気学会論文誌C，Vol.112, No.2, pp.111-116 (1992)

[5] Nagata, N., Kamei, M. and Usami, T.:"Transferring human sensibilities to machines - sensitivity analysis of layered neural networks and its application to pearl color evaluation - ", Proc. MVA'94 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.528-531 (1994)

[6] 長田典子，亀井光仁，宇佐美照夫：”ニューラルネットの感度特性を用いた要因解析と真珠の色彩識別への応用”，電気学会論文誌C（1996.5掲載予定）

[7] 長田典子，宇佐美照夫，眞鍋佳嗣，井口征士：”品質評価のためのビジュアルシミュレーションによる真珠の表現”，電子情報通信学会論文誌（投稿中）

研究会・シンポジウム

[1] 長田典子，谷口博康，深田陽司，稲荷隆彦：”二次元モデルを用いたビンピッキングシステム”，情報処理学会研究会報告，CV75-6 (1986)

[2] 長田典子，亀井光仁，橘幹夫，植木勝也：”視覚検査装置”，第3回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集 (1988)

[3] 長田典子，亀井光仁，赤根正樹，中嶋紘之：”真珠品質評価システムにおける感性情報抽出の試み”，精密工学会第3回外観検査の自動化ワークショップ (1991)

[4] 長田典子，亀井光仁：”ニューラルネットワークにおける解析手法の提案と色彩認識への応用”，精密工学会第3回外観検査の自動化ワークショップ (1991)

[5] 長田典子，亀井光仁：”感性計測技術とその真珠品質評価システムへの適用”，電気学会情報処理研究会資料，IP-92-18 (1992)

[6] 長田典子，亀井光仁：”感性計測技術とその真珠品質評価システムへの適用”，計測自動制御学会第10回センシングフォーラム, pp.17-22 (1993)

[7] 長田典子：”真珠の品質評価－ニューラルネットワークによる感性情報処理－”，精密工学会第５回外観検査の自動化ワークショップ (1993)

[8] 長田典子，宇佐美照夫，亀井光仁，永尾俊繁，瀬藤誠，井田芳明：”感性計測技術の開発－真珠表面性状評価への適用－”，計測自動制御学会第11回センシングフォーラム, pp.111-116 (1994)

[9] 長田典子，宇佐美照夫，真鍋佳嗣，井口征士：”真珠品質評価シミュレータの開発”，計測自動制御学会第12回センシングフォーラム, pp.103-108 (1995)

著　書

[1] 原島博（監修），井口征士（編），長田典子他（共著）：感性情報処理，電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ（オーム社）(1994)

[2] 輿水大和（監修），長田典子他（共著）：目視検査の自動化技術（テクノシステム）(1994)

解説・技術報告

[1] 丹羽正美，長田典子，赤松昌彦，深田陽司：”フラットパッケージIC実装ロボット用センサ”，三菱電機技報，Vol.62, No.2 (1988)

[2] 田島仁，長田典子，小平紀生，茂泉徹：”AI応用パレタイズシステム”，三菱電機技報，Vol.64, No.5 (1990)

[3] 清宮忠昭，竹垣盛一，長田典子，仲矢秀雄：”反応プロセスにおける今後の制御システム”，三菱電機技報，Vol.68, No.4 (1994)

[4] 長田典子，宇佐美照夫，井田芳明，赤根正樹，中嶋紘之：”ニューロ応用の真珠品質評価装置”，三菱電機技報，Vol.68, No.8 (1994)

[5] 長田典子，亀井光仁，宇佐美照夫：”感性計測技術と真珠品質評価への適用”，計測と制御，Vol.34, No.8, pp.654-661 (1995)

表　彰

[1] 長田典子，田島仁：”AI応用パレタイズシステム”，電機工業技術功績者表彰功労賞 (1991)

[2] 長田典子，亀井光仁：”感性計測技術とその真珠品質評価システムへの適用”，

電気学会論文発表賞 (1993)

[3] 長田典子，亀井光仁，赤根正樹，中嶋紘之：”感性計測技術に基づく真珠品質評価システムの開発”，日本映像処理研究会賞特別賞 (1994)

その他

[1] 長田典子：”AI応用のパレタイズシステム”，M&E，No.5, pp.108-117 (1991)

[2] 長田典子：”混載作業の自動出荷システムの現況と展望”，物流技術情報，Vol.38, No.11, pp.34-39 (1991)

[3] 長田典子：”真珠品質評価システムにおける感性情報抽出の試み”，画像ラボ，Vol.3, No.7, pp.53-56 (1992)

[4] 長田典子：”真珠品質評価システム”，ファクトリ・オートメーション，Vol.11, No.11, pp.46-49 (1993)

[5] 長田典子：”真珠品質評価システム”，機械設計，Vol.37, No.12, pp.70-72 (1993)

[6] 輿水大和，長田典子他：”マシンビジョンにおける感性について”，映像情報，Vol.26, No.6 (1994)

[7] 長田典子，亀井光仁，赤根正樹，中嶋紘之：”感性計測技術に基づく真珠品質評価システム”，OplusE，No.181, pp.128-133 (1994)