九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

画像技術を用いた畜産品及び工芸品の検査・設計支援システムの開発

白仁田，和彦
佐賀県工業技術センター生産技術部 ： 特別研究員 ： マイコン，画像処理，パターン認識

https://doi.org/10.11501/3134565

出版情報：九州芸術工科大学，1997，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：

氏　名・本籍（国籍）　　白仁田　和　彦　（佐賀県）
学　位　の　種　類　　博士（工　学）
学　位　記　番　号　　甲第 18 号
学位授与の日付　　平成 10 年 3 月 18 日
学位授与の要件　　学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目　　画像技術を用いた畜産品及び工芸品の検査・設計支援システムの開発
審　査　委　員　会　　幹事　教　授　瀧　山　龍　三
委員　教　授　長　島　健　次
委員　教　授　福　島　重　廣
委員　教　授　浦　濱　喜　一

論文内容の要旨

人間には、外界の情景を見て、どこにどのような対象物があるかを素早く判断できるという機能がある。このような機能を工学的に実現することができれば、種々の機械に“視覚”を付与することができる。視覚を持った機械は、自ら外界の状況変化を知り、それに適応的な動作をし、人間の代行として様々な仕事を能率良く実行するであろう。

上述のような機械を実現するための基本技術の一つは“画像処理”であると言えるが、計算機の性能向上に伴い、画像処理の産業応用に関する研究は盛んに行われている。しかしながら、人間の視覚による作業を軽減、あるいは代行するためには、画像処理を応用した機械の、なお一層の開発が望まれている。

熟練した専門家の目視により品質評価されているものの一つに、牛枝肉の等級判定（格付け）がある。格付けは、牛枝肉の切開面を格付員と呼ばれる専門家が基準規格見本と照合する目視検査によって行われている。この格付け作業は低温の冷蔵庫中で行われており、格付員にとっては過酷な労働である。牛枝肉格付けを行う自動化技術の開発が望まれる所以である。

一方、陶磁器産業は、伝統工芸的色彩が強く、極めて付加価値性の高い産業である。この産業は多岐にわたる作業に依存している。しかしながら、熟練労働者の不足、若年労働者の雇用難は深刻な問題であり、又生産体勢の質的な高度化も求められており、陶磁器製造における自動化技術の開発は急務と言える。なかでも、陶磁器への線描き作業、絵付け作業は多数の熟練作業者を必要とし、これに関する自動化システムの開発が強く望まれている。

本論文は、画像処理技術の産業界への応用という観点から、牛枝肉等級の自動判定と陶磁器への描画の自動化についての研究をまとめたものであり 6 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と扱っている問題を示し、あわせて論文の概要と構成について述べる。

第 2 章では、牛枝肉の肉質のなかで最も重要とされている脂肪交雑の等級付けを、画像

処理とニューラルネットワーク及び重回帰分析を用いて実現する方法について述べる。格付員は等級毎の基準画像と牛枝肉とを照合しながら等級付けを行っているので、まず等級判別のための基準を調べるために格付員への聞き取り調査を行い、この調査結果に基づいた等級付けのシステム化の方針について述べる。システムを安価で簡単なものにするために、4 ビットの白黒画像を用いれば充分であることを実験を通して明らかにする。この 4 ビットの白黒画像は、脂肪領域を抽出するために更に 2 値化（脂肪領域とその他の領域）する必要がある。本論文では、3 層ニューラルネットワークを用いて 2 値化する方法を提案する。ついで、重回帰分析を用いて格付員が目算している物理量の中から等級と相関の高い変量を求め、等級との関係式（重回帰式）を作る。重回帰式を用いて求めた等級が、格付員のものとよく一致することを示す。

第 3 章では、第 2 章で述べたシステムを更に精密にするために、牛枝肉の脂肪交雑をテクスチャパターンとして捉え、テクスチャ解析により脂肪交雑の等級付けを行う方法について述べる。テクスチャ解析手法としては、濃度共起行列を用いる。等級毎に 10 種の 4 ビット白黒画像を用意し、それに対して濃度共起行列を求める。等級毎に行列の要素を平均し、それぞれを各等級の標準テクスチャ特徴とする。入力画像のテクスチャ特徴と等級毎の標準テクスチャ特徴との類似度を求め、これを用いて入力画像の等級を決定する。この決定結果は格付員の結果とよく一致することを示す。

第 4 章では、陶磁器形状を 3 次元的に計測するシステムの開発について述べる。この計測システムでは、スリット光を陶磁器に照射し、その変化をカメラで撮像し、パソコン上のソフトウェアのみで画像処理し、高速に 3 次元座標値に換算する方法を提案する。陶磁器の凹部は、一般にカメラの死角になるので、2 つのカメラを用いて死角への対処法についても述べる。本計測システムを用いて、コンピュータ画面上に 3 次元的に計測結果を表示し、陶磁器形状が正しく計測できることを示す。

第 5 章では、陶磁器への描写システムの開発について述べる。このシステムでは、前章の計測システムによる計測結果と、デザイン画とを 3 次元ＣＡＤに入力し、計測結果から作成した計算機内の陶磁器に対してデザイン画を投影する。このシステムでは、投影されたデザインの線の軌跡のＮＣ（数値制御）データをＣＡＤから出力し、 ＮＣデータにより動作す 4 軸描画ロボットで陶磁器への描画を自動的に行うことができる。実験では、意図したデザインを人間が写しかえるのと同じように自然なかたちで陶磁器へ描画できることを示す。

第 6 章では、結論を述べ今後の課題について論じる。

論文審査の結果の要旨

地域の活性化を目指して、地場産品、特産品の生産性の向上に対する関心が各地域で高まっている。このような物品の生産には一般に多岐にわたる手作業的な労働が必要であり、熟練技術者の不足、若年労働者の雇用難、労働環境の厳しさ等深刻な問題がある。

一方で、半導体技術及び情報処理技術の最近の発達に伴い、パターン認識とりわけ画像

認識手法の実用化が各種産業において、一段と進んでいる。そこでは画像処理技術と認識技術との結合によって、主として人間の視覚に依存する作業を機械システムに代替させる技術の開発が主眼となっている。このような状況のもとで特に検査・設計の分野における自動化技術の開発の可能性と必要性とがクローズアップされている。

本論文は画像認識技術の産業界への応用を意図した、検査・設計支援システムの開発に関する研究をまとめたものである。具体的には佐賀県の地場産品の代表的なものである、牛枝肉と陶磁器の生産現場において要望されている、検査・設計支援システムの開発を行った結果を述べたものである。

第 1 章においては、研究の意義とその背景及び論文の目的を明らかにしている。

第 2 章においては、牛枝肉の等級付けにおいて最も重要な要素である“脂肪交雑”に着目し、肉画像から肉質を判定するシステムを提案している。ここでは肉画像の適切な処理法の考案と、ニューラルネット及び統計処理を効率良く活用することにより、簡易で性能の高い手法を実現している。特にシステムを廉価にするためにカラー画像は不要であり、4 ビットのモノクロ画像で十分であることを見出していることなど、興味深いものがある。

第 3 章においては、前章における脂肪交雑に関する画像処理をより細かく行うために、画像をテクスチャパターンとみなし、テクスチャ解析を用いて肉質を判定する方法を示している。この解析法は濃度共起行列の要素を直接用いるもので、計算が簡単で結果も良い。

第 4 章においては、陶磁器の 3 次元形状の効率的な計測法を提案している。この計測法では、スリット光の変化をカメラを用いてパソコンに取り込み、3 次元座標値を精度良く高速に求めることが出来る。特に陶磁器の凹部がカメラの死角になることへの対処法も検討されており、その実用性は高い。

第 5 章においては、3 次元陶磁器表面への自動描画システムの開発について述べている。このシステムでは 2 次元面に任意に与えられた画像を、陶磁器の表面（曲面）上に描画する（貼り付ける）ために、3 次元ＣＡＤから出力されたＮＣデータを用いている。このＮＣデータを出力するには、陶磁器の形状に関するデータをＣＡＤに保持しておく必要があるが、これには第 4 章で述べた計測システムが有効に働くことを実証している。このＮＣデータによって、4 軸描画ロボットを制御し陶磁器の表面に自動的に描画を行い、その結果は、人間と同等の正確さをもっていること等が示されていて、実用化に一段と近づいている。

最後に第 6 章においては、本論文の結論を述べ、今後の課題について論じている。

以上要するに、本論文は、産業界で要望の強い、“画像技術を基礎とした検査・設計支援システムを構成する方法”を、佐賀県の地場産品を取り上げて具体的に提案しており、その実用的価値は高い。この論文で示されている諸手法は一貫して実用性を見据えた、簡易で安価なシステム構成を追求しており、産業界における他の多くの作業に対しても応用可能であると思われ、工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものであると認められる。

最終試験の結果の要旨

本論文の全般にわたって著者の説明を受けた後、審査委員が口頭により試問を行った。すなわち、1）画像処理における二ューラルネットの学習の収束性、2）格付員による判定とシステムによるものとの一致度の検定法、3）濃度共起行列の有効性、4）3 次元計測のおけるカメラの使用法、5）陶磁器面に描画可能な画像の性質、6）今後残された問題、などについて質問があり、何れに対しても明快な回答が得られた。

次に本論文について情報伝達専攻主催の公開発表会が開かれ、本学関係研究室、他大学及び地元企業等から多数の出席者があった。著者の発表の後の討議では、このシステムの導入に要する費用と人件費との比較、他業種への適用の可能性、モノクロ 4 ビット画像を使用することの根拠、画像の 2 値化の際の前処理法、データ取り込みにおける照明条件等について活発な質問がなされ、著者の説明によっていずれに対しても十分な理解が得られた。

以上の結果から、著者は最終試験に合格したものと認めた。

目次

第１章　序論 3

1.1　研究の目的とその背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

1.2　論文の概要と構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10

第２章　画像処理とニューラルネットによる牛枝肉の等級判定システム 12

2.1　まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12

2.2　等級付けのシステム化の方針・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13

2.3　システムに入力する肉画像の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18

2.4　ニューラルネットワークによる肉画像の２値化・・・・・・・・・・・・ 27

2.5　重回帰分析による等級判別基準の検討・・・・・・・・・・・・・・・・ 32

2.5.1　重回帰分析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32

2.5.2　５つの変量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32

2.5.3　各変量間の相関係数と重回帰式の導出 ・・・・・・・・・・・・・ 34

2.5.4　分析精度の評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34

2.6　等級付け実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36

2.7　むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37

第３章　テクスチャ解析による肉質の格付け 38

3.1　まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38

3.2　テクスチャ特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39

3.2.1　濃度共起行列による特徴 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39

3.2.2　標準テクスチャ特徴ベクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41

3.3　等級付け実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47

3.4　むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 50

第４章　陶磁器の３次元形状計測システムの開発 51

4.1　まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51

4.2　３次元形状計測システムの原理と構成・・・・・・・・・・・・・・・・ 54

4.2.1　システム構成と計測原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
4.2.2　３次元座標値の計算法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 57
4.2.3　死角の対処法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
4.2.4　計測データの３次元表示 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 66
4.3　計測実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
4.3.1　計測精度評価実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
4.3.2　陶磁器の３次元形状計測実験 ・・・・・・・・・・・・・・・ 70
4.4　むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77

第５章　陶磁器への自動描画システムの開発　78
5.1　まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.2　デザイン描画システムの原理と構成・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.3　描画デザインのＮＣデータの作成・・・・・・・・・・・・・・・ 81
5.3.1　計測データを用いた陶磁器形状の復元 ・・・・・・・・・・ 83
5.3.2　描画デザインの入力 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 85
5.3.3　ＮＣデータの作成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 89
5.4　陶磁器への描画実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
5.5　むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 109

第６章　結論　110

謝辞　112

参考文献　113

第１章

序論

１．１　研究の目的とその背景

人間には、外界の情景を見て、どこにどのような対象物があるかを素早く判断できるという機能がある。このような機能が工学的に実現できれば、種々の機械に”視覚”を付与することができる。視覚を持った機械は、自ら外界の状況変化を知り、それに適応的な動作をすることができ、人間の代行としてさまざまな仕事を能率良く実行できるであろう。上述のような機械を実現するための基本技術の一つは、”画像処理”であると言える［1]。

近年、半導体技術のめざましい発展により、計算機を用いた画像処理の産業応用に関する研究が盛んに行われている。計算機を用いた画像処理は、大きく三つの分野に分けることができる[2]。第１の分野は、入力された画像に対して種々の処理を施し、画像として出力する画像変換の分野である。この分野では、階調補正、近傍処理、幾何学的処理、フィルタリングなどの処理[3][4][5]を行い、人間の目では検出し難い細かい変化を強調したりして診断や検査の際の人間の判断を助けるための処理として広く用いられている。人工衛星から送られてくるリモートセンシングの画像処理[6]や医用画像処理[7][8][9]の分野で中心に発達している。第２の分野は、入力画像の中から対象物を抽出し、その個数、寸法、面積などの計測処理[10]や、抽出した対象物の特徴から分類を行うパターン認識[11]の分野である。計測は人間にとって単純でしかも時間のかかる作業を計算機に行わ

せようとするものである。パターン認識は、計測結果などの対象物の特徴を用いて分類する作業を計算機に行わせようとするものである。計測やパターン認識は、自動化や省力化に広く用いられている。工場内の製造ラインや検査ラインの自動化などの分野で中心に発達している。なかでも先端的な製造業の発展は、この分野の処理の適用なくしては成り立たなかったであろうと言っても過言ではない。計測、パターン認識は、工場内の製造や検査の分野だけでなく、交通量などを判断する交通システム[12][13][14]、キュウリ[15]、じゃがいも[16]、なす[17]など農作物の選別、魚種[18]の選別などさまざまな分野へ応用されている。第３の分野は、何らかの記述データを処理して画像として出力する画像生成の分野である。この分野は、数値データなどから画像生成することでもあり、コンピュータグラフィックスやＣＡＤ／ＣＡＭ (Computer aided design/Computer aided manufacturing)などの画像を用いる種々の分野でのデザインの応用に用いられている。たとえば、服飾デザインや織物パターンなどのデザインの生成に応用されている[18]。

画像処理技術の応用事例については、山本ら[19] 、石井ら[20]によるサーベイがあり、また、田村ら[21][22][23]、輿水[24]、本多ら[25]による解説もある。これらの文献を見ると、工業分野のみならず，様々な分野へ応用されていることがわかるが、人間の視覚による作業を軽減、あるいは代行するためには、画像処理を応用した機械の、なお一層の開発が望まれている。

近年、専門家の経験や勘に頼って作業している分野への画像処理の適用の研究が注目されている。例えば、品質、性状、質感といった感覚に訴える情報をベースとしたシステムの開発が求められている。数少ない最近の研究の例の一つに、真珠の品質評価システムがあげられる[26]。この研究では、複雑で微妙な光学的特性を持つ真珠の傷の検出、色彩、照り、色味といった感性量の計測とクラス分けなど、従来熟練検査員によって行われていた品質評価を、分光スペクトルデータを階層型ニューラルネットに通すことにより行っている。また、谷水の研究[27]では、カラー印刷物の色調検査の自動化について検討している。この研究では、カラー印刷物の色調の定量化を行い、検査員と同等の能力を持つ印刷物の色調検査装置の開発をめざしている。いずれの研究においても、熟練作業者と同等の能力を持つシステムを開発するために、作業者の経験やノウハウを学び、その結果

をシステムの中に生かそうとしており、このことはこの分野のシステム開発において必要なことである。

熟練した専門家の目視により品質評価されているもののひとつに、牛枝肉の格付け（等級判定）がある。これは国内で生産される牛枝肉を、一定の基準に基づいて品質評価するものである。わが国で取引されている牛枝肉は、社団法人日本食肉格付協会によって等級判定されている[28]。等級判定は、牛枝肉の切開面を格付員と呼ばれる専門家が、基準規格見本と照合する目視検査により行われている。等級判定作業は低温の冷蔵庫の中で行われているため、格付員にとっては過酷な労働となっている。格付員は各枝肉の品質の微妙な違いを見極め等級判定を精度よく行っているが、畜産農家の経営規模の拡大に伴い、格付けする枝肉数も年々増加する一方であり、格付員が牛枝肉を短時間に精度よく判定するのにも限界がある。このため、牛枝肉等級の自動判定のための自動化技術の開発が望まれている。

牛枝肉の等級は、商品となる肉の量に関する歩留まり等級と、肉の質に関する肉質等級の２つの要素から総合的に判定されている。歩留まり等級は、決められた切開面におけるロース芯面積、ばらの厚さ、皮下脂肪の厚さ及び半丸枝肉重量の４項目を数値化し、この数値を定められた式に代入し、各枝肉の歩留まり基準値を求め、３つの等級に分けている。肉質等級には４種類の要因があり、それらは脂肪交雑、筋肉部の色と光沢、締まり及びきめ、脂肪の色と光沢である。なかでも、脂肪交雑は肉質等級を決定する最も重要な要因とされている。

脂肪交雑の等級付けの自動化に関しては、これまでに口田[29]と白仁田[30][31]の研究がある。口田の研究では、牛枝肉のカラー画像を用いてロース芯部分を判別分析法[32]により２値化し、ロース芯部分における脂肪の面積率を求めて脂肪交雑の等級を決定している。白仁田の研究では、256階調の白黒画像を用いて判別分析法によりロース芯部分を２値化し、口田と同様に面積率を求め等級を決定している。しかしながら、いずれの結果も実用的な等級判定には充分満足すべきものとは言い難い。脂肪交雑の等級を自動判定する実用性のあるシステムの開発が望まれる。

格付員は長年の経験に基づいて等級判定作業を素早く行っている。このことは、格付員が等級判定のための何らかの基準を持っていることを伺わせる。もし格付

員の長年の経験に根ざした基準をシステムに生かすことができれば、格付員と同等のシステムを開発できる可能性がある。このためにも、格付員の経験やノウハウについて詳細に調査し、等級判定に係わる要因を明らかにし、その要因を抽出する方法を研究する必要がある。格付員は牛枝肉を目で見て等級を判定しているので、格付員が現場で見ているものと同じ画像を計算機に入力し、その画像を処理することにより格付員が等級判定に用いている要因と関係のある物理量を抽出できる可能性がある。そこで、格付員が見ている画像を計算機に入力し、その画像を処理して等級判定の要因と関係のある物理量を求めることが必要である。その物理量が入力画像から抽出できれば、それに基づいて等級を自動判定するための基準を明確にする必要がある。基準が明確化されれば、この基準を用いて等級判定の自動化が可能となるであろう。

牛枝肉の等級判定のシステムを安価にするためには、入力画像の階調数は少ない方がよい。口田や白仁田の研究では、256階調のカラー画像あるいは白黒画像を処理の対象としている。もし入力画像の階調数をこれより更に下げることができれば、画像の入力系の構成は簡単になり、画像処理のための演算時間は短く、画像処理の計算コストは低くすることができる。したがって、入力画像の階調数をどの程度まで下げることが出来るかを検討することは重要である。

一方、陶磁器産業のように多岐にわたる作業が関与している産業も多い。つまり陶磁器産業は、伝統工芸的色彩が強く、極めて付加価値性の高い産業であるので、いくつもの専門的作業が深く関わっている。しかも、人手による作業が中心であるので、生産性が低く商品の多様化が難しいなどが問題とされている。また最近の熟練労働者の不足、若年労働者の雇用難は深刻な問題であり、生産体勢の質的な高度化も求められ、陶磁器製造における自動化技術の開発は急務となっている。なかでも陶磁器への線描き作業、絵付け作業は手作業であり、多数の熟練労働者が必要である。したがって、陶磁器への描画を自動化するシステムの開発が強く望まれている。

陶磁器曲面への描画に関する研究として森田らの研究[33]がある。この研究では、複数個の光学式距離センサを用いて陶磁器曲面と描画ペンが一定距離を保ちながら描画する方法を提案している。この方法では、壷形状の凸部に対しては描画可能であるが、凹部に対しては、そのシステムの構造上、描画動作は不安定で

あり、皿のような平板な形状に対しては描画は難しい。したがって、さまざまな陶磁器形状に対して描画が可能なシステムの開発が望まれている。

壺形状の凹部への描画を可能にする方法の一つとして、その凹部の形状を３次元的に計測し、その計測値に基づいて描画ペンを作動させ描画する方法が考えられる。陶磁器形状を３次元的に計測できれば、その計測結果とＣＡＤとを融合することにより、陶磁器形状を作るための石膏型をＮＣ加工機により製作することもできる。陶磁器製造工程全体を一貫した生産体勢に転換することも重要な課題であるので、陶磁器形状を３次元座標値として求めることは、上述の点からも必要である。したがって、陶磁器形状を３次元的に計測するためのシステム開発が必要である。これは、陶磁器への描画の自動化にとどまらず、今後の陶磁器製造工程全般に対する高度化にもつながるものである。

物の形を３次元座標値として求める方法は、多数提案されている[34][35][36][37][38]。これまで提案されている方法を大別すると、接触式と非接触式の二つに分けることができる。接触式は、メジャーを当てたり、プローブの先端を対象に当ててその位置を三つの軸に取り付けられた位置センサの出力として読み取る方式であり、製品の寸法検査などに利用されている。この方法は、点計測に基づいた計測法であるため、複雑な形状あるいは多数の計測値が必要な場合は、時間と労力が必要であり、陶磁器の形状計測には適していない。

一方、非接触式の方法は、更に受動的方法と能動的方法に分けられる。能動的方法とは、光波、電波、音波など特別のエネルギーを、対象に照射して計測する方法であり、受動的方法とは、対象に対して通常の照明などは行うが計測のために特別にはエネルギーを用いない計測のことである[39][40]。一般に、能動的な計測の方が受動的な計測より信頼性が高い[41]。例えば、陶磁器の形状計測を行う場合は、光を対象に照射して、その挙動（伝搬時間、変位など）を計測するという、能動的な方法が多くの面で有利と考えられる。この方法では、光を照射するための装置上の工夫が必要であるが、計測の分解能、計測時間、距離分解能、計算コストなどを考慮すると多くの点で受動的方法より優れている。実際、陶磁器の形状計測では、光照射による方法は実用的な計測法として利便性が高く極めて有効な手法である。計測装置を開発する場合、目標とする計測精度にあった方法を検討することが重要であるが、陶磁器計測の場合、１mm以下の精度が得られ

れば充分である。光を照射する方法では、十分にこの精度が得られ、しかも複数点を高速に計測できるという特長を持つ[42][43]。

光を用いた計測方法の一つにスリット光投影法（別名：光切断法）がある[44][45]。この方法は、スリット光を対象に照射し、対象物の形状に応じたスリット光の変化をカメラなど受光素子で捉え、その位置の変化から三次元座標値を求める方法である。スリット光投影法を用いて三次元形状を計測する研究として、荒木らの研究[46]、西野らの研究[47]、五味らの研究[48]がある。荒木、西野らの研究では、対象物を回転テーブルに載せ、回転軸に向けてスリット光を投影し対象物を回転させながら立体形状を計測している。五味らの研究では、対象物にスリット光を当て、対象物をスリット光とカメラの位置に対して平行に移動させることにより立体形状を計測している。陶磁器の形状はさまざまである。壺形状のものは回転させながら計測するのが適当であり、皿形状のものは回転させながら計測するのは困難である。皿形状のものは五味らの研究のように平行移動方式であれば計測することができる。したがって、陶磁器のようにさまざまな形状を持つ対象物を計測するシステムを開発する場合には、対象物を回転及び平行移動の可能なシステムが必要である。

さらに、高速に精度良く三次元座標値を求めることもシステム開発において重要である。荒木らの研究では、高速化のためにスリット光の受光素子としてフォトセンサを用いている。この研究では、２次元に配置されたフォトセンサをスリット光が通過する時間をメモリに記憶し、対象物の形状により通過する時間が変化するのを利用して三次元座標値を求める方法であり、計測時間の高速化を実現している。しかし、十分な精度を得るためには多数のフォトセンサを精密に２次元的に配置する特殊な技術が必要であり、多数のメモリも用意する必要がありコストがかかりすぎる。一方、西野や五味らの研究では、受光素子にカメラを用いている。これは、安価にシステムを開発できる可能性がある。西野らの研究では、固定したスリット光とカメラの位置関係から、対象空間の既知点を指し示すことにより画像上の座標と対象３次元空間上の座標との間の関係をあらわす行列を求め、その行列を用いて三次元座標値を求めている。五味らの研究では、スリット光の位置とカメラの位置から三角測量の原理に基づいて３次元座標値を求めている。しかし、これらの方法では計測点が多数の場合、その数に相当して繰り返し

数値演算が必要となるため計算時間がかかりすぎて実用的ではない。実用的な計測時間で三次元座標値を求める方法の開発が望まれる。

スリット光投影法を用いた３次元計測システムでは”死角”が問題となる。死角とは、物に遮られてカメラでスリット光を捉えきれない場合の地点のことを言う。西野らの研究[47]では、この死角を解消するために２つのカメラＡ、Ｂを用いてカメラＡの画像上の点がカメラＢの画像上のどの点に対応するかを行列として求め、片方で見えなかった部分の座標値をもう一方のカメラで対処する方法を提案している。この方法では画像上の既知の点を指し示して行列をイニシャライズする。このためには、画像上の点を何らかの方法で指し示す必要がある。多くの点を示すことにより精度の良い行列が得られ、２カメラ方式は有効な方法であるが、行列のイニシャライズのために多くの手作業が必要である。そこで、要求される陶磁器計測の精度を満足しながら、簡便に死角を解消する方法を見つける必要がある。

前述のように陶磁器形状を３次元座標値として求めることができれば、その計測データに基づいて描画ペンを動かすことにより陶磁器への描画を実行できる。このことを可能にする方法としてＣＡＤの利用が考えられる。一般にＣＡＤは、機械設計、機械加工の分野で利用されている装置である[49]。ＣＡＤの利用者は、キーボードやタブレットなど入力機器を操作して画面上に加工したい部品形状を設計し、その部品を工作機械で加工するための制御用データであるＮＣ（Numerical control）[50]データを出力するために利用している。工作機械は、ＮＣデータに基づいて作動し、目的の部品形状を加工する。加工のために出力されるＮＣデータは、加工用刃物の３次元位置が記述されている。この加工用刃物を描画ペンに置き換え、ＣＡＤから出力されるＮＣデータがデザイン画の線の軌跡であれば、工作機械は描画装置となる。つまり、ＣＡＤを利用して陶磁器への描画のＮＣデータを作成し、そのＮＣデータにより動作する描画装置を開発するならば陶磁器への描画が可能となると言える。ＣＡＤを用いて陶磁器への描画のためのＮＣデータを作成するためには、ＣＡＤ上に描画対象である陶磁器形状を復元する必要がある。このためには、前述の３次元計測システムを用いて陶磁器形状を計測し、その計測結果をＣＡＤに入力すればよい。ＣＡＤへのデザイン画像入力は、タブレットを用いて行う。入力するデザインは２次元画像であるので、これを陶

磁器の曲面に貼り付けるために、３次元的なデータへ変換する必要がある。したがって、ＣＡＤ内におけるデザイン描画のためのＮＣデータの作成の手順を示す必要がある。

加工用工作機械は、いくつかの座標系を持っている。これは、さまざまな形状を加工するために刃物が自由に動作できるようにするためである。これと同様に陶磁器への描画装置も、種々の座標系を持っていれば、さまざまな形状に対応して自由に描画ができるであろう。このような描画装置を用いれば、森田らの方法では不可能であった壷の凹部や皿への描画が可能となる。したがって、いくつかの座標系で動作する描画装置の開発が必要である。

１．２　論文の概要と構成

本論文は、1.1で述べた種々の問題点に対し、これに対処する方法の研究をまとめたものである。

以下に論文の概要と構成を示す。

第１章は、序論であり本論文で扱っている問題の概要と論文の構成について述べている。

第２章では、牛枝肉の肉質の中で最も重要とされている脂肪交雑に基づく等級付けを、画像処理とニューラルネットワーク及び重回帰分析を用いて実現する方法について述べる。格付員は等級毎の基準画像と牛枝肉とを照合しながら等級付けを行っている。まず、等級判定のための基準を調べるために格付員への聞き取り調査を行い、格付員が牛枝肉の脂肪領域に対していくつかの物理量を目算していることを明らかにし、この調査結果に基づいた等級付けのシステム化の方針について述べる。システムを安価で簡単なものにするために、システムへの原画像として４ビットの白黒画像を用いれば充分であることを実験を通して明らかにする。この４ビットの白黒画像は、脂肪領域を抽出するために２値化（脂肪領域とその他の領域）する必要がある。本論文では、３層ニューラルネットワークを用いて２値化する方法を提案する。ついで、重回帰分析を用いて格付員が目算している物理量の中から等級と相関の高い変量を求め、等級との関係式（重回帰式）

を作る。重回帰式を用いて求めた等級が、格付員のものとよく一致することを示す。

第３章では、牛枝肉の脂肪交雑をテクスチャパターンとして捉え、２章で述べた格付員への聞き取り調査の結果を利用して、テクスチャ解析により脂肪交雑の等級付けを行う方法について述べる。テクスチャ解析手法としては、濃度共起行列を用いる。各等級毎に10種の４ビット白黒画像を用意し、それに対して濃度共起行列を求める。各等級毎に行列の要素を平均し、それぞれを各等級の標準テクスチャ特徴とする。入力画像のテクスチャ特徴と各等級の標準テクスチャ特徴との類似度を求め、類似度の最も大きい標準テクスチャを持つ等級をその入力画像の等級と決定する。このテクスチャ特徴を用いて決定した等級が格付員のものとよく一致することを示す。

第４章では、陶磁器形状を３次元的に計測するシステムの開発について述べる。この計測システムでは、スリット光を陶磁器に照射し、その変化をカメラで撮像し、パソコン上のソフトウェアのみで入力画像を処理し、高速に三次元座標値に変換する方法を提案する。本計測システムでは、さまざまな陶磁器を計測可能にするために、２種類の計測方式を採用している。陶磁器の凹部は、一般にカメラの死角になるので、２つのカメラを用いて死角への対処の方法について述べる。本計測システムを用いて陶磁器を計測し、コンピュータ画面上に３次元的に計測結果を表示し、正しく計測できることを示す。

第５章では、陶磁器への描画システムの開発について述べる。このシステムでは、４章で述べた計測システムによる計測結果と、描画デザインとを３次元ＣＡＤに入力し、計測結果から作成した計算機内の陶磁器に対して描画デザインを投影する。投影されたデザインの線の軌跡のＮＣ（数値制御）データをＣＡＤから出力し、ＮＣデータにより動作する４軸描画ロボットで陶磁器への描画を自動的に行うことができる。描画に関する種々の実験によって、意図したデザインを人間が写しかえるのと同じように自然なかたちで皿や壺へ描画できることを示す。

第６章では、結論を述べ今後の課題について述べる。

第２章

画像処理とニューラルネットによる牛枝肉の等級判定システム

２．１　まえがき

序論でも述べたように、熟練した専門家の目視により品質評価されているものの一つに牛枝肉の等級判定がある。わが国で取引されている牛枝肉は、社団法人日本食肉格付協会[28]によって等級判定されている。等級判定は、牛枝肉の切開面を格付員と呼ばれる専門家が基準規格見本と照合する目視検査により行われる。この等級判定作業は低温の冷蔵庫中で行われているため、格付員にとっては過酷な労働となっている。等級判定される牛枝肉の量も増加する傾向にあり、格付員が短時間に精度良く判定するのにも限界がある。

牛枝肉の等級は、商品となる肉の量に関する歩留まり等級と肉の質に関する肉質等級との２つの要素から総合的に判定されている。肉質等級には４種類の要因があり、それらは脂肪交雑、筋肉部の色と光沢、締まり及びきめ、脂肪の色と光沢である。なかでも、脂肪交雑は肉質等級を決定する最も重要な要因とされている。

本章では、脂肪交雑の等級判定を画像処理技術を用いて実現する方法について述べる。

格付員は、脂肪交雑の等級判定を精度良く、しかも素早く行っている。これは、格付員が長年の経験により培った能力であると考えられる。精度の良い等級判定

を機械的に実現するためには、格付員の経験をシステムに生かす必要がある。

本章では、まず等級判定のための基準について、格付員への聞き取り調査を行った結果を述べる。この調査より、格付員は牛枝肉の脂肪領域に対していくつかの物理量を直観的に読み取っていることを明らかにし、調査結果に基づいた等級付けのシステム化の方針について述べる。この調査では、牛枝肉の脂肪領域と筋肉領域の濃度パターンのきめの細かさや、繰り返しの状態などを見抜いて等級判定していることも判明した。このことを用いた等級の自動判定については３章で述べる。

システムを安価で簡単なものとするためには、原画像はカラー画像よりも白黒画像を用いる方が良いのは勿論である。以下の議論では、４ビットの白黒画像を用いれば充分であることを、実験を通して明らかにする。

システム化のために、上の４ビットの白黒画像から脂肪領域を抽出し、その脂肪領域に対していくつかの物理量を計測する必要がある。この脂肪領域の抽出には、本章ではフィードフォワード型の３層ニューラルネットワークを用いる方法を提案する。

次に、重回帰分析を用いて格付員が読み取っている物理量の中から、等級と相関の高い変量を求め、等級との関係式（重回帰式）を作る。

最後に、その重回帰式を用いて求めた等級が、格付員によるものとよく一致することを示す。

２．２　等級付けのシステム化の方針

脂肪交雑は、ロース芯部分における脂肪の分布密度の程度を表すものである。格付員は図２．１に示すような12段階（等級）に分けられた牛脂肪交雑基準と、実際の牛枝肉とを照合することにより脂肪交雑の等級を決定している。この作業は、基準画像と牛枝肉との照合により決定されるものであり、等級付けのための基準となる明確な物理量は示されている訳ではない。しかしながら、格付員は、長年の経験に基づいて瞬時に等級付けを行っており、経験に基づいた何らかの基

準を用いて等級付けを行っていると推測できる。そこで、格付員がどのような基準によって等級付けを行っているか、聞き取り調査を行った。

この調査の結果、次のような点に注目して等級付けを行っていることが明らかになった。まず、ロース芯部分を経験に基づいて脂肪領域と筋肉領域に分け、ロース芯部分の全体面積に対する脂肪領域の面積割合を概算する。「さし」と呼ばれる一つ一つの脂肪領域の大きさとその個数、及びロース芯全体における「さし」の分布（ちらばり具合い）を調べる。以上の諸点（直観的な判断による）をもとに、格付員は等級付けを行っている。上述の「さし」は、その大きさにより「大さし」、「小さし」と区別して呼んでいる。そこで、実際の肉画像を処理して、上述した物理量を求めることができれば、格付員と同等の能力を持つシステムが開発できる可能性がある。

上の調査に基づいて、次の諸点を考慮してシステムを作ることにする。

1°：システムに入力する肉画像の性質の検討。

（カラー画像にする必要があるか、白黒画像でも良いか、画素値は何ビットでよいか）

2°：ロース芯領域を適切に脂肪領域と筋肉領域の二つの領域に分離すること。

3°：肉質を決める次の変量を計算すること。

1）ロース芯全体の面積に対する脂肪領域の面積の割合。

2）「さし」の個数。

3）「大さし」の個数。

4）「小さし」の個数。

5）「さし」の分布の偏り程度。

4°：3°の変量に基づいて等級を決定すること。

以下においてこの点を順次検討していく。

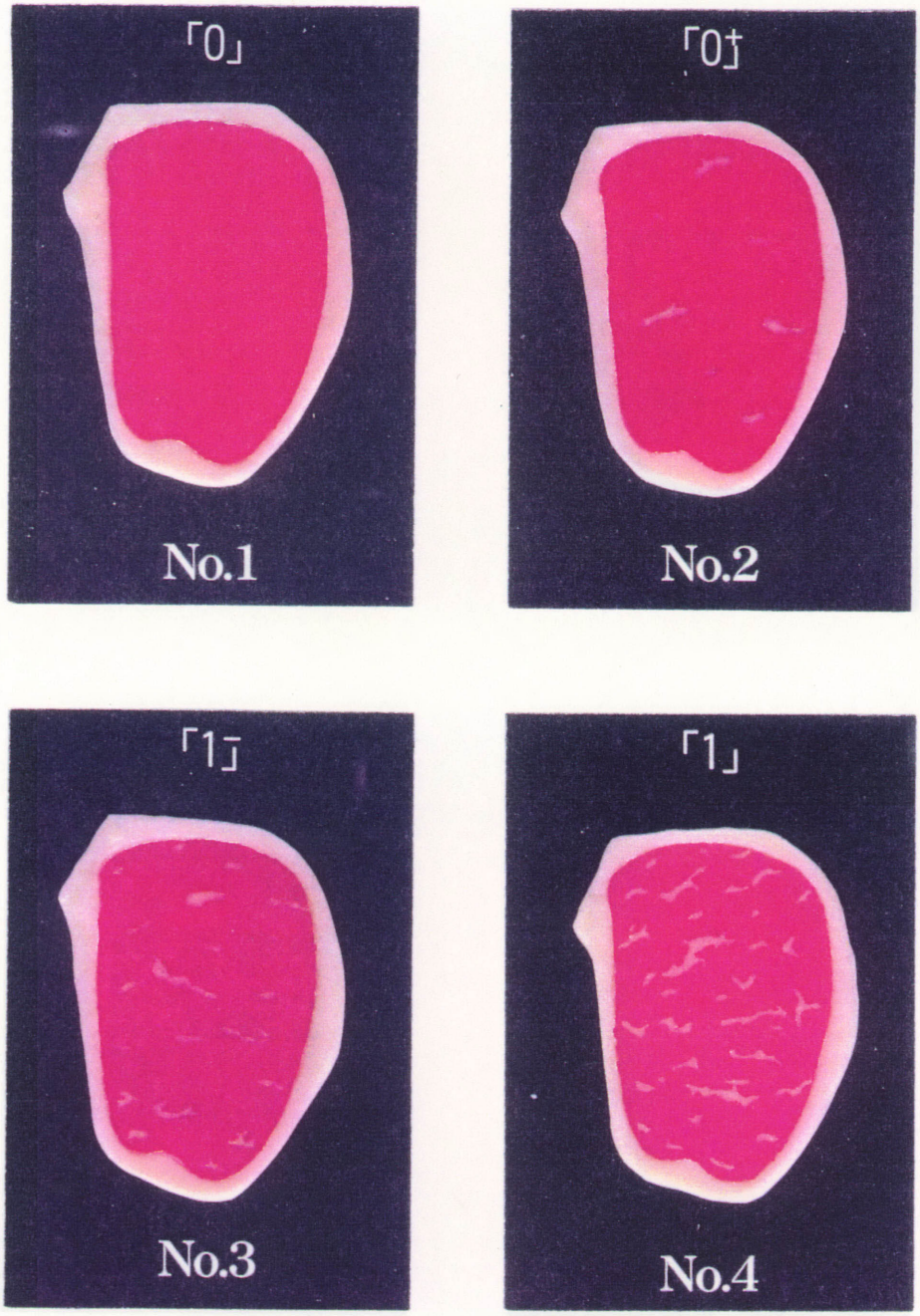


図２．１　牛脂肪交雑基準（その１）

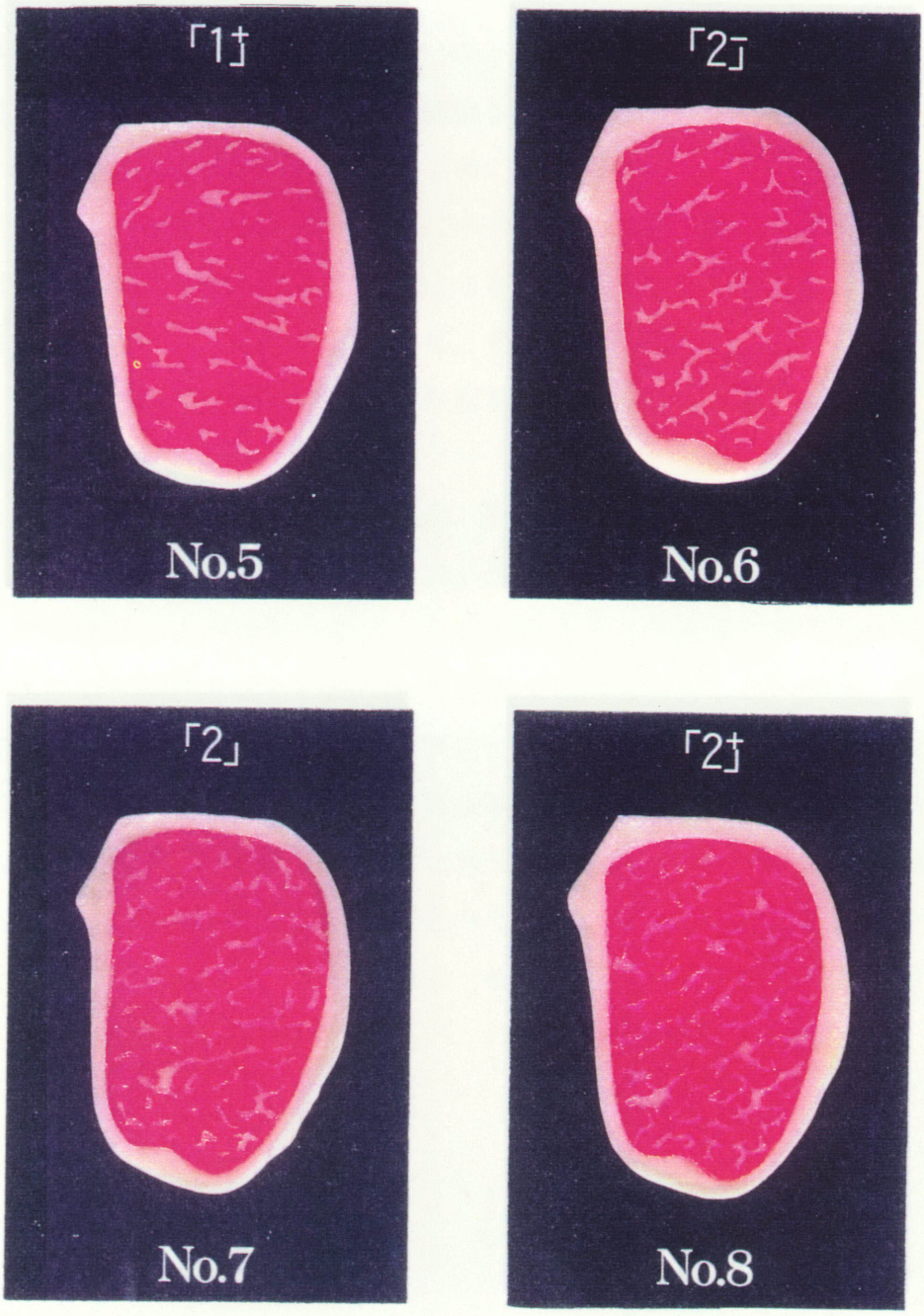


図２．１　牛脂肪交雑基準（その２）

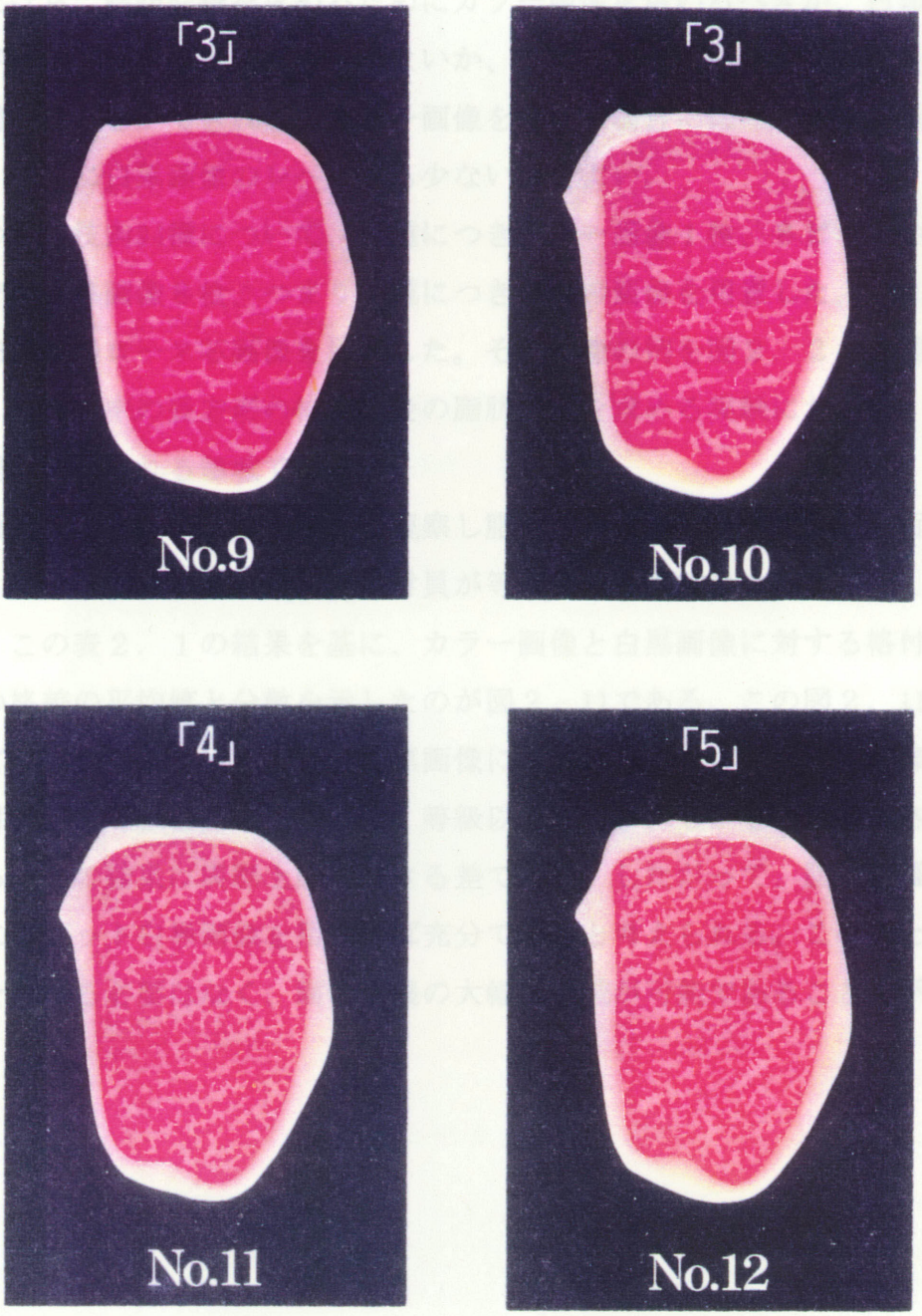


図２．１　牛脂肪交雑基準（その３）

２．３　システムに入力する肉画像の検討 [51][52]

本節では、２．２節の１゜で示した、システム入力画像の性質について検討する。すなはち、脂肪交雑を求めるためにカラー画像を用いるべきか、白黒画像を用いるべきか、画素値は何ビットでよいか、といった点について検討する。白黒画像を用いることができれば、カラー画像を用いる場合に比べてシステムは簡単になり、さらに白黒画像のレベル数も少ないほどよい。

実際の牛の枝肉34種について、１種につきカラー画像１枚、８ビットから１ビットまでの白黒画像８枚、つまり１種につき９枚の画像を用意した。つまり、34×９＝ 306枚のロース芯画像を用意した。その画像の例を図２．２から図２．10に示す。同図の中の長方形の枠は、後の脂肪交雑を求める実験において、実際に画像処理が適用される領域である。

格付員は、これら 306枚の画像を観察し脂肪交雑に基づく等級付けを行った。表２．１に 306枚の画像に対して格付員が等級付けした結果を示す。

次に、この表２．１の結果を基に、カラー画像と白黒画像に対する格付員の等級付けの格差の平均値と分散を示したのが図２．11である。この図２．11を見ると、８ビットから４ビットまでの白黒画像に対する等級付けとカラー画像に対する等級付けとの等級格差の平均値は１等級以内であり、しかも分散が小さいことがわかる。この結果は実際上許容できる差であり、したがって、脂肪交雑を求めるために４ビット白黒画像を用いれば充分であると考えられる。このことはカラー画像を用いる必要はなく、画像情報の大幅な削減が可能であることを示している。

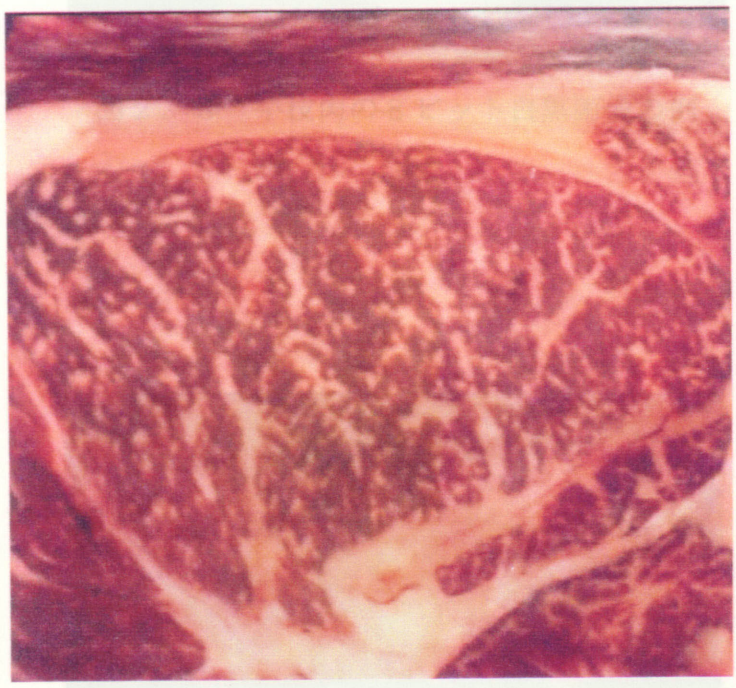


図２．２　牛枝肉のカラー画像の例

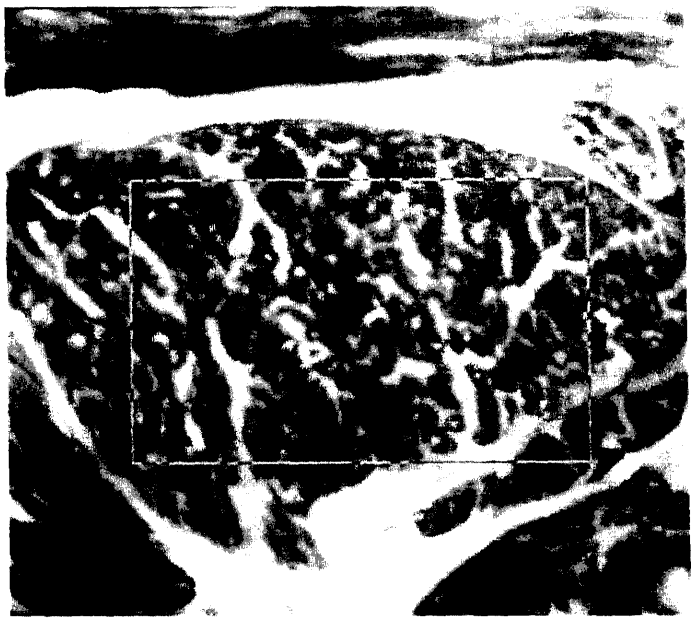


図２．３　牛枝肉の８ビット白黒画像の例

図２．４　牛枝肉の７ビット白黒画像の例

図２．５　牛枝肉の６ビット白黒画像の例

図２．６　牛枝肉の５ビット白黒画像の例

図２．７　牛枝肉の４ビット白黒画像の例

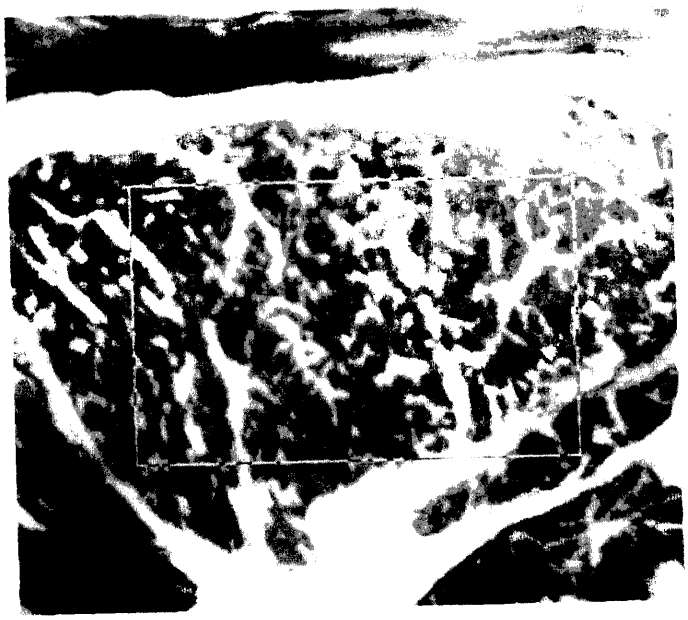


図２．８　牛枝肉の３ビット白黒画像の例

図２．９　牛枝肉の２ビット白黒画像の例

図２．10　牛枝肉の１ビット白黒画像の例

表２．１　格付員による等級付け結果（その１）

番 号	カラー画像	白黒画像（ビット）							
		8	7	6	5	4	3	2	1
1	3	4	3	3	3	4	3	4	5
2	7	7	6	6	6	6	4	6	7
3	１０	9	１０	１０	１０	9	9	9	8
4	4	5	5	4	5	5	4	4	4
5	5	6	6	6	6	6	6	7	9
6	9	9	8	8	8	9	9	7	5
7	8	7	8	8	8	8	8	7	7
8	6	6	6	6	6	7	6	4	4
9	4	4	4	4	4	5	5	8	8
１０	3	3	3	3	3	3	3	4	5
１１	8	9	9	8	9	9	8	6	5
１２	7	5	5	6	6	6	6	4	4
１３	7	6	6	6	6	5	5	4	6
１４	6	6	4	4	4	5	5	6	6
１５	7	6	7	7	7	7	7	6	5
１６	6	6	5	5	6	6	6	5	6
１７	6	7	5	6	6	7	7	7	7

表２．１　格付員による等級付け結果（その２）

番 号	カラー画像	白黒画像（ビット）							
		8	7	6	5	4	3	2	1
１８	7	8	7	8	8	8	8	6	6
１９	6	7	6	7	6	7	7	6	5
２０	8	7	8	7	7	8	6	4	4
２１	5	3	3	4	4	4	4	3	3
２２	5	4	3	3	4	4	5	3	3
２３	7	6	6	7	5	7	6	3	4
２４	5	6	5	5	5	6	7	9	3
２５	5	6	5	6	6	6	5	4	5
２６	8	7	7	7	7	7	6	7	3
２７	4	5	4	4	4	5	5	4	5
２８	9	8	7	7	7	8	7	8	4
２９	7	8	7	7	6	7	8	6	6
３０	4	5	4	4	5	4	4	3	3
３１	4	4	4	4	4	5	4	5	2
３２	5	7	6	6	6	7	5	4	4
３３	6	7	6	6	6	6	6	5	4
３４	9	8	8	8	8	8	8	8	4

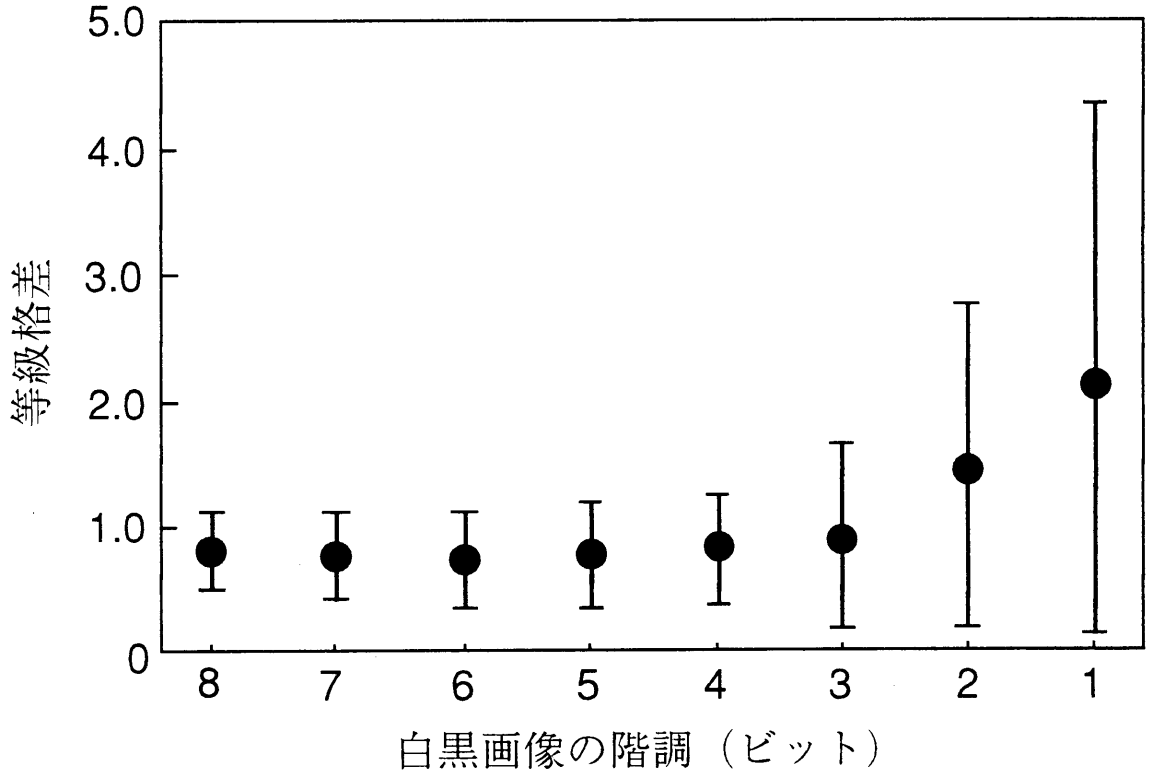


図２．11　等級付け格差

２．４　ニューラルネットワークによる肉画像の２値化処理[53][54]

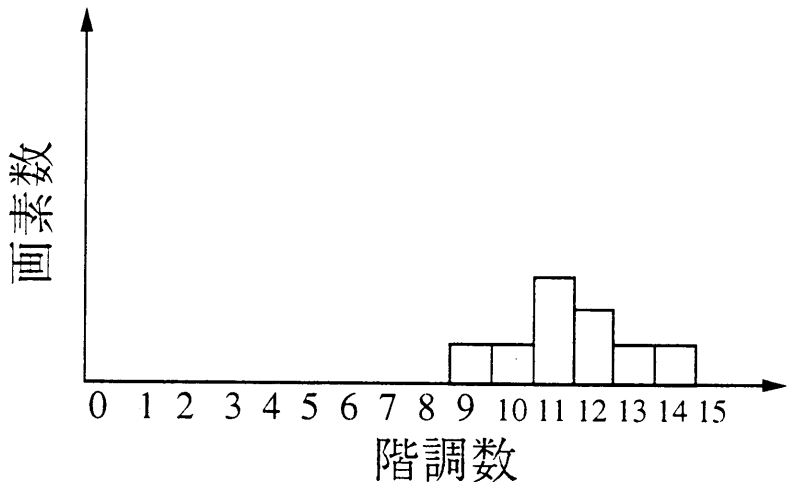
本節では、２．２節の２゜で示した、ロース芯領域を脂肪領域と筋肉領域の二つの領域に分離するという点について述べる。そのために、２．３節で述べた４ビット白黒画像において、”脂肪パターン”と”筋肉パターン”の概念を定義し、この定義に基づいて画像の２値化を行う。

”脂肪パターン”とは、ある画素が脂肪とみなされたとき、その脂肪画素とその周りの８近傍画素との輝度値から作られる輝度ヒストグラムのことを言い、使用する画像が４ビット画像だから１６次元ベクトルで表される。同様に、”筋肉パターン”とは、ある画素が筋肉とみなされたとき、その筋肉画素とその周りの８近傍画素との輝度値から作られる輝度ヒストグラムのことを言い、同じく１６次元ベクトルとなる。この”脂肪パターン”と”筋肉パターン”の典型的な例を図２．12に示す。図２．12を見れば、”脂肪パターン”と”筋肉パターン”は、４ビット画像においてそれぞれ特有な形を持っていることがわかる。

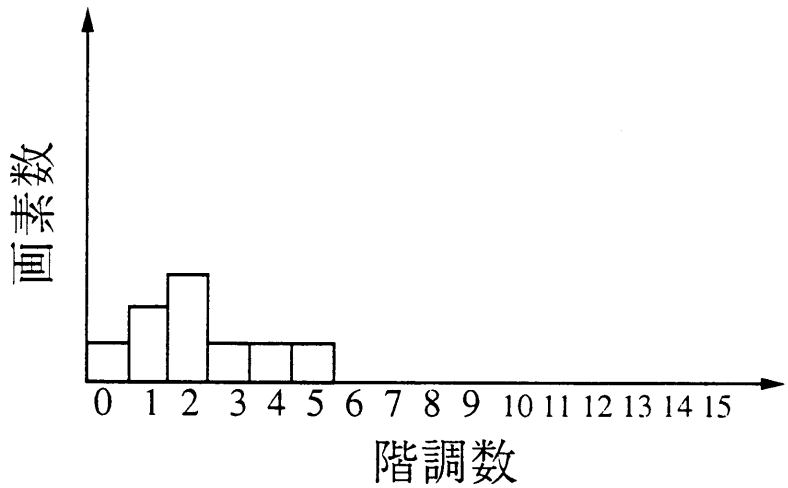
上述の”脂肪パターン”と”筋肉パターン”を利用して、ニューラルネットワーク[55]によって肉画像を２値化する方法を提案する。

まず、典型的な脂肪画素と筋肉画素を選ぶ。典型的な画素としては、格付員が４ビット白黒画像から脂肪画素100個、筋肉画素100個の合計 200個を決定した。これらの画素をもとにして、”脂肪パターン”100個、”筋肉パターン”100個を作成した。これらをニューラルネットワークへの学習データとする。

肉画像の２値化に使用するニューラルネットワークの構成を図２．13に示す。このニューラルネットワークはフィードフォワード型３層ニューラルネットワークである。入力層のニューロン数は、”脂肪パターン”と”筋肉パターン”の次元数と同じ16個、出力層のニューロン数は分別する属性の数と同じ２個、中間層のニューロン数は６個とした。このニューラルネットワークの中間層ｊと出力層ｋの入出力関係は次のようになる。



(a)脂肪パターン



(b)筋肉パターン

図２．12　脂肪パターンと筋肉パターンの例

$$y_j = f\left(\sum_i w_{ji}x_i + \theta_j\right) \qquad (2.1)$$

$$z_k = f\left(\sum_j a_{kj}y_j + \gamma_k\right) \qquad (2.2)$$

ここで、ニューロンi, j, kは、入力層、中間層、出力層のそれぞれのニューロンを表し、その出力をx_i、y_j、z_k、ニューロンi-j, j-k間の重み係数をw_{ji}、a_{kj}、ニューロンj, kのしきい値をθ_j、γ_k、ニューロン素子の入出力関数には、次式のようなシグモイド関数を用いた。

$$f(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)} \qquad (2.3)$$

学習には、バックプロパゲーション（誤差逆伝搬）法[56]を用い、学習過程におけるネットワークの評価関数Eを、

$$E = \sum E_p = \sum_p \sum_k (t_{pk} - z_{pk})^2 \qquad (2.4)$$

と定義する。ここで、t_{pk}は入力信号pにおけるニューロンkの教師信号である。学習では、この評価関数Eが小さな値になるように各ニューロン素子における重みおよびしきい値を更新していき、Eがある一定の値以下になったとき、学習を停止させた。

上で得られた重みとしきい値を固定して、このニューラルネットワークを実際の肉画像の２値化に用いる。２値化処理は、図２．７に示した４ビット白黒画像の長方形の枠内（縦212画素×横340画素）について行う。２．３節で示した34種の肉画像に対して本手法により２値化処理を行った。図２．14は、図２．７で示した４ビット白黒画像を２値化した結果である。白い部分が脂肪領域である。図２．７と比較すると、適切に脂肪領域とその他の領域に分けられているのがわかる。この結果は、提案する方法が肉画像の２値化に有効であることを示している。

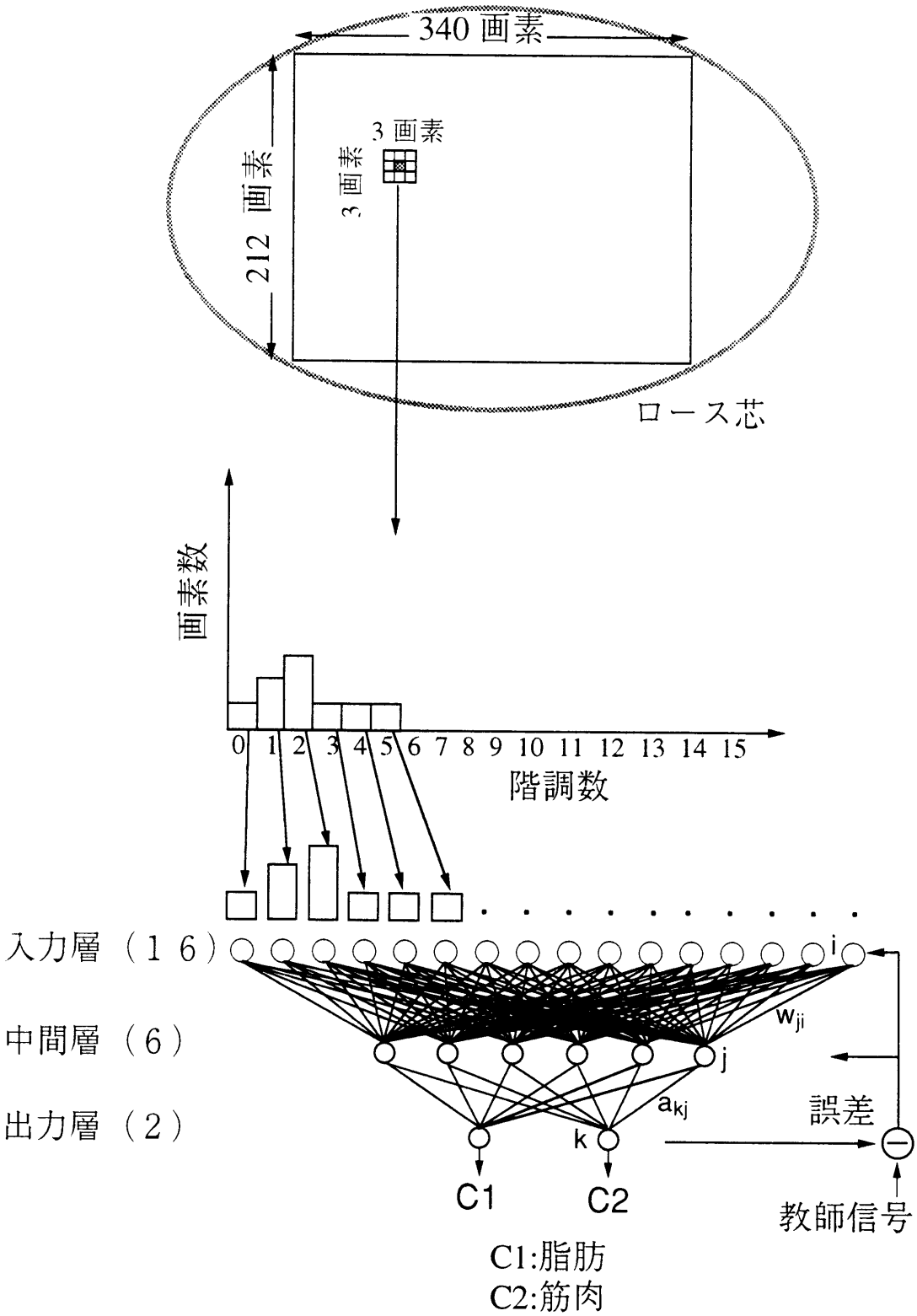


図２．13　ニューラルネットワークの構成

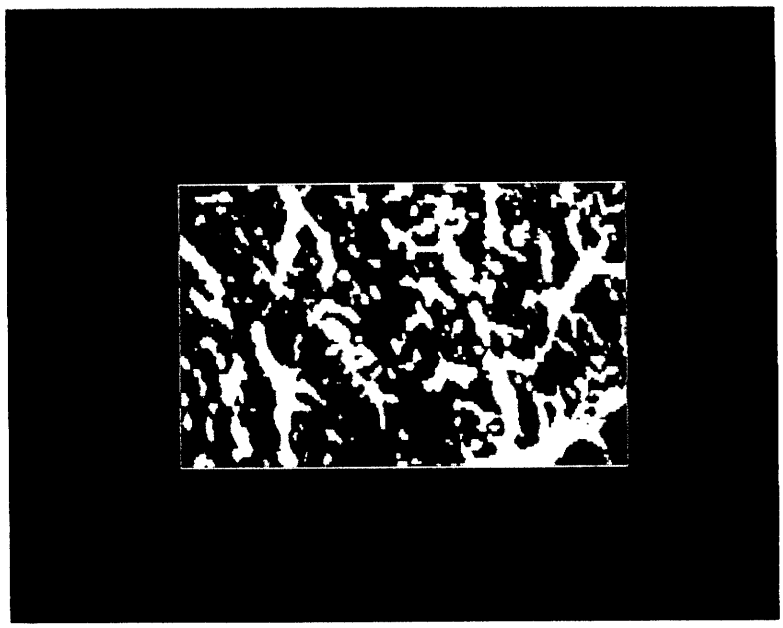


図２．14　ニューラルネットワークにより得られた２値画像

２．５　重回帰分析による等級判別基準の検討 [57]

本節では、２．２節の３゜で示した５つの変量を計算し、重回帰分析[58]を用いて等級判別のための重回帰式を求める。

２．５．１　重回帰分析

多変量解析は、収集されたデータをもとに絡みあった要因を解きほぐし、要因相互の関係を明確にするための手法である。多変量解析の一つである重回帰分析は、明らかにしたい事柄（目的変量）と、他の数多くの事柄（説明変量）との関係を調べ、目的変量に強い影響を及ぼしている説明変量を発見し、目的変量と説明変量との間に関係式（重回帰式）を作成し、この関係式をもとに分析を行う方法である。

２．５．２　５つの変量

前述した34種の枝肉の２値画像において面積率（x_1）、「さし」の個数（x_2）、「大さし」の個数（x_3）、「小さし」の個数（x_4）、「さし」の分布の偏り程度（x_5）の５つの変量を求める。ここで、各変量を定義する。面積率は、２値画像の全体面積に対する脂肪領域の面積割合とする。「さし」については、格付員の経験に基づき画像上の雑音等を考慮して25画素以上の脂肪領域を対象とする。1250画素以上を「大さし」、1250画素未満を「小さし」とし、「さし」の個数、「大さし」の個数、「小さし」の個数をそれぞれ数える。「さし」の分布の偏り程度は、画像上に設定した長方形の枠内を十字型に４分割し、各領域間の脂肪面積の分散値として求める。

前述した34種の肉画像に対して５つの変量を求めた結果を表２．２に示す。表２．２の等級の値は、格付員による等級付け結果を示している。

表２．２　34種の肉画像の５つの変量値

番号	等級	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	3	0.227	40	4	36	2677
2	7	0.335	48	5	43	3029
3	10	0.488	25	7	18	10686
4	4	0.248	38	2	36	774
5	5	0.318	34	5	29	516
6	9	0.428	47	7	40	9906
7	8	0.408	44	5	39	2972
8	6	0.305	42	5	37	1196
9	4	0.268	55	3	52	4484
10	3	0.187	36	3	33	920
11	8	0.387	39	6	33	3782
12	7	0.353	57	4	53	814
13	7	0.369	54	4	50	821
14	6	0.287	41	4	37	3310
15	7	0.341	43	5	38	4494
16	6	0.320	40	3	37	1944
17	6	0.314	41	5	36	6100
18	7	0.372	42	6	36	3142
19	6	0.316	51	4	47	2357
20	8	0.368	42	6	36	901
21	5	0.263	57	3	54	1468
22	5	0.265	49	5	44	1593
23	7	0.373	45	7	38	3174
24	5	0.262	42	4	38	2444
25	5	0.294	62	5	57	739
26	8	0.382	46	7	39	1158
27	4	0.230	55	5	50	1438
28	9	0.392	49	7	42	7388
29	7	0.377	43	5	38	502
30	4	0.226	27	5	22	2404
31	4	0.253	40	4	36	2484
32	5	0.292	37	4	33	7375
33	6	0.302	43	4	39	493
34	9	0.397	48	8	40	1763

２．５．３　各変量間の相関係数と重回帰式の導出

表２．２で示した各変量の結果に対して、各変量間および各変量と格付員による等級付け結果との相関係数を求めた。その結果を表２．３に示す。表２．３から、等級と面積率、等級と「大さし」の個数の相関が強いことがわかる。また、面積率と「大さし」の個数、「さし」の個数と「小さし」の個数との相関も強い。

したがって、表２．３の結果より面積率（x_1）と「大さし」の個数（x_3）が目的変量の等級に強い影響を及ぼすと判断される。

重回帰分析では、一般に説明変量には目的変量との相関係数が0.7以上のものを用いる方がよいとされている。そこで、相関係数が0.7以上である面積率（x_1）と「大さし」の個数（x_3）を説明変量として、目的変量の等級を求める重回帰式を次のように定義する。

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_3 \qquad (2.5)$$

a_0は定数項、a_1、a_2は説明変量x_1、x_3の係数である。表２．２のデータを用いて重回帰分析によりa_0、a_1、a_2の値を求めたところ、次のような値となった。

$$\begin{aligned} a_0 &= -2.162 \\ a_1 &= 23.288 \\ a_2 &= 0.172 \end{aligned} \qquad (2.6)$$

２．５．４　分析精度の評価

得られた重回帰式による新しいサンプルの等級付けを正しく評価するために決定係数の検定を行う。

はじめに決定係数を求める。統計学では、目的変量ｙの回帰平方和S_R、残差平方和S_Eより決定係数R^2は$R^2=1-S_E/(S_R+S_E)$で求められる。これより式(２．５)において、係数a_0、a_1、a_2を求めたときの決定係数は0.93であった。一般に決定係数が0.8以上の場合、分析の精度が非常に良いとされている。

そこで、この決定係数を検定する。統計学では、S_R、S_Eの不偏分散を$V_R=S_R/$

p、$V_E = S_E / (n-p-1)$（nはサンプル数、pは変量の数）としたとき、$F_R = V_R / V_E$がある決められた基準値より大きいとき、決定係数は有意と判断され、分析の精度が良いと評価できる。そこで、F_Rを求めたところ217となり、基準値5.36（有意水準α=0.01におけるＦ分布のF(2,31,0.01)の値［58］）より大きい値を示したため、得られた決定係数は有意であり、すなわち分析の精度は良いという結論を得る。

表２．３　変量間の相関係数

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	等級
X_1	1.000	-0.028	0.716	-0.149	0.452	0.961
X_2	-0.028	1.000	-0.072	0.985	-0.279	0.004
X_3	0.716	-0.072	1.000	-0.240	0.385	0.753
X_4	-0.149	0.985	-0.240	1.000	-0.337	-0.124
X_5	0.452	-0.279	0.385	-0.337	1.000	0.434
等級	0.961	0.004	0.753	-0.124	0.434	1.000

２．６　等級付け実験

前述の重回帰式を用いて新しいサンプルの等級付けを試みる。新しく肉画像を10種用意し、これまでと同じ手順により面積率（x_1）、「大さし」の個数（x_3）を求め重回帰式より等級を求めた。その結果を表２．４に示す。ｙ値は重回帰式を用いて求めた等級であり、等級の値は格付員が決定した等級である。10種の肉画像すべてについて、重回帰式より求めた等級が格付員の等級付け結果とよく一致しているのがわかる。

表２．４　等級付け結果

番号	x_1	x_3	y	等 級
35	0.380	7	7.893	8
36	0.331	5	6.407	6
37	0.262	3	4.456	4
38	0.353	5	6.919	7
39	0.256	3	4.316	4
40	0.355	6	7.138	7
41	0.233	3	3.780	3
42	0.398	8	8.484	9
43	0.305	4	5.629	6
44	0.211	3	3.268	3

２．７　むすび

牛枝肉画像を観察し、その肉質等級を決定するシステムを提案した。このシステムでは、牛枝肉の等級付けで最も重要な要因である脂肪交雑を用いた。

まず、格付員への聞き取り調査を行い、格付員が等級付けに用いている物理量を明らかにし、システム化の手順を示した。

システム化を安価に構築するためには、白黒画像を用いる方がよいので、同一の枝肉に対してカラー画像と８種類の異なったビット数の白黒画像を用意し、格付員による等級付け実験を行なった。その結果、４ビットの白黒画像を用いれば充分であることを示した。

システム化のために、脂肪領域に対していくつかの物理量を計測する必要があった。そのために４ビット白黒画像は脂肪領域を抽出するという目的のために２値化する必要があった。そこで、”脂肪パターン”、”筋肉パターン”の概念を定義し、これに基づいて３層ニューラルネットワークを学習させ、牛枝肉の４ビット白黒画像を２値化する方法を提案した。提案した方法を用いることにより適切に肉画像を２値化できることを確認した。

次に、２値化した画像から５つの変量を求め、等級との相関を調べた。その結果、面積率と「大さし」の個数の２つの変量が等級と相関が強いことが判明したので、等級を目的変量、２つの変量を説明変量として重回帰式を作った。重回帰式を用いて未知のサンプルの等級付けを行った結果、格付員のものとよく一致することを示した。

第３章

テクスチャ解析による肉質の格付け

３．１　まえがき

２章では、格付員の経験やノウハウを生かして、牛枝肉質の等級付けをシステム化するための方法について述べた。２章で述べた格付員からの聴取結果によると、牛枝肉のロース芯部分に現れている脂肪領域と筋肉領域の濃度パターンのきめの細かさや、繰り返しの状態が、等級判定に強く影響していることが判明した。これは、牛枝肉の脂肪交雑をテクスチャパターンとして捉え、テクスチャ特徴を格付員は直観的に求めていると考えることもできる。したがって、実際の肉画像を処理して、適切なテクスチャ特徴を求めることができれば、格付員と同等の能力を持つシステムが開発できる可能性がある。

テクスチャは、画像における領域や物体等の識別のための重要な手がかりとして、これまでにも多くの研究[59][60][61][62]がなされ、その特徴記述法も数多く報告されている[63][64][65][66]。

本章では、牛枝肉画像を用いて脂肪交雑の等級付けを行うのにテクスチャ特徴が有効であることを示し、テクスチャ解析を用いて等級付けを実現する方法について述べる。

テクスチャ特徴としては、Haralick等［67］が提案した濃度共起行列を用い、この方法によって求められる等級が格付員のものとよく一致することを示す。

３．２　テクスチャ特徴

本節では、肉画像に対するテクスチャ特徴の抽出について述べる。テクスチャ解析の研究の代表的なものに、Haralickら[67]による研究がある。そこでは、テクスチャ画像に対して、２次統計量の一つである濃度共起行列と呼ばれる行列を求め、これをもとにテクスチャの性質を表すと考えられる14種類の特徴量の提案と抽出法が示されている。これに対して、瀧山[68]や梅田[69]の研究では、濃度共起行列の要素値自体を用いてテクスチャ画像を識別している。本章では、後者による特徴を用いて等級付けを行う。

３．２．１　濃度共起行列による特徴[70]

Haralick等が提案した濃度共起行列Ｐ(i, j:d, θ)とは、図３．１に示すように、テクスチャ画像 f(x, y)においてある特定の相対的な位置関係 (d, θ)にある画素対(x_1, y_1)と (x_2, y_2)において、その濃度対が$f(x_1, y_1)=i$ 、$f(x_2, y_2)=j$になる頻度を表したものである。ここで相対的な位置関係のパラメータとして、ｄは着目する画素対間の距離であり、θ はその画素対を結ぶ線分の方向を示す。本論文ではｄを次式で定義する。

$$d = \max(\,|x_1 - x_2|\,,\,|y_1 - y_2|\,) \tag{3.1}$$

予備的な実験から、本論文ではｄ＝１とし、 θ は、 0°、45°、90°、135°の４方向とする[71]。階調数がｇである画像に対しては、１方向についてｇ×ｇの大きさを持つ濃度共起行列Ｐ(i, j:1, θ)が１つできる。
４方向の濃度共起行列の要素を次のように足し合わせ１つの行列とする。

$$P(i,j) = \sum_{\theta=0,45,90,135} P(i,j : 1,\theta)\ ,\ i\ ,\ j = 1,2,\cdots,g \tag{3.2}$$

さらに、P(i, j)の要素を大きさに対して正規化し、行列

$$p(i,j) = \frac{P(i,j)}{\sum_{i=1}^{g}\sum_{j=1}^{g} P(i,j)} \qquad (3.\ 3)$$

を得る。このp(i, j)はg×g行列であるから、g^2個の数値の組とみなすことができる。これをg^2次元のベクトルと考えて画像のテクスチャ特徴とする。

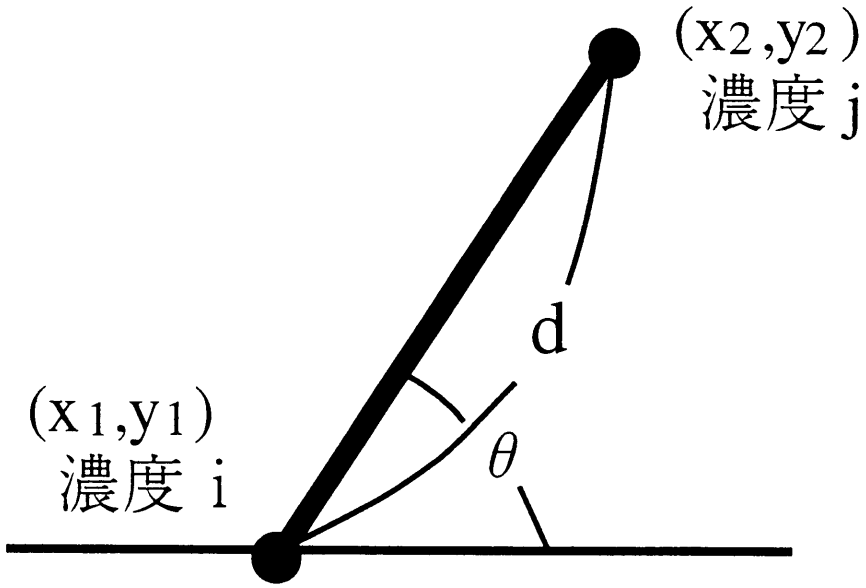


図3. 1　変位

３．２．２　標準テクスチャ特徴ベクトル[70]

２章では、格付員は４ビット（16階調）の白黒画像が与えられれば、その肉の等級付けをほぼ正確に行えることを示した。本論文でもこのことを用いる。すなわちｇ＝16とする。したがって、濃度共起行列は16×16のサイズを持つから、これをスタッキング表現してテクスチャ特徴を16×16＝256次元ベクトルとみなす。つまり行列の要素を辞書的に並べ、（ｉ，ｊ）≡（１，１）をベクトルの第１番目の要素、（１，２）を第２番目とし、以下（16，16）を第256番目の要素としている。図３．２に16階調の肉画像の一例を示す。図３．２の長方形の領域が処理対象である。この領域は縦212画素、横340画素から成り、この領域の大きさの設定は格付員が行った。この大きさの画像であれば肉質の判定に十分であることが格付員によって確かめられている。

標準テクスチャ特徴ベクトルを次のようにして定める。３等級から10等級までの肉画像をそれぞれ10種、つまり合計80種を用意する。このサイズは前述の212×340で、レベル数は16である。肉画像は、異なった時期に異なったカメラで収集したものであるため、どの画像の濃度分布もある一定の平均値と標準偏差とを持つように濃度変換を行った。

この変換後の80種の肉画像に対して濃度共起行列に基づくテクスチャ特徴を求める。各等級（10種）ごとにテクスチャ特徴ベクトルの平均ベクトルを求め、これを各等級の標準テクスチャ特徴ベクトルとする。これら８種のベクトルを記憶しておき、等級が未知である入力画像のテクスチャ特徴とそれぞれ比較することによって、入力画像の等級の判定を行う。

図３．３から図３．10には、等級３から等級10までの標準テクスチャ特徴ベクトルを示す。同図を見ると、等級が低い場合には要素番号が128よりも小さい番号において度数が最も大きくなっているが、等級が高くなると、その要素番号における度数は小さくなり、128よりも大きい要素番号において度数が大きくなる傾向が見られる。このことは、等級が低い場合には濃度値の低い画素同士の組合せ数が多く、等級が高くなるにつれて濃度値の高い画素同士の組合せ数が多くなることを示している。つまり、等級が低い場合は筋肉画素が多く、等級が高くなると脂肪画素が多くなることを示していると考えられる。

図３．２　１６階調の牛枝肉白黒画像の例

（図２．７の再掲）

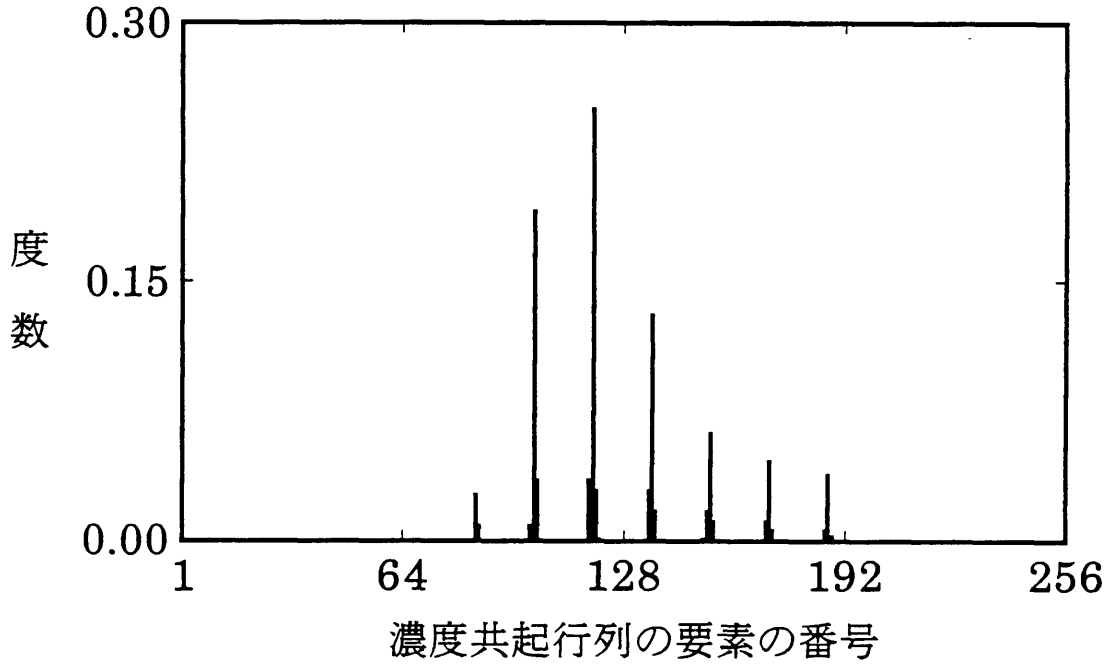


図３．３　等級３の標準テクスチャ特徴ベクトル

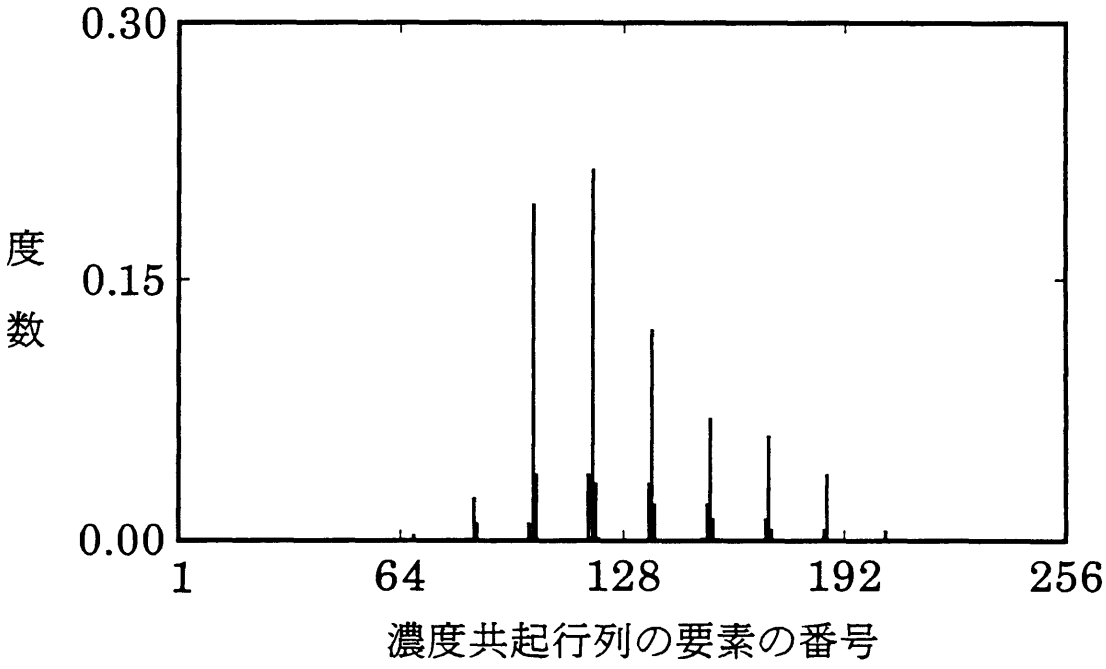


図３．４　等級４の標準テクスチャ特徴ベクトル

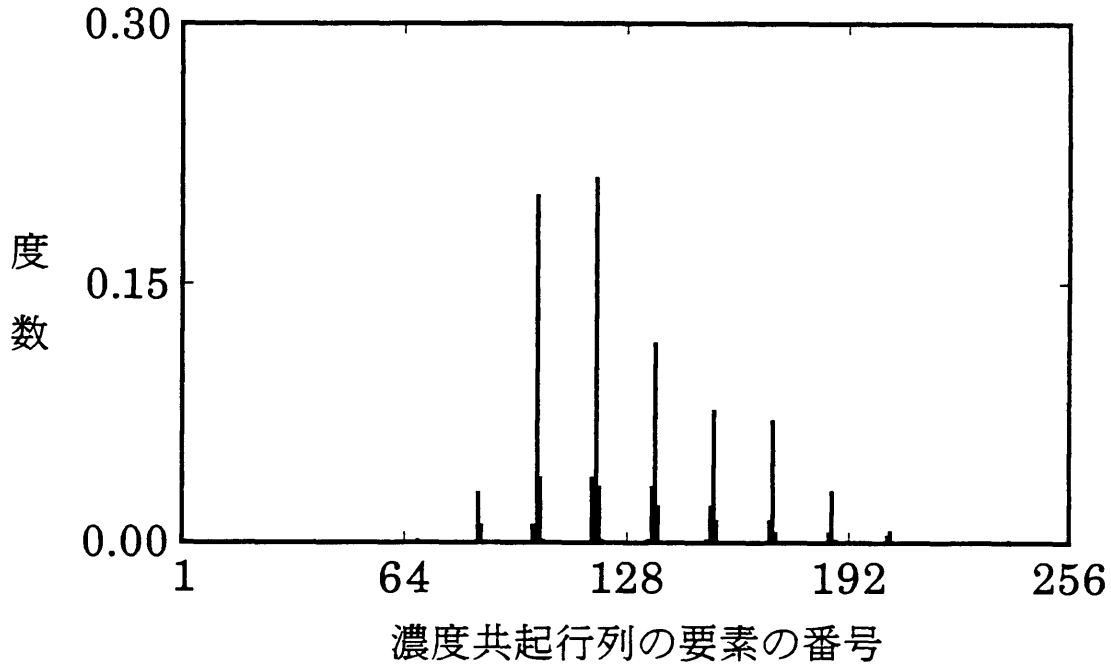


図３．５　等級５の標準テクスチャ特徴ベクトル

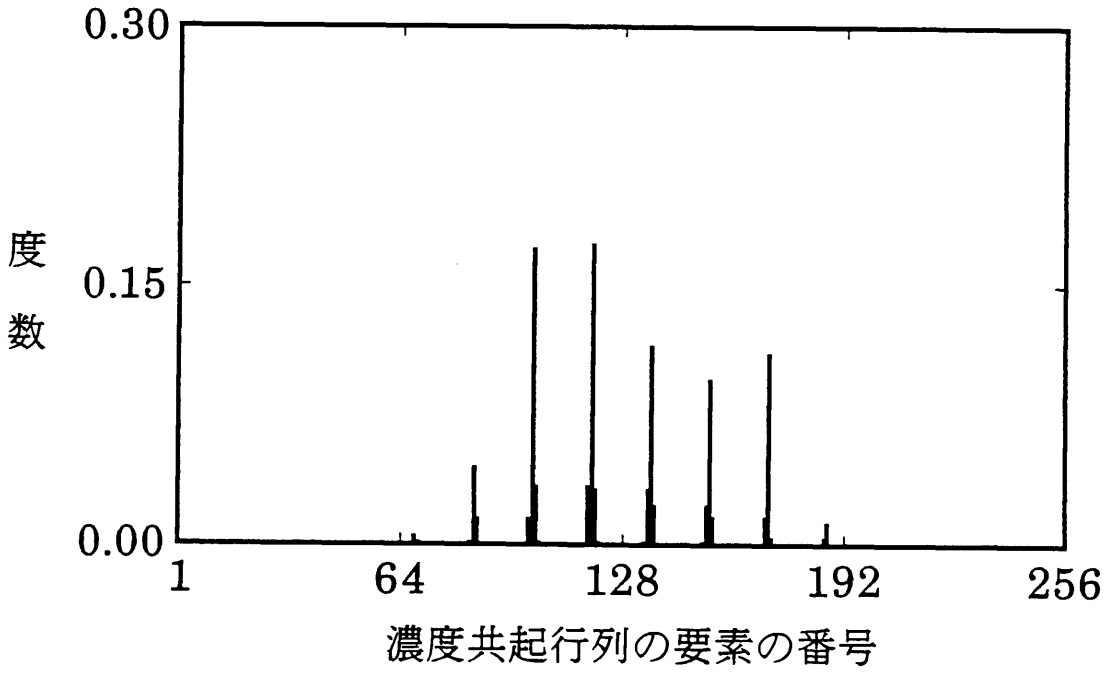


図３．６　等級６の標準テクスチャ特徴ベクトル

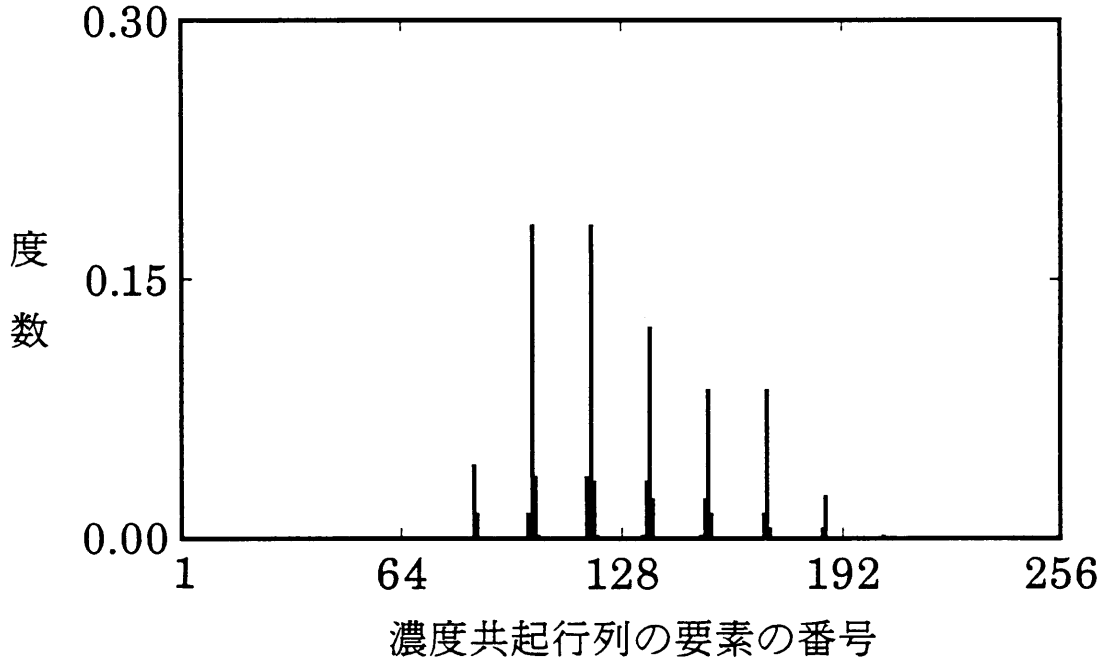


図３．７　等級７の標準テクスチャ特徴ベクトル

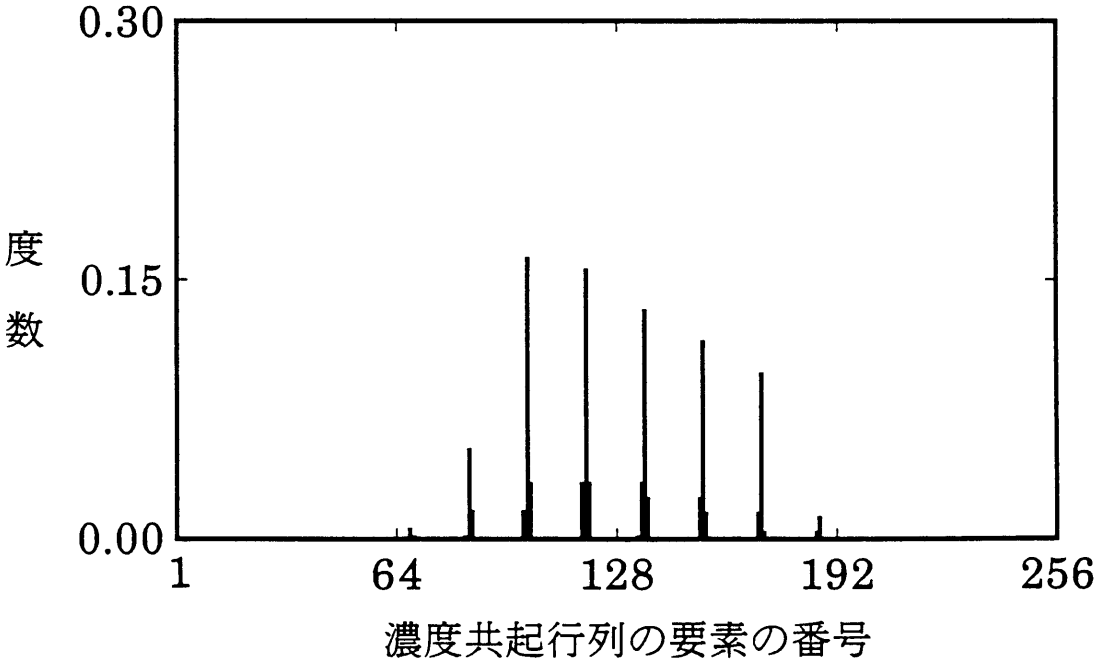


図３．８　等級８の標準テクスチャ特徴ベクトル

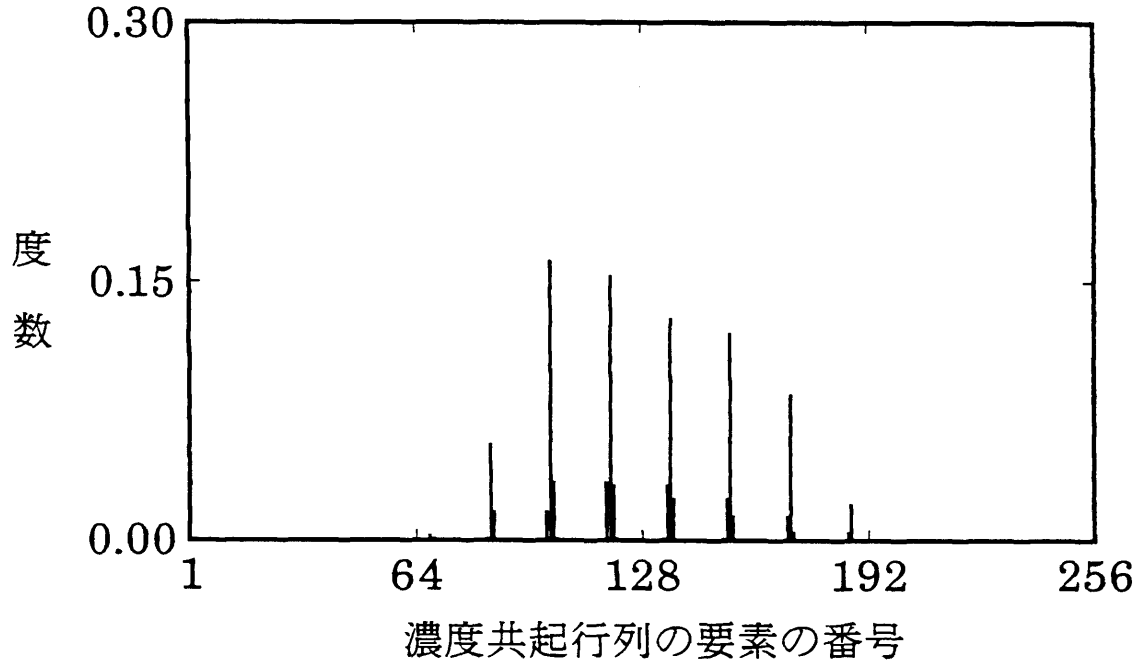


図３．９　等級９の標準テクスチャ特徴ベクトル

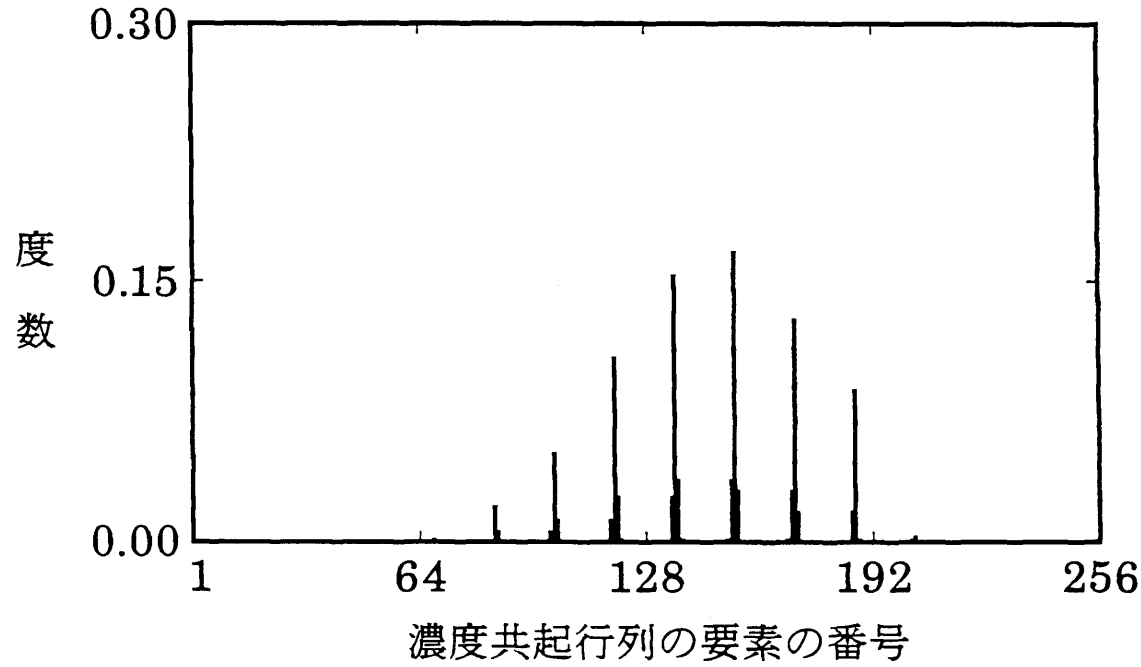


図３．10　等級10の標準テクスチャ特徴ベクトル

３．３　等級付け実験

前述した等級ごとの256次元の標準テクスチャ特徴ベクトルをy_i、ｉ＝３，・・10（ｉは等級名と一致）とし、入力される肉画像のテクスチャ特徴ベクトルをxとする。xとy_iの類似度S_iを

$$S_i = \frac{(x \cdot y_i)}{|x||y_i|} \qquad i = 3, \cdots, 10 \tag{3.4}$$

で測ることにする。

この類似度を用いて未知の20種の肉画像の等級付けを行った。これら20種の未知入力のテクスチャ特徴を求め、各等級の標準テクスチャ特徴ベクトルとの類似度を調べた。最も高い類似度を示した等級値をその入力の等級とした。20種の入力に対する等級付けの結果を表３．１に示す。20種の入力のなかで15種について等級が一致した。等級が一致しない場合も、その等級ずれは最大１であった。求められた等級が格付員の結果とよく一致していることがわかる。このことから、提案する方法は牛枝肉の等級判定に有効であるといえる。本論文では、３等級から10等級までの画像を用いて実験を行った。提案する方法による等級判定の精度を高め実用化するためには、等級を拡大しサンプル数を増やす必要がある。表３．２には、例として番号１の入力と各等級との類似度を示す。この表３．２によると、格付員の判断した等級値に近いほど類似度は高い値を示していることがわかる。このことから、本システムは格付員の判断する等級と大きく異なる結果を出す可能性は少ないと思われる。

表３．１　等級付け結果

番　号	格付員	本手法
1	4	4
2	6	5
3	3	3
4	7	7
5	8	8
6	6	6
7	9	8
8	7	6
9	8	8
１０	9	9
１１	3	3
１２	4	4
１３	6	6
１４	5	5
１５	6	5
１６	7	7
１７	8	7
１８	7	7
１９	9	9
２０	8	8

表３．２　サンプル番号１の各等級の類似度

等　級	類似度
３	０．９１５
４	０．９８３
５	０．９２３
６	０．８９１
７	０．８８２
８	０．８０５
９	０．７３６
１０	０．７０１

３．４　むすび

牛枝肉の等級付けで最も重要な要因である脂肪交雑をテクスチャパターンとして捉え、テクスチャ解析を用いて等級付けを行う方法を提案した。テクスチャ特徴としては濃度共起行列を用い、実験によりその有効性を示した。テクスチャ解析はこれまで種々の画像に対して応用されてきたが、肉画像の等級判定はテクスチャ解析の好適用例の一つであると言えよう。

第４章

陶磁器の３次元形状計測システムの開発

４．１　まえがき

序論で述べたように、陶磁器製造における自動化技術の開発は急務となっている。図４．１に陶磁器の製造工程［72］を示しているが、陶磁器への絵付け作業や線描き作業の自動化技術が特に要望されている。陶磁器に対する自動的な描画の試みの一つに、森田らの研究[33]がある。この研究では、複数個の光学式距離センサを用いて、陶磁器曲面と描画ペン先との距離を一定に保ち、このことを利用して描画ペンの先端を陶磁器曲面に接触させ、接触した状態で描画ペンが動くことにより、陶磁器に描画しようとしている。この方法では、壷形状の凸部に対しては描画可能であるが、凹部については、光学式距離センサを用いて陶磁器曲面と描画ペンとの距離を一定に保つことができず、描画動作が不安定となる欠点がある。森田らの研究では、壺形状の陶磁器のみを対象としており、皿のような平板な形状に対しての描画は考慮されていない。しかしながら、前述の自動化技術の発展のためには、さまざまな形状の陶磁器に対して描画できるシステムを開発する必要がある。

第５章では、ＣＡＤから出力されるＮＣデータを利用して、陶磁器に描画を実現する方法について述べる。ＣＡＤから出力されるＮＣデータは、通常はＮＣ加

工機を用いて立体状の材料から３次元形状の部品を製作するために用いられる[49]。ＮＣ加工機上の加工具はＮＣデータに基づいて３次元的な動きをするので、加工具を描画ペンに置き換えれば、３次元的な描画ができる可能性がある。陶磁器に描画するためのＮＣデータをＣＡＤで作成するためには、あらかじめＣＡＤに対して陶磁器形状に関するデータと描画するデザインを入力する必要がある。描画デザインは、ＣＡＤの標準的な入力機器であるタブレットを用いて入力することができる。一方、陶磁器形状に関するデータは、三次元の情報が必要であり、三次元の計測装置を用いて陶磁器を計測し、その計測データをＣＡＤへ入力する必要がある。陶磁器形状は様々であり、一般に、容易に陶磁器を３次元的に計測できる装置がない。このため、任意の形状を持つ陶磁器を３次元計測できるシステムの開発が必要である。

序論で述べたように、物の形を３次元的に計測する方法の一つとして、スリット光投影法（光切断法）［44］がある。この方法は、スリット状の光を対象物に照射し、対象物の形状に応じたスリット光の変化を受光素子で捉え、その光の位置変化から対象物の形状を求めようとするものである。この方法の原理は簡単なものであるので、これに基づく計測システムは、機器の構成も簡単で、機器コストも低く現場向きの方法と言える。スリット光投影法を用いてさまざまな形状を持つ陶磁器を計測するためには、計測したい部分、つまり描画したい部分にスリット光を当て、スリット光の位置変化を調べなければならない。そのためには、陶磁器の形状に応じて、陶磁器を回転又は移動させる必要がある。スリット光投影法では、スリット光の位置から陶磁器の３次元座標値を求めなければならない。ＣＡＤ上で陶磁器形状を正確に復元するためには、多数の点の座標値が必要である。すなわち、実用的な時間内で多数の点の３次元座標値を計算する必要がある。一方、壺形状や皿形状の凹部をスリット光投影法で計測する場合、スリット光の位置が見えなくなる、いわゆる”死角”が発生することがあり、この死角に対処する方法も考慮することは重要である。

本章では、スリット光投影法を用いてさまざまな形状の陶磁器を計測するシステムを提案する。この計測システムでは、実用的な時間で三次元座標値を求める方法や死角が発生した場合の対処法について検討している。

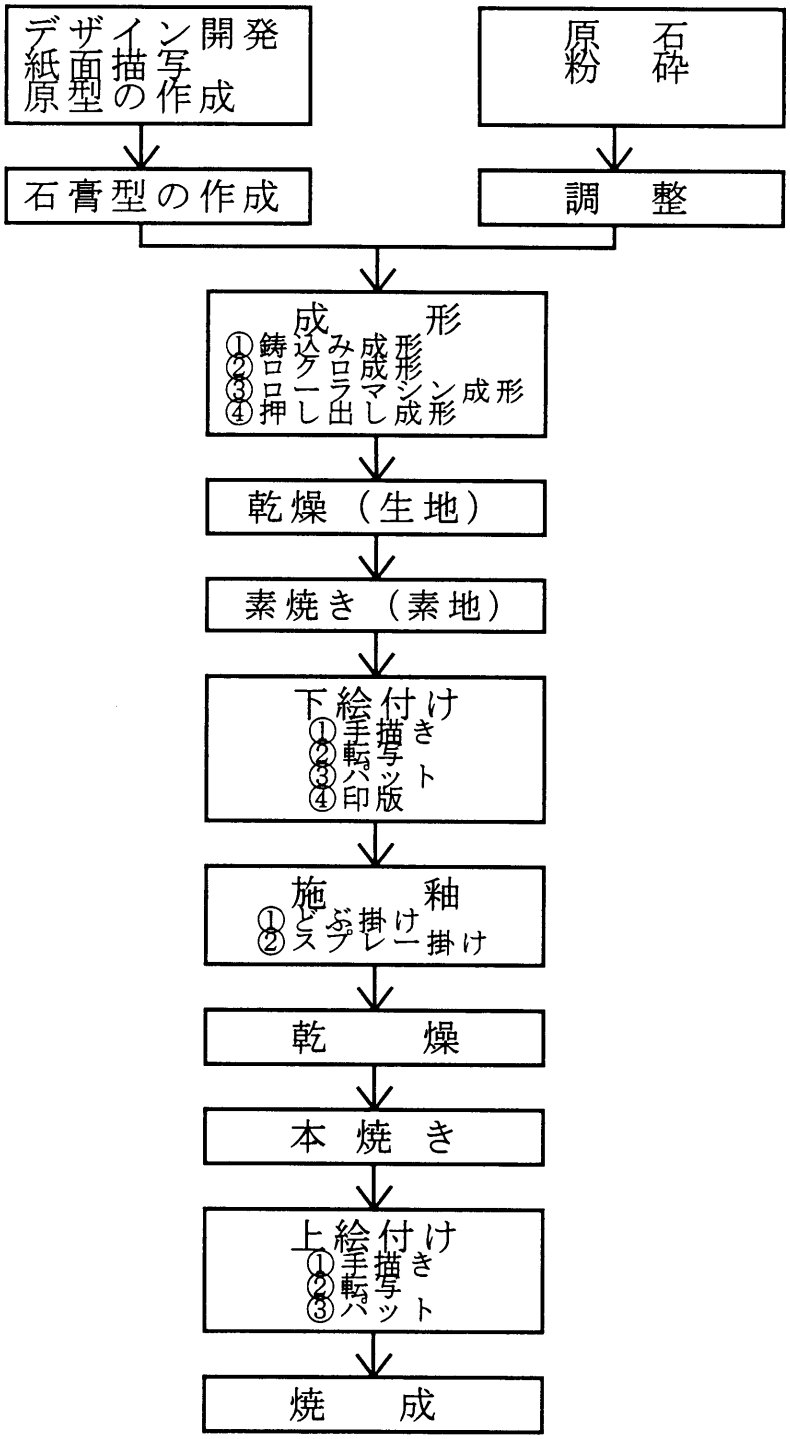


図４．１　陶磁器の製造工程

４．２　３次元形状計測システムの原理と構成 [73][74]

４．２．１　システム構成と計測原理

陶磁器には、さまざまな形状があるので、ただ一つの計測システムで陶磁器を計測することは困難であり、逆に陶磁器の形状に応じて多くの種類の計測システムを作ることはコスト高となる。もし陶磁器の形状をいくつかのタイプに分類することができれば、タイプ毎に計測システムを作ればよく、効率的に陶磁器を計測できる。そこで、陶磁器の形状について調査を行った。その結果、陶磁器の形状は二つのタイプに大別できることが判明した。一つは、花瓶、壷のような回転体タイプであり、もう一つは皿、陶板のような平板タイプである。つまり、回転体タイプ、平板タイプ、それぞれの陶磁器のタイプを計測するシステムを一つずつ作ればよいことになる。そこで、図４．２と図４．３に示すように、回転体タイプ用（以下回転系と呼ぶ）、平板タイプ用（以下平板系と呼ぶ）の計測システムを開発した。

回転系のシステムは、測定物を回転させるための回転テーブル、スリット光を照射するためのレーザ投光器、測定物に照射したスリット光の散乱光を撮像するための二台のカメラ、カメラの出力信号をデジタル化し画像信号に変換し記憶するための画像メモリ、画像信号からスリット散乱光の中心位置を検出し、その位置より三次元座標値を演算し、かつ回転テーブルの回転角や全体の系を制御するためのパーソナルコンピュータ（以下パソコンと呼ぶ）から構成されている。

平板系のシステムは、スリット光を照射するためのレーザ投光器、レーザ投光器の位置を移動するためのＸＹテーブル、以下回転系と同様に二台のカメラ、画像メモリ、数値演算、ＸＹテーブルの移動量や全体の系を制御するためのパソコンから構成されている。

次に、二つの計測システムの計測原理について述べる。回転系では、測定物を回転テーブル上に置き、スリット光を回転テーブルの回転軸に重ね合わせて照射し、回転テーブルを一回転させながら全体形状を計測する。平板系では、ＸＹテ

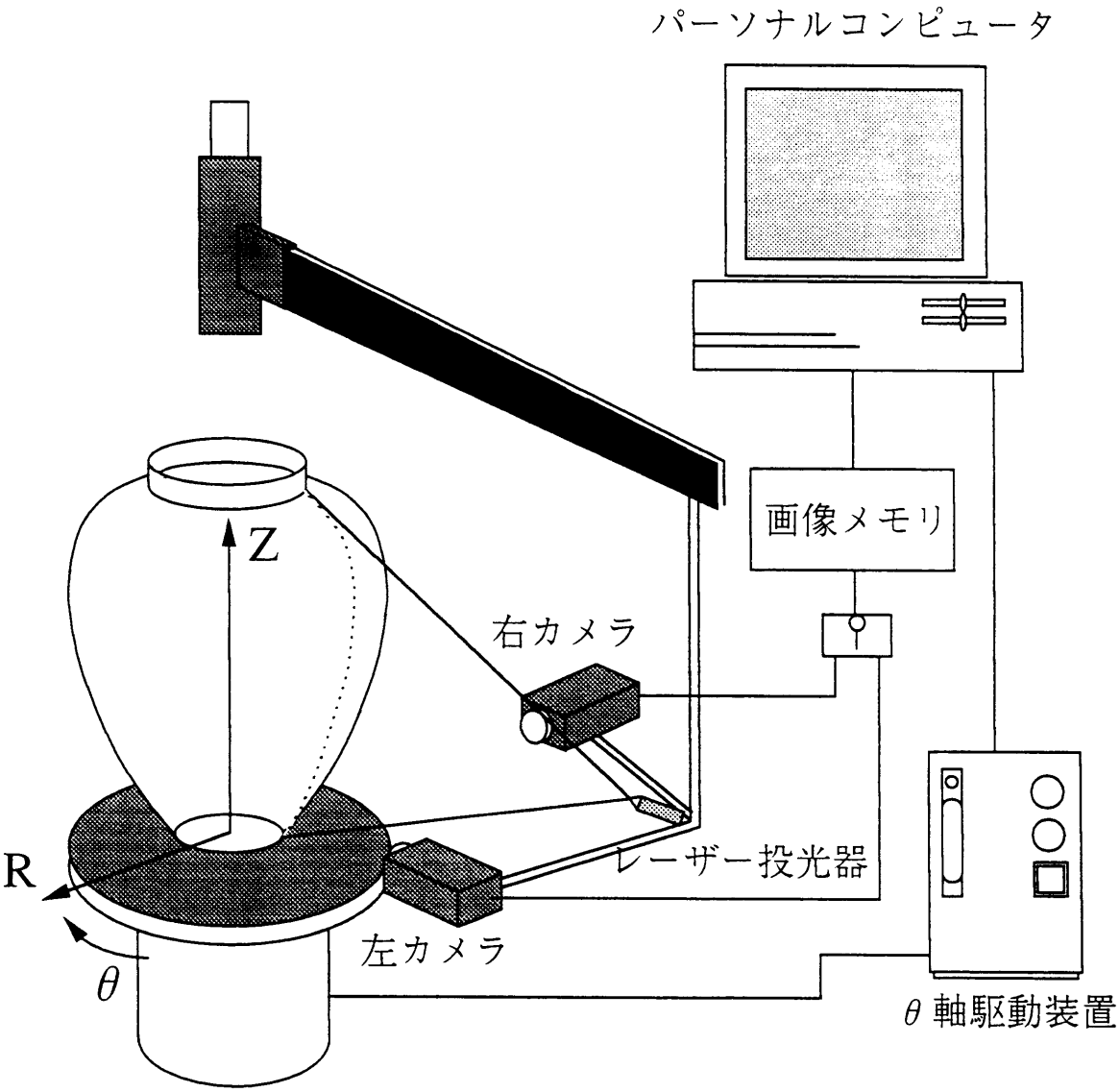


図４．２　回転系の計測システム

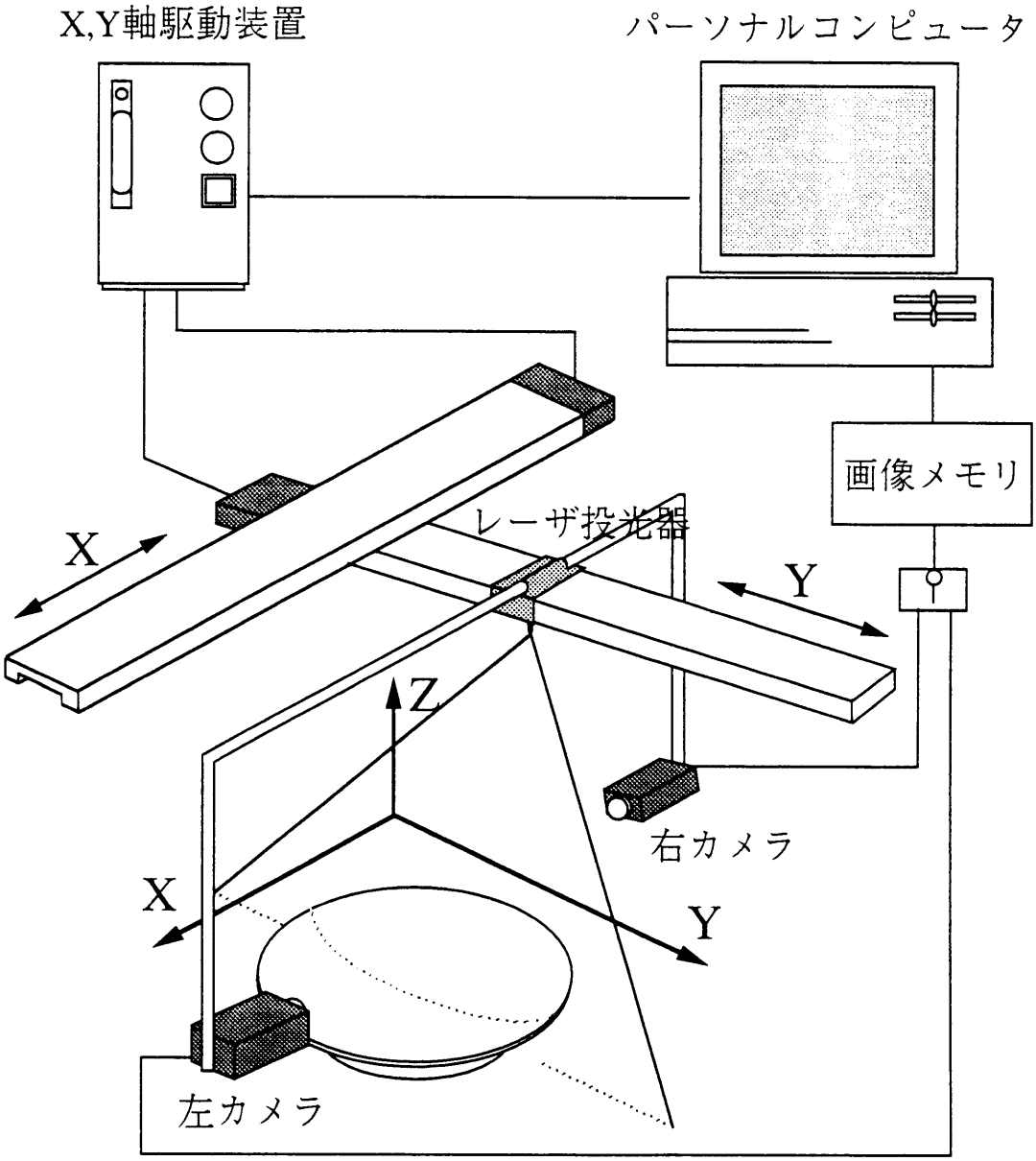


図４．３　平板系の計測システム

ーブルの真下に測定物を置き、Ｙ軸に固定したスリット投光器からスリット光をＹ軸に平行に、真下にある測定物に照射し、Ｙ軸に固定したカメラでスリット光を撮像し、スリット光が測定物全体に照射されるようにＹ軸がＸ軸に沿って動き測定物の全体形状を計測する。回転系においても平板系においても、カメラとスリット光の相対的な位置は一定である。パソコン側から回転テーブルの回転角θ、ＸＹテーブルのＸ軸の移動量を指示し、それぞれの移動量と同期して、レーザ投光器より照射されたスリット光の反射光を二台のカメラで撮像し、測定物表面の凹凸を反映したスリット光を画像メモリに画像信号として一時的に記憶する。パソコン内の三次元座標演算プログラムは、回転系では各水平走査ライン毎のスリット光の中心位置を、平板系では各垂直走査ライン毎のスリット光の中心位置を求め、次節で示す三次元座標値の計算法によりそれぞれの三次元座標値を求めている。

４．２．２　３次元座標値の計算法

図４．２と図４．３に示した計測システムの三次元座標系を図４．４と図４．５に示す。同図に示すように、回転系では（Ｒ，θ，Ｚ）、平板系では（Ｘ，Ｙ，Ｚ）で、それぞれの三次元座標を表現する。カメラのラスタ座標系は（Ｕ，Ｖ）と表現し、左カメラ、右カメラのそれぞれの座標を（U_L，V_L）（U_R，V_R）と表現する。

本計測システムでは、システムの構成上の３つの特徴を用いて簡便に座標値を計算できる方法を提案する。特徴の一つ目は、スリット光投光器とカメラとの相対的位置関係は常に一定であることである。二つ目は、回転系におけるスリット光はθＺ平面と平行な面に投影され、平板系におけるスリット光はＹＺ平面と平行に投影されることである。三つ目は、図４．２に示している回転テーブルの回転角θ及び図４．３に示しているＸＹテーブルのＸ軸の移動量はパソコンから直接指示するので、計測する必要がないことである。

そこで、以上の特徴をもとにして、ラスタ座標（Ｕ，Ｖ）と図４．４の（Ｒ，θ，Ｚ）との関係、ラスタ座標（Ｕ，Ｖ）と図４．５の（Ｘ，Ｙ，Ｚ）との関係

を表すと式（４．１）と式（４．２）のようになる。

$$\left.\begin{aligned} \theta &= \text{constant} \\ R &= f1(U,V) \\ Z &= f2(U,V) \end{aligned}\right\} \qquad (4.1)$$

$$\left.\begin{aligned} X &= \text{constant} \\ Y &= f3(U,V) \\ Z &= f4(U,V) \end{aligned}\right\} \qquad (4.2)$$

ここで、カメラのレンズ歪がなければ関数f1、f2、f3、f4はスリット光とカメラの位置関係により決定される透視変換の線形方程式で表わせる。しかしながら、実際にはレンズ歪があるので歪量を測定し補正する必要がある。

本計測システムでは、式（４．１）のＲ、Ｚ値、式（４．２）のＹ、Ｚ値を以下に示す方法により求める。回転系では、回転系の測定空間であるＲＺ平面上に図４．６に示す縦横１０mm毎の格子状に刻まれた校正用板を置く。この校正用板の各格子点を左カメラ、右カメラで撮像する。撮像された各格子点の測定空間上での座標（Ｒ，Ｚ）は既知である。撮像された各格子点が左カメラ、右カメラの座標系（Ｕ，Ｖ）のどの位置に写像されるかを実測し、撮像された各格子点の（Ｒ，Ｚ）値と（Ｕ，Ｖ）値を関連づけるテーブルを作成する。同様に平板系においても、測定空間であるＹＺ平面上に図４．６に示した校正用板を置き、左カメラと右カメラで撮像し、撮像した各格子点の（Ｙ，Ｚ）値と（Ｕ，Ｖ）値を関連づけるテーブルを作成する。このテーブルを用いて式（４．１）のＲ値、Ｚ値と式（４．２）のＹ値、Ｚ値を求める。

一つの例として、図４．４に示した点Ｐの（Ｒ，Ｚ）値を求める方法について述べる。点Ｐが図４．４の左カメラに写像されたようすを図４．７に示す。左カメラに写像された点P_1は格子点A_1，B_1，C_1，D_1で囲まれる。カメラ原点か

ら点P_l、格子点A_l，B_l，C_l，D_lに向かうベクトルを$\vec{p}$、$\vec{a}$、$\vec{b}$、$\vec{c}$、$\vec{d}$とすると、ベクトル$\vec{p}$は式（４．３）で表すことができる。

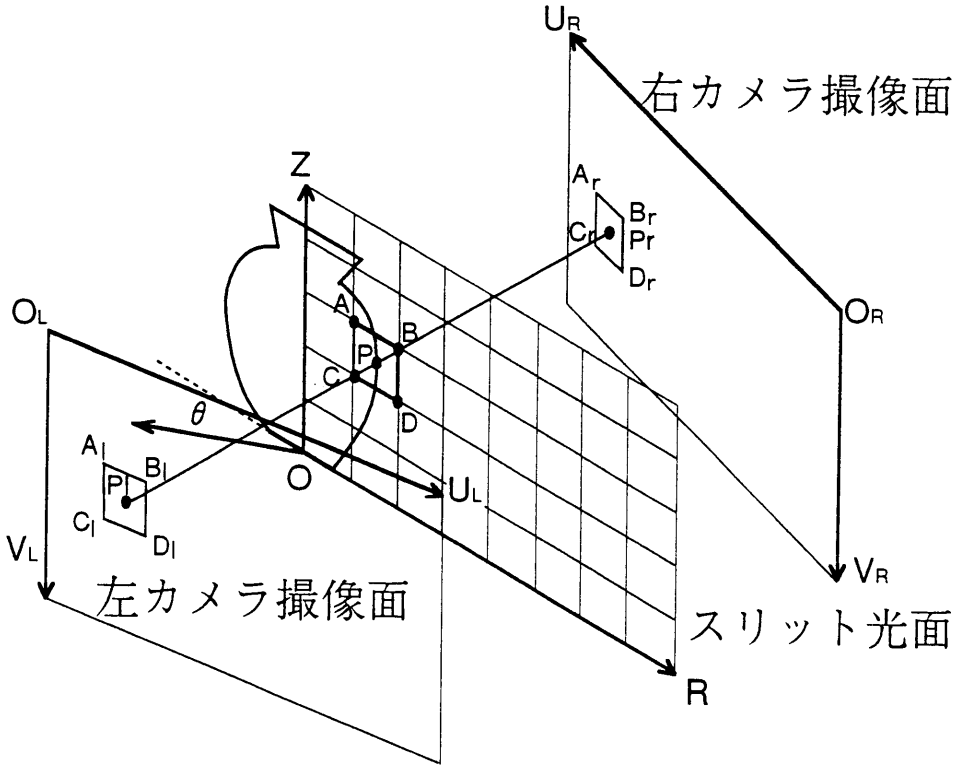


図４．４　回転系における絶対座標系とカメラ座標系との関係

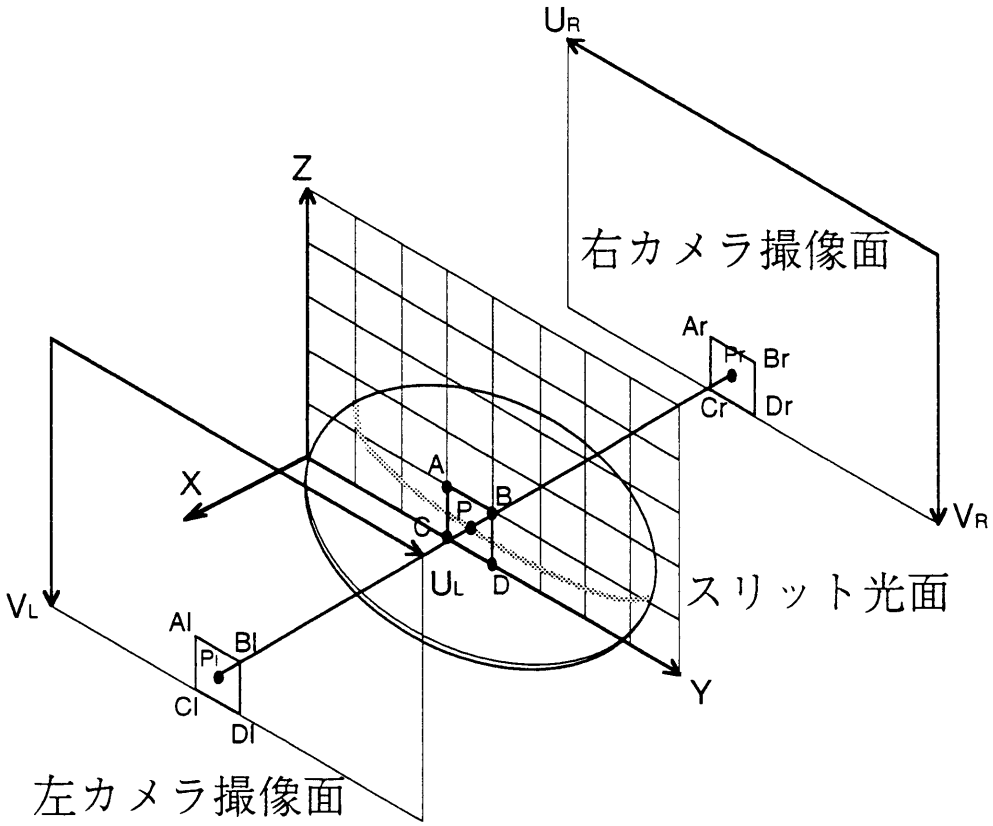


図４．５　平板系における絶対座標系とカメラ座標系との関係

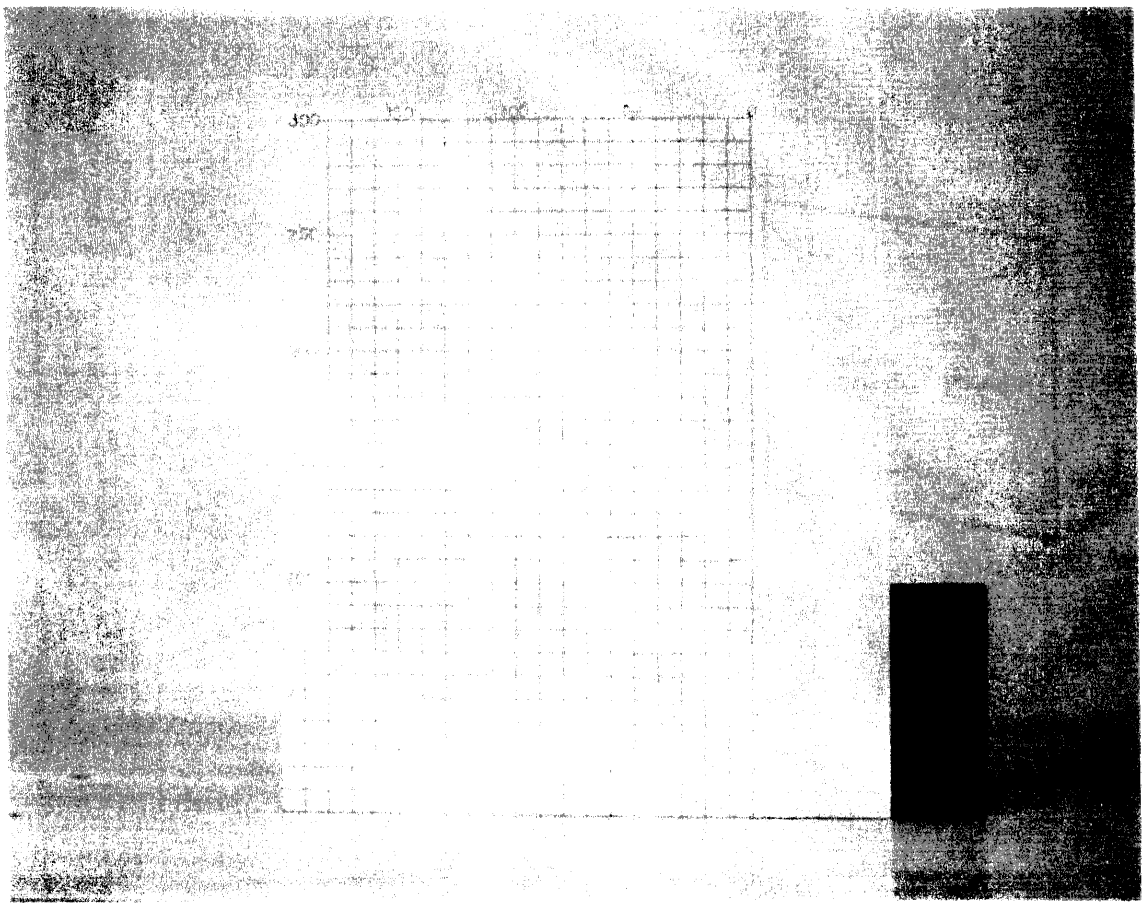


図４．６　校正用板

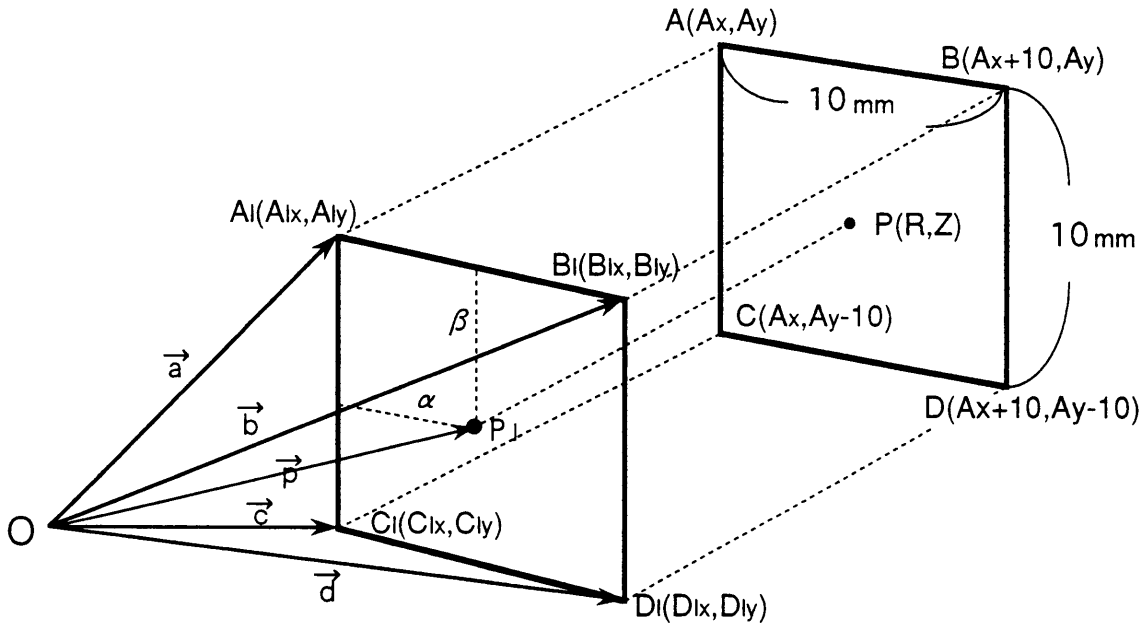


図４．７　カメラ座標系のベクトル表現

$$\vec{p}=(1-\alpha)(1-\beta)\vec{a}+(1-\alpha)\beta\vec{b}+\alpha(1-\beta)\vec{c}+\alpha\beta\vec{d}\ (0\leqq\alpha,\beta\leqq1) \qquad (4.3)$$

式（４．３）を解くとα、βが求められるので、このα、βを用いて式（４．４）によりＲ値、Ｚ値を求めることができる。

$$\left.\begin{aligned} R &= A_x + 10\times\alpha \\ Z &= A_y + 10\times\beta \end{aligned}\right\} \qquad (4.4)$$

ここで、A_x，A_yは、点P_1を囲む格子点A_1に対応する測定空間上の座標値である。

平板系においても、上述した方法により（Ｙ，Ｚ）値を求めることができる。

４．２．３　死角の対処法[75]

本計測システムでは、計測対象物に照射したスリット光をカメラで撮像し、カメラ撮像面に写ったスリット光の位置から三次元座標値を求めているが、スリット光を捉えるためのカメラの位置が固定されているので、対象物の形状によってはカメラ撮像面にスリット光が写らない地点、いわゆる死角が生じることがある。回転系では、緩やかな凸型形状の壺などを計測するので死角が発生する可能性は低いが、平板系では、凹型形状の皿などを計測するので、配置しているカメラの位置によっては、死角が発生する可能性がある。平板系において死角の発生を回避するには、対象物を置く平面とカメラ光軸とのなす角度が90°近い値をとるようにカメラの位置を決定すれば良い。しかし、このように角度を大きくすると、前述した校正用板を撮像する場合の板平面とカメラ光軸との角度は小さくなり、

本計測システムの原理上、計測精度は悪くなってしまう。そこで、平板系では、死角の発生を極力抑え、かつ高い計測精度を得るために上述の角度を約30度に設定している。

本計測システムでは、スリット光を照射する投光器の左側と右側の位置に一つずつカメラを置き、その左右両方のカメラでスリット光を撮像し、左右どちらのカメラを用いても三次元座標値を求めることができる。本計測システムでは、基本的に左カメラによる計測結果を採用する。そして、左カメラにおいて死角が生じた部分については、右カメラによる結果を用いて対処する。

そこで、死角が発生した場合の対処の方法について、表４．１に示す平板系の対処例より述べる。まず、u_l＝０におけるスリット光の位置v_lを求め、順次u_lを大きくし255まで、それぞれのu_lにおいてスリット光の位置v_lを求める。スリット光をカメラで捉えた場合、その部分は他の部分より非常に高い輝度値を示すので容易にスリット光の位置を求めることができる。表４．１の？部分は、あるu_l値においてv_l値の０から255までを調べたところ、高い輝度値の部分がなかったところである。つまり、この？部分が死角であり、？部分においては三次元座標値を求めることができない。そこで、右カメラによる結果を用いて対処する。表４．１より、？部分の前後のu_l、v_l値を求め、そのu_l、v_lにおける三次元座標値Y_l、Z_lを求める。同表では、直前の値は①のY_l＝９９．３、Z_l＝２２．２であり、直後の値は②のY_l＝１０４．８、Z_l＝１９．１である。それぞれのY_l、Z_l値とユークリッド距離が最小となる右カメラの三次元座標値Y_r、Z_rを求める。同表では、③と④に当たる。この③と④の間の計算結果を左カメラの死角部分の座標値とする。したがって、死角が発生した場合には上述の方法により対処する。

回転系においても、死角が発生する場合には上述の方法により対処する。

表４．１　２台のカメラによる死角対処のためのテーブル

u_l	v_l	Y_l	Z_l (mm)	Y_r	Z_r (mm)	u_r	v_r
0	105.4	22.8	0.2	20.4	0.3	255	100.4
1	105.4	23.4	0.1	21.2	0.2	254	100.4
.	.	.	.	.	.	.	.
104	133.7	① 99.3	22.2	③ 99.4	22.0	151	128.6
105	?	?	?	100.2	22.0	150	128.6
106	?	?	?	101.0	22.0	149	128.5
107	?	?	?	101.7	22.0	148	128.5
108	?	?	?	102.5	21.7	147	128.2
109	?	?	?	103.2	20.5	146	126.7
110	?	?	?	104.0	19.9	145	125.9
111	130.0	② 104.8	19.1	④ 104.9	19.0	144	124.9
.	.	.	.	.	.	.	.
254	105.3	199.8	0.3	198.4	0.4	1	100.3
255	105.3	200.9	0.4	199.2	0.2	0	100.3

($Y_l = f3(u_l, v_l)$, $Z_l = f4(u_l, v_l)$, $Y_r = f3(u_r, v_r)$, $Z_r = f4(u_r, v_r)$)

４．２．４　計測データの３次元表示[76]

計測データを３次元的にコンピュータ画面上に表示し、実対象物と表示結果を比較すれば計測データの健全性を調べることができる。そこで、直交投影により回転系と平板系で計測されたデータをコンピュータ画面上に表示する方法について述べる。

コンピュータ画面上の各ドットと１対１に対応している物理座標に対して、そこに新たな論理座標を設定して、画面をあたかも３次元直交座標空間のように使うことができる。図４．８に示すようなＸＹＺ直交座標系をコンピュータ画面上に考える。そのＸＹＺ座標系上に直方体を考え、頂点の１つを点Ｐ（ｘ，ｙ，ｚ）とする。点Ｐはコンピュータ画面の座標系では（xg，yg）である。xg、ygは次式で表すことができる。

$$\left.\begin{aligned} xg &= o_x + r_2 \times \overline{CD} \times \cos(sr) - r_1 \times \overline{OC} \times \cos(tr) \\ yg &= o_y + r_1 \times \overline{OC} \times \cos(tr) + r_2 \times \overline{CD} \times \sin(sr) - \overline{DP} \end{aligned}\right\} \qquad (4.5)$$

ただし、o_x、o_yはＸＹＺ直交座標系の原点Ｏのコンピュータの画面座標系での座標である。ＯＣ、ＣＤ、ＤＰは、直交座標系のｘ値、ｙ値、ｚ値である。r_1、r_2は縮小率であり、sr、trは水平方向とＸ軸、Ｙ軸とのなす角である。ＸＹＺ直交座標系の各軸の長さの単位を、コンピュータ画面上ではux、uy、uzで示すドット数で表現する。これより式（４．５）は（４．６）となる。

$$\left.\begin{aligned} xg &= o_x + r_2 \times y \times uy \times \cos(sr) - r_1 \times x \times ux \times \cos(tr) \\ yg &= o_y + r_1 \times x \times ux \times \cos(tr) + r_2 \times y \times uy \times \sin(sr) - z \times uz \end{aligned}\right\} \qquad (4.6)$$

この式（４．６）を用いることにより計測結果をコンピュータ画面上に３次元的に表示できる。平板系の計測結果は（Ｘ，Ｙ，Ｚ）で求まるので、式（４．６）

にそのまま計測結果を代入してコンピュータ画面上に３次元的に表示できる。回転系の計測データは（R，θ，Z）で求まるので、ＸＹＺ直交座標系の値に変換して、つまり（X，Y，Z）に変換して式（４．６）より計測結果を３次元的に表示できる。

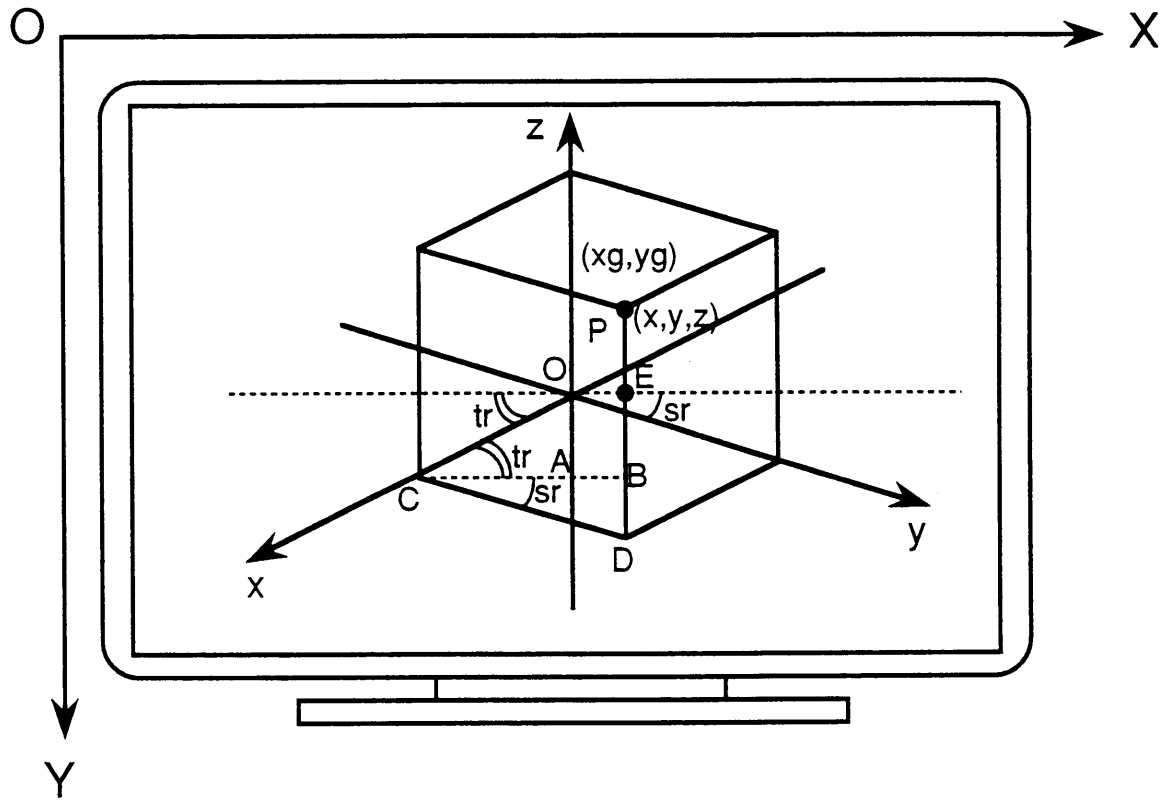


図４．８　コンピュータ画面の座標系

４．３　計測実験

４．３．１　計測精度評価実験

本計測システムの精度を評価するための実験を行った。測定物として、直径が異なる６個の円柱を用意し、その直径を回転系および平板系で計測した。その結果を表４．２と表４．３に示す。スリット光の中心線は、スリット光の輝度の重心により決定した。水平走査線上の最大輝度値V_iを示すX_i座標値、及びその左右に隣接する画素の輝度値V_{i-1}、V_{i+1}を示す座標値X_{i-1}、X_{i+1}の３画素の情報を用いて、$\Sigma(V_i \cdot X_i)/\Sigma V_i$よりＸ座標値を求め、このＸ座標値をスリット光の中心位置とした。表４．２と表４．３の結果から誤差は０．６mm以内であることがわかる。したがって、１mm以下の計測精度が実現できた。この計測精度は、陶磁器の形状計測としては充分である。この実験におけるカメラの視野は３００mm×３００mmであった。

表４．２　回転系による円柱直径の計測結果

試 料（mm）	実験値（mm）	誤 差（mm）
140.0	140.3	0.3
138.3	138.2	-0.1
137.6	137.3	-0.3
136.7	136.9	0.2
135.2	135.8	0.6
134.5	134.6	0.1

表４．３　平板系による円柱直径の計測結果

試 料（mm）	実験値（mm）	誤 差（mm）
140.0	139.5	-0.5
138.3	138.8	0.5
137.6	137.5	-0.1
136.7	137.2	0.5
135.2	135.6	0.4
134.5	134.9	0.4

４．３．２　陶磁器の３次元形状計測実験

回転系計測システムを用いて、壺の形状計測を行った。回転系計測システムでの計測の手順を図４．９に示す。図４．９に示した手順により図４．１０に示す壺の形状を計測し、その計測結果を図４．１１に示す。パソコン側から回転角θを６°と指示し、６°毎のスリット光の位置において三次元座標値を計算し、図４．１１に示したように計測結果をコンピュータ画面上に表示した。１回転は３６０°であり、６°刻みの計測を行ったので６０本のスリット光に対して三次元座標値を計算した。図４．１１の計測結果と図４．１０を比較すると、壺の中程の形状が正確に計測されていることがわかる。壺の上端と下端の計測データがないが、これはカメラの視野に壺の上端と下端が入らなかったためである。

平板系計測システムを用いて、皿の形状を計測した。平板系計測システムでの計測の手順を図４．１２に示す。図４．１２に示した手順により図４．１３に示す皿の形状を計測し、その計測結果を図４．１４に示す。パソコン側からＸＹテーブルのＸ軸の１回の移動量を５㎜と指示し、４０回移動して三次元座標値を計算した。４０本のスリット光に対して三次元座標値を計算した結果が図４．１２である。図４．１４を図４．１３と比較すると、正確に皿の形状を計測していることがわかる。

壺と皿の計測に要した時間は、それぞれ約１０秒、約１５秒であった。この計測時間は、計測開始から計測結果のコンピュータ画面表示終了までの時間である。計測時間のほとんどは、対象物へのスリット光の照射時間であり、三次元座標値の計算に要する時間は、０．３秒と極めて短い時間であった。壺と皿の計測に１０秒と１５秒の時間を要したが、この時間は実用上差し支えない。

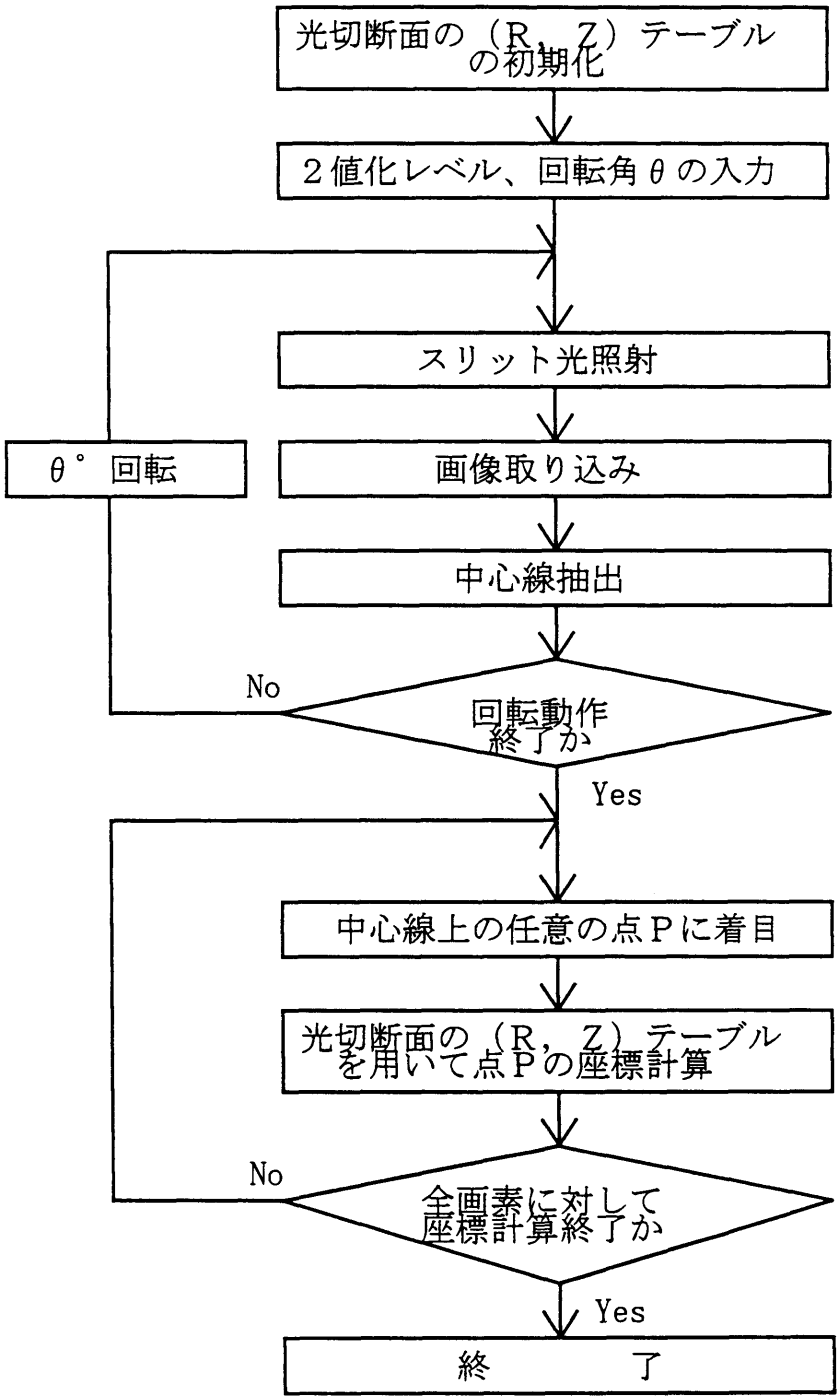


図４．９　回転系での計測手順

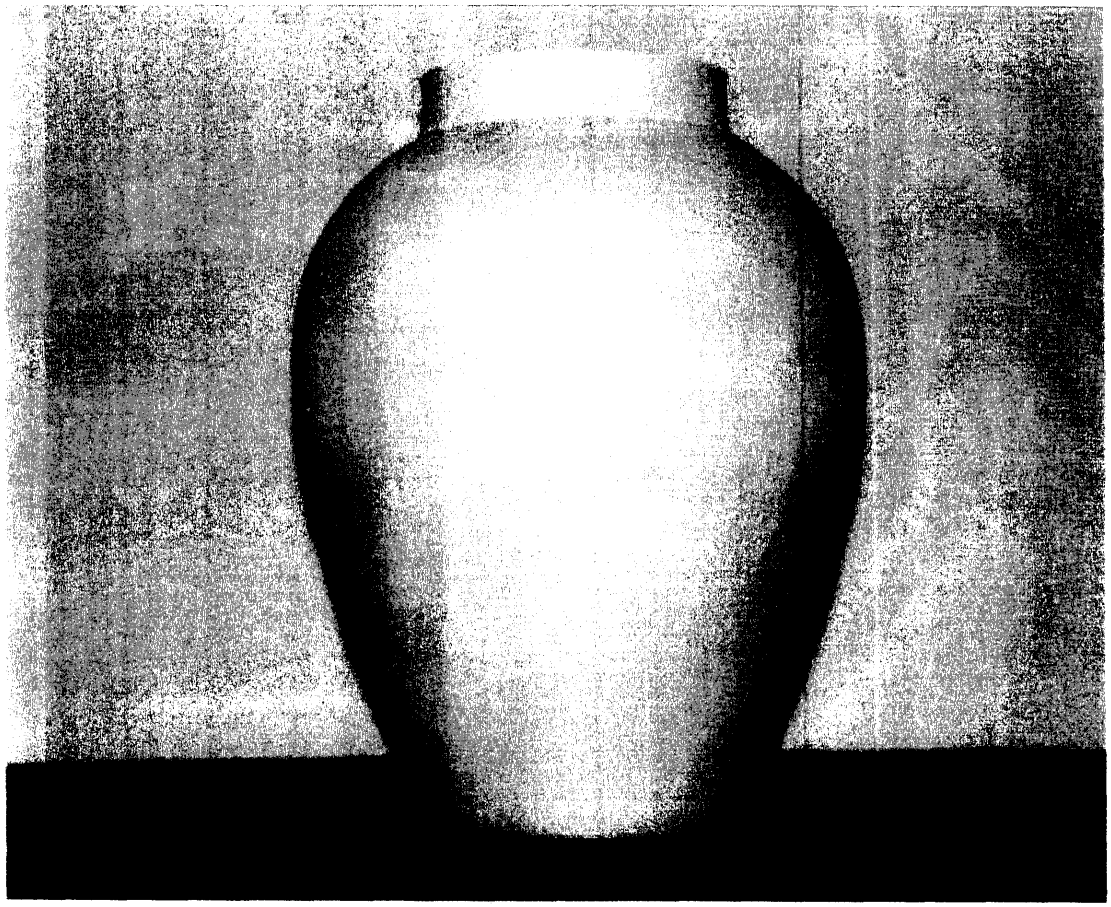


図４．10　回転系で計測する壺

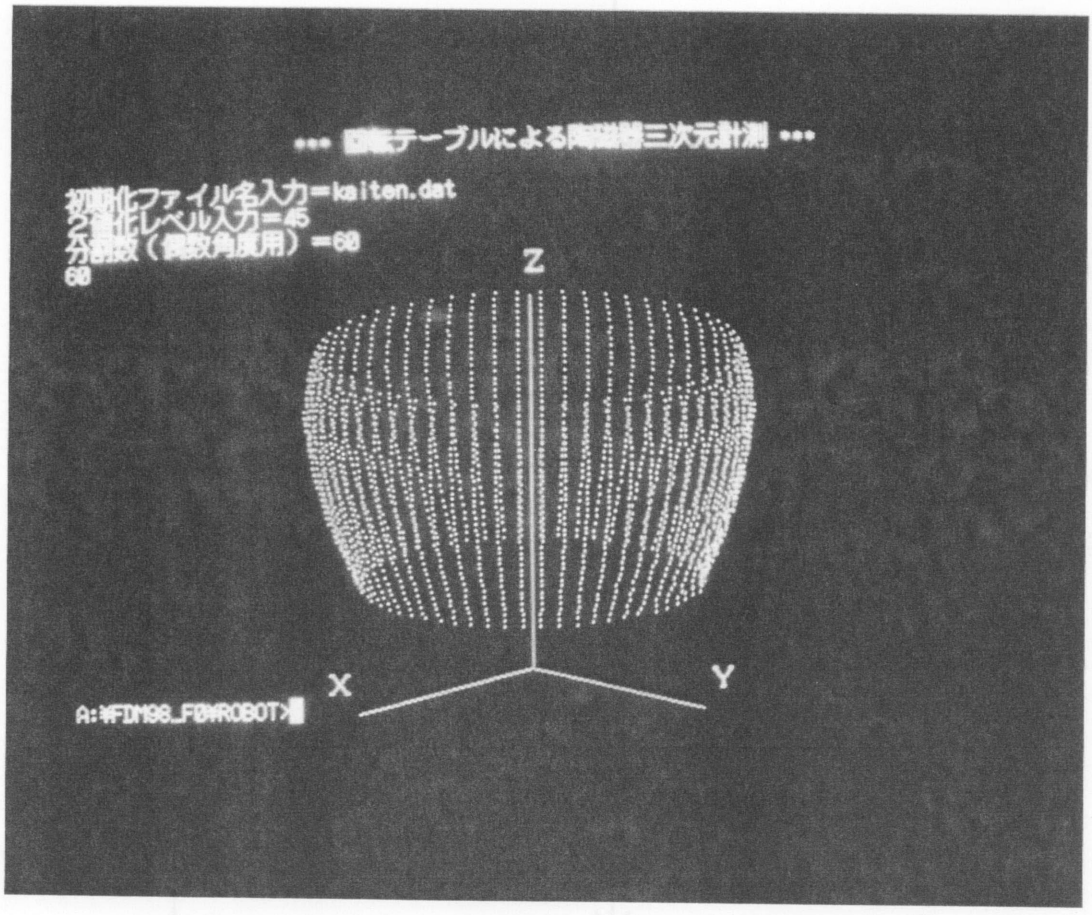


図４．11　壺の計測結果のコンピュータ表示

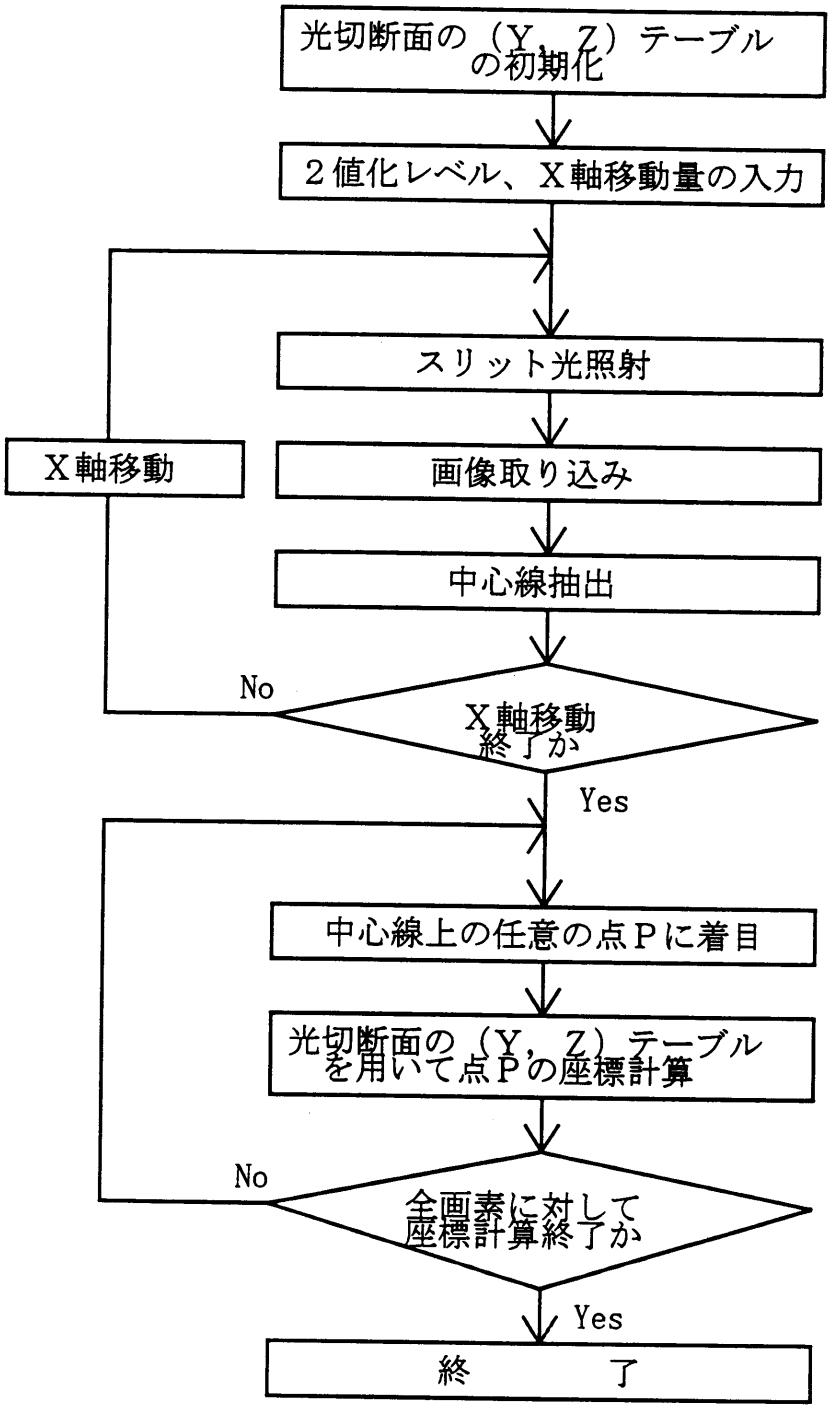


図４．12　平板系での計測手順

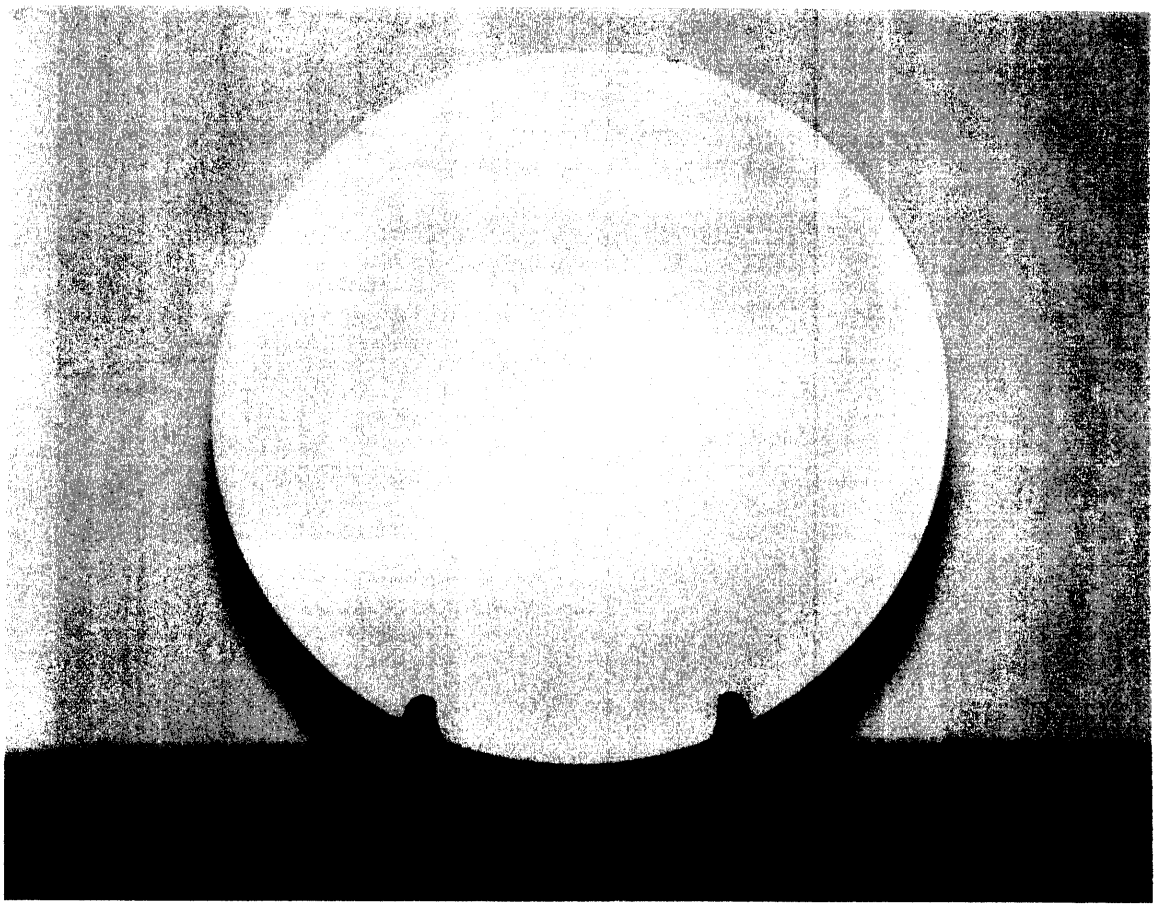


図４．13　平板系で計測する皿

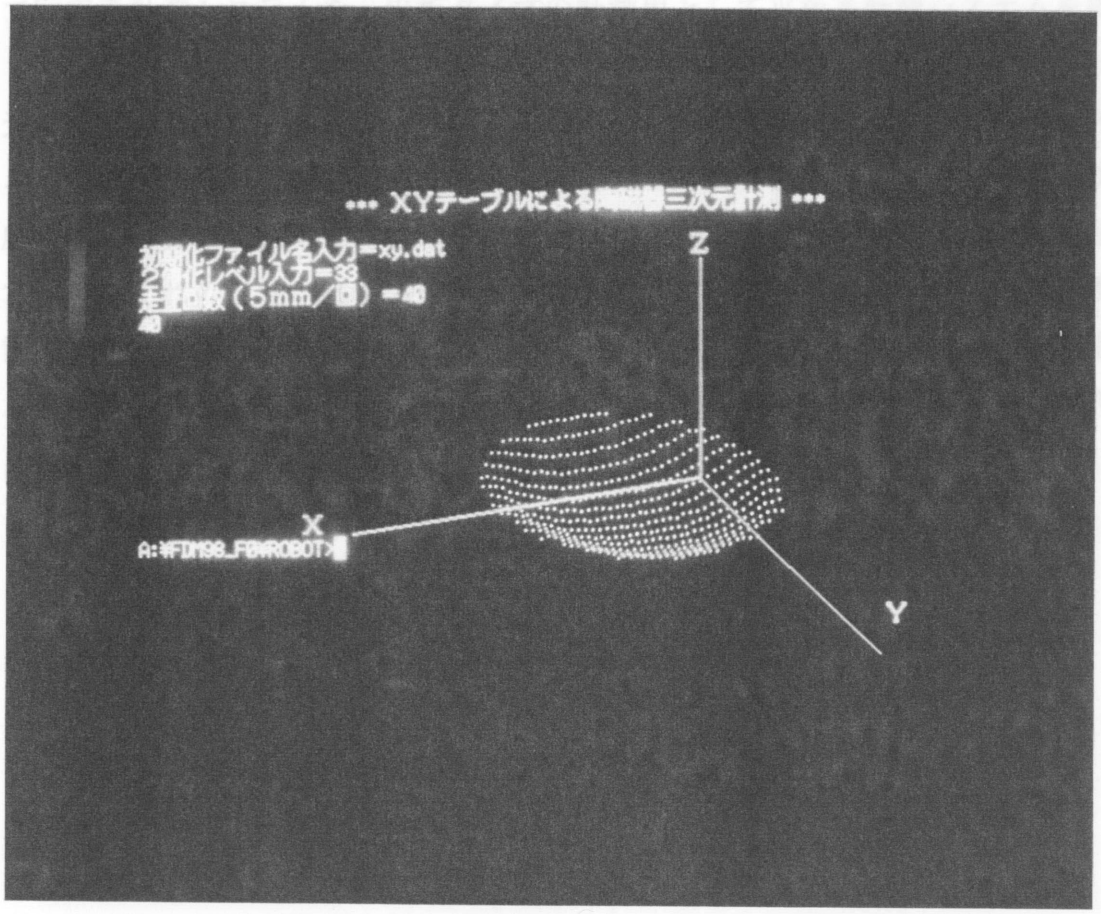


図４．14　皿の計測結果のコンピュータ表示

４．４　むすび

本章では、陶磁器の３次元形状計測システムを提案した。陶磁器形状はさまざまであるが、その形状の調査の結果、二つのタイプに大別できることが判明した。一つは壺、花瓶のような回転体タイプであり、もう一つは皿、陶板のような平板タイプである。この二つのタイプを計測するために、回転体タイプの計測用として回転系計測システムを、平板タイプの計測用として平板系計測システムを提案した。二つの計測システムは、スリット光を対象物に照射して計測するスリット光投影法を基本にして計測システムを提案した。陶磁器を計測するためのシステムの提案であるので、実用的な時間での計測が必要であるが、このための三次元座標値の計算法を示した。さらに、死角が発生した場合の対処法についても示した。それぞれの計測システムの計測精度を評価する実験では、１㎜以内の精度で計測できることを示した。ついで、回転系、平板系の計測システムを用いて壺と皿の形状計測を実行し、計測結果をコンピュータ画面上に表示し正しく計測できることを示した。

第５章

陶磁器への自動描画システムの開発

５．１　まえがき

本章では、ＣＡＤから出力されるＮＣデータを用いて陶磁器へ自動描画を行うシステムの構成法について述べる。ＣＡＤより陶磁器へ描画するためのＮＣデータを出力するには、ＣＡＤに対して描画したい対象陶磁器の形状に関するデータを入力する必要がある。本章では、描画対象である陶磁器を前述のシステムで計測し、計測結果をＣＡＤへ入力し、ＣＡＤの機能を用いて計測した陶磁器の曲面にデザインを描画する方法を提案する。

５．２　デザイン描画システムの原理と構成[75][77][78]

本描画システムの構成を図５．１に示す。本描画システムは、４軸描画ロボット（Ｘ軸、Ｙ軸、Ｚ軸、θ軸の４軸）、Ｚ軸に取り付けた描画ペン、描画ロボットの４軸を同時に制御するＮＣ制御プログラム（唐津鉄工所、NC-MATE4）［79］、４軸描画ロボットの全体の動きの制御に用いるパソコン（PC9801）およびパソコンとＬＡＮにより接続された３次元ＣＡＤシステム（TOSHIBA、ANVIL5000）［80］より構成している。３次元ＣＡＤシステムは、４軸描画ロボットを動かすためのＮＣデータの作成に用いる。描画は、前述の計測システムで大別した回転体タイ

プ、平板タイプそれぞれの陶磁器に対して可能である。回転体タイプの陶磁器は、計測システムでは回転テーブルの上に置いて計測を行った。描画についても回転テーブルの上にそのまま置いた状態で行う。回転体タイプの陶磁器への描画は、回転テーブルの回転角θとX軸、Z軸の動きを同時に制御して行う。このとき、Y軸の位置は回転テーブルの回転軸にあわせている。従って、Y軸は一定の値となる。平板タイプの陶磁器への描画は、X軸、Y軸、Z軸の3軸の動きを同時に制御して行う。従って、回転体タイプ、平板タイプの陶磁器への描画に用いるNCデータは、それぞれ（θ，X，Y，Z）と（X，Y，Z）の座標値で記述されている。

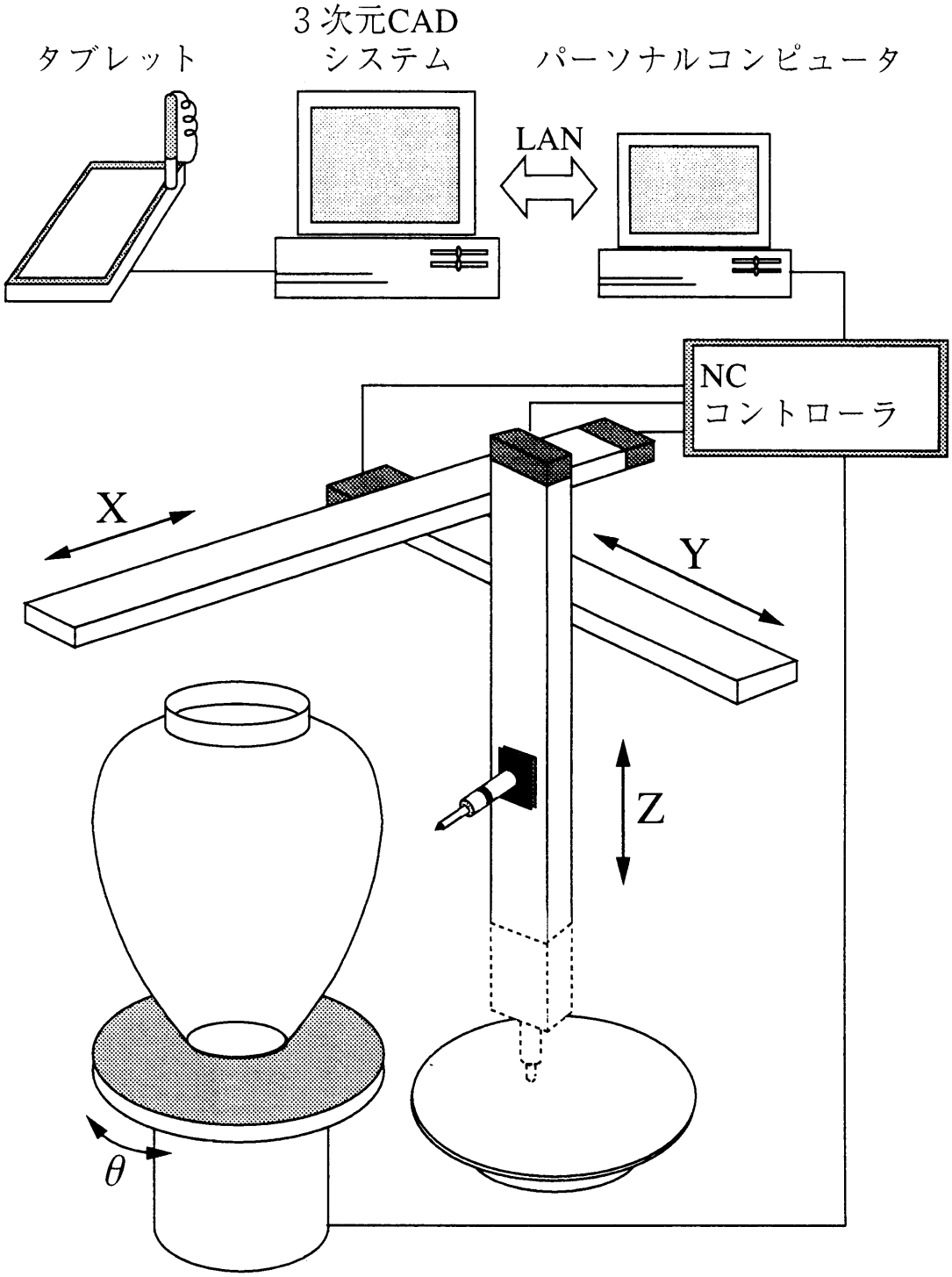


図５．１　デザイン描画システムの構成

５．３　描画デザインのＮＣデータの作成[75]

３次元ＣＡＤシステムを用いた描画デザインのＮＣデータの作成手順について述べる。描画デザインのＮＣデータの作成手順を図５．２に示す。はじめに、描画対象の陶磁器の形状を計測する。このことについては、第４章で示したシステムで計測できることを示した。ついで、ＣＡＤ上では、計測した結果を用いて計測した陶磁器の形状を復元する。このためには、後述するＧＲＡＰＬ言語（GRAPHICS APPLICATION PROGRAMMING LANGUAGE）[81]を用いて、陶磁器の計測結果をＣＡＤへ入力し、入力された計測結果を用いて、ＣＡＤの曲面作成機能より陶磁器の３次元形状を作成する。ついで、陶磁器に描画するデザインをＣＡＤに入力する。陶磁器の形状が復元され、描画するデザインを入力したならば、陶磁器のどの位置に描画するかを決定し、その位置でデザインを陶磁器曲面へＣＡＤの機能を用いて投影する。投影の結果、デザインは陶磁器の曲面に張り付いた状態となる。この状態で、投影されたデザインのすべての線の軌跡をＮＣデータとして出力する。出力されるＮＣデータ（ＣＡＤから出力されるデータは一般にＣＬデータと呼ばれる）は、ＸＹＺ直交座標系の座標値として出力される。平板タイプの陶磁器への描画は、Ｘ軸、Ｙ軸、Ｚ軸を用いて行うので、出力されたＮＣデータがそのまま利用できる。回転体タイプの陶磁器への描画は、Ｘ軸、Ｚ軸、θ軸を用いて行うので、ＣＡＤから出力されるＮＣデータは、Ｘ軸、Ｚ軸、θ軸の座標値に変換する必要がある。

以下に、ＣＡＤ内での陶磁器の復元方法、デザインの入力方法、ＮＣデータの作成方法について詳述する。

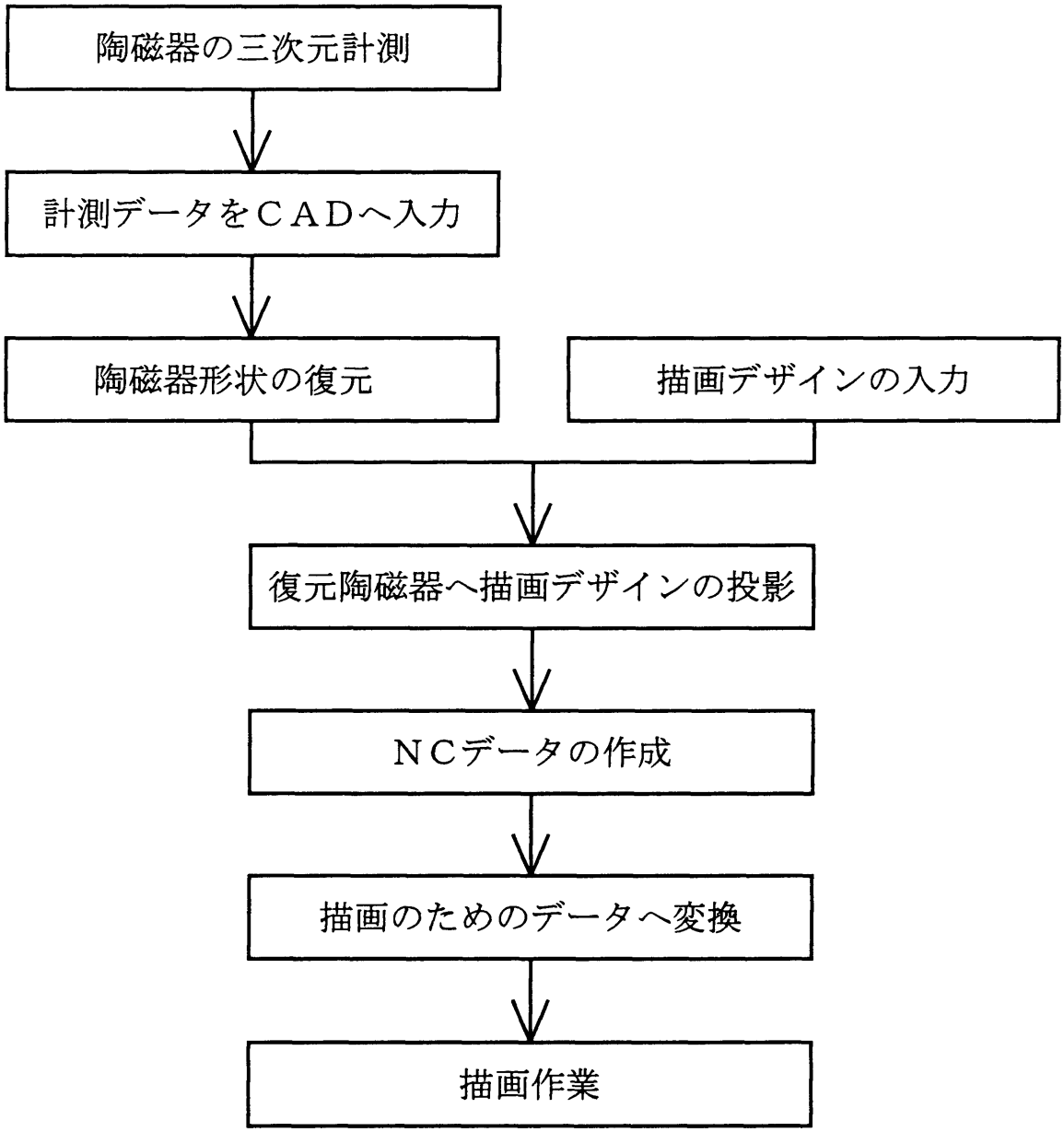


図５．２　描画デザインのＮＣデータの作成手順

５．３．１　計測データを用いた陶磁器形状の復元[75][77]

ここでは、第４章で述べた計測システムで陶磁器を計測し、その計測結果を用いてＣＡＤ上に陶磁器の３次元形状を復元する方法について述べる。前述の計測システムでは、陶磁器にスリット光を照射し、スリット光上の点について３次元座標値を求めている。照射したスリット光は、陶磁器曲面に当たり、当たった部分は３次元的な曲線を描いている。一方、ＣＡＤ上では、容易に点を入力でき、点から線を、線から面を作ることができる。線は複数の点を繋いで作り、面は複数の線を通る唯一のものとして作ることができる。つまり、第４章で求めた陶磁器の計測結果は、３次元的な点の集まりであるので、この計測結果をＣＡＤ上で利用できれば、この計測結果に基づいて陶磁器形状を復元できる。

ＣＡＤでは、ＧＲＡＰＬ言語（GRAPHICS APPLICATION PROGRAMMING LANGUAGE）[81] と呼ばれる図形定義用言語を利用できる。ＧＲＡＰＬ言語を用いればＣＡＤ上のすべての機能がプログラムにより実現できるので、このＧＲＡＰＬ言語を用いてＣＡＤ上に陶磁器の形状を復元する方法について述べる。

前述の計測システムにおいて、１つのスリット光に対して数１０点の計測点を選び、それら計測点の３次元座標値を求める。得られた数１０点の計測結果をＣＡＤに入力し、入力された数１０点の点を繋ぐことにより３次元曲線が１つ作成できる。ＧＲＡＰＬ言語により計測結果を用いて３次元曲線を作るための記述例を図５．３に示す。点１から点ｎまでの点が、数１０点の計測点のことを意味し、それら計測点について得られた３次元座標値（Ｘ，Ｙ，Ｚ）を記述する。ついで、点１から点ｎまでの点を繋いで曲線（図５．３では曲線を線１と定義している）を３次元スプライン曲線（SPCURV：GRAPLでの３次元スプライン曲線の記述法）として作成することを記述する。このようにして、１つのスリット光に対して得られた３次元座標値を用いて、図５．３の記述によりＣＡＤ上に１つの３次元曲線を作ることができる。したがって、複数のスリット光に対する計測結果を同様にしてＣＡＤに入力し、３次元曲線を作ることができる。複数の曲線が入力できれば、ＣＡＤの曲面作成機能を用いて複数の３次元曲線を通る１つの曲面を作成できる。この曲面がＣＡＤ内に復元された陶磁器となる。

ＭＥＴＲＩＣ／

点１＝X_1，Y_1，Z_1

点２＝X_2，Y_2，Z_2

点３＝X_3，Y_3，Z_3

・

・

・

点ｎ＝X_n，Y_n，Z_n

線１＝ＳＰＣＵＲＶ／点１，点２，点３，・・・，点ｎ

図５．３　ＧＲＡＰＬによるスプライン曲線の記述例

５．３．２　描画デザインの入力[75]

ここでは、陶磁器に対して描画するデザインをＣＡＤに入力する方法について述べる。ＣＡＤシステムにはタブレットと呼ばれる標準入力機器があるので、このタブレットを用いてデザインをＣＡＤに入力する。

図５．４に示すデザインをＣＡＤに入力することを例にして述べる。まず、このデザインをタブレット上に置く。ＣＡＤでは、線は多数の点をつなぐことで作成するので、図５．４に示すように、デザインを構成している５本の線について、線上の点を多数指示しＣＡＤに入力する。線上の点を指示する場合の注意として、曲がりの大きい曲線については、その線を再現できる充分な多数の点を指示することが必要である。このようにして線上の点を多数ＣＡＤに入力し、入力した多数の点を２次元スプライン曲線として結ぶことをＣＡＤに指示する。その結果、タブレット上に置いたデザインを構成している線と同じ曲線がＣＡＤに入力できたことになる。

このような方法を用いて、壺と皿に描画するデザインの入力を行う。図５．５と図５．６が、壺と皿にそれぞれ描画するために入力したデザインである。

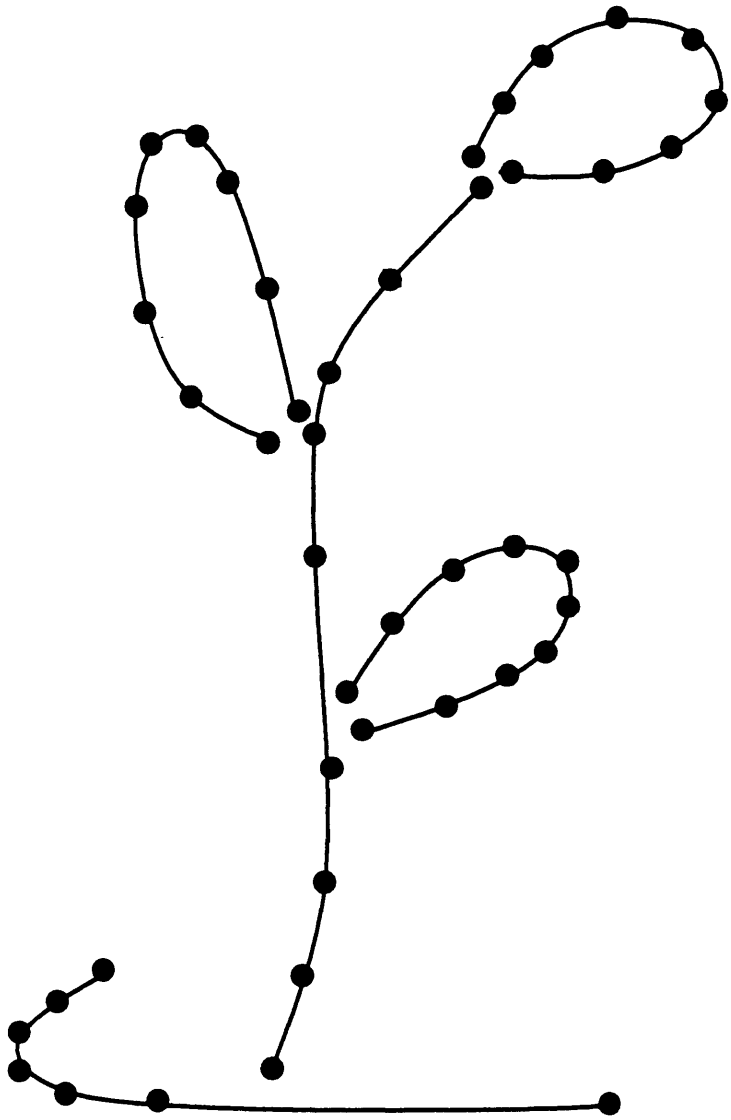


図５．４　描画デザインの線の入力

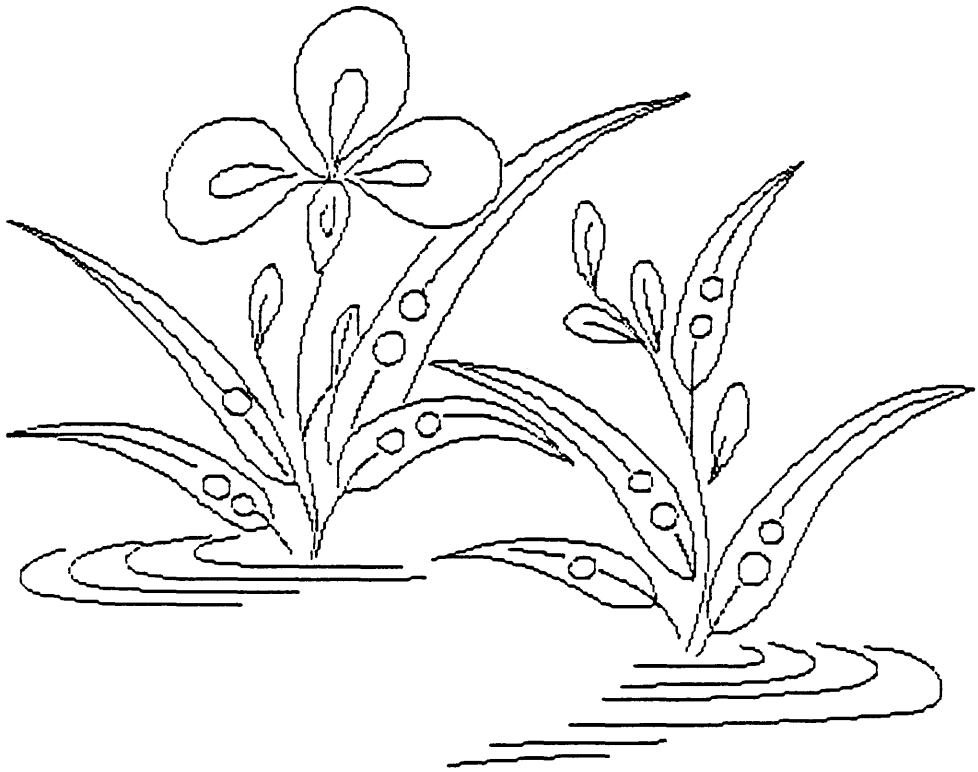


図５．５　壺へ描画するために入力したデザイン

図５．６　皿へ描画するために入力したデザイン

５．３．３　ＮＣデータの作成[75][77]

ここでは、陶磁器に描画するためのＮＣデータの作成方法について述べる。前述のようにＣＡＤ上には陶磁器の形状が復元でき、描画するデザインが入力されたので、陶磁器のどの位置に入力したデザインを描画するかを決定する。このために、陶磁器曲面を作成した３次元ＣＡＤ画面とデザインを入力した２次元ＣＡＤ画面をＣＡＤの機能により１つの３次元画面に合成する。画面を合成すれば、その画面上で描画する位置を決定する。描画位置の決定には、画面上で１枚の紙に描かれたデザインを陶磁器曲面に張り合わせるような作業が必要である。このことを実現するためのＣＡＤの機能として３次元曲面への２次元データの投影機能がある。この機能を用いて２次元のデザインを陶磁器曲面へ投影する。このことにより、デザインは陶磁器の曲面に張り付いた状態になり、画面上ではまさに陶磁器の曲面に絵が描かれたように見える。そこで、投影されたデザインを構成するすべての線の軌跡をＮＣデータとして作成する。このためには、ＣＡＤに対してミリング加工と呼ばれる機械加工法を指示する。これにより、ＣＡＤはデザインを構成しているすべての線の軌跡をＮＣデータとして出力する。出力されるＮＣデータ（ＣＡＤから出力されるデータは一般にＣＬデータと呼ばれる）は、計測システムから入力された座標系、つまりＸＹＺ直交座標系で出力される。平板タイプへの描画は、Ｘ軸、Ｙ軸、Ｚ軸を用いて行うので、ＣＡＤから出力されたＮＣデータはそのまま利用できる。回転体タイプの陶磁器への描画は、Ｘ軸、Ｚ軸、θ軸を用いて行うので、ＣＡＤから出力されたＮＣデータは、座標変換しなければならない。回転体タイプの計測システムの座標系の原点と描画ロボットの座標系の原点との位置関係が、Ｘ軸において３９５㎜、Ｙ軸において２７０．５㎜、Ｚ軸において５４８㎜ずれた位置にあるので、このことも考慮して座標変換を行う必要がある。回転体タイプへの描画は、（ｘ，ｙ，ｚ）で表現されたＮＣデータを式（５．１）より、描画用の（Ｘ，Ｙ，Ｚ，θ）で表現されたＮＣデータに変換して行う。

$$\left.\begin{aligned} X &= 395-\sqrt{x^2+y^2} \\ Y &= 270.5 \\ Z &= 548-z \\ \theta &= \tan^{-1}(y/x) \end{aligned}\right\} \qquad (5.1)$$

５．４　陶磁器への描画実験

本描画システムを用いて陶磁器素焼きへの描画実験を行った。本システムの外観を図５．７に示す。描画実験は図５．２に示した手順により進めた。描画対象には、図４．８と図４．１１で示した壷、皿を用いた。第４章において示した壺と皿の計測データをＧＲＡＰＬ言語を用いてＣＡＤへ入力した。その結果を図５．８と図５．９に示す。ＣＡＤ上では、図５．８と図５．９に示した記述に基づいて壺と皿の形状を復元した。その結果を図５．１０と図５．１１に示す。ＣＡＤ上では、描画位置を決定するために陶磁器を復元した図５．１０と図５．１１の画面と図５．５と図５．６のデザインを入力した画面とをそれぞれ合成した。その結果を図５．１２と図５．１３に示す。ついで、描画位置を決定し陶磁器曲面へデザインを投影した結果を図５．１４と図５．１５に示す。図５．１４と図５．１５に示した状態で描画のためのＮＣデータをＣＡＤから出力した。その結果を図５．１６と図５．１７に示す。この出力されたＮＣデータを描画ロボットの座標系にあわせるために座標変換を行った。座標変換を行い、実際の壺と皿への描画に用いたＮＣデータを図５．１８と図５．１９に示す。このＮＣデータを用いて描画している風景を図５．２０と図５．２１に示し、描画の終了結果を図５．２２と図５．２３に示す。この描画結果より、壺と皿に対して意図したデザインを人間が写しかえるのと同じように自然なかたちで描画できることを示した。

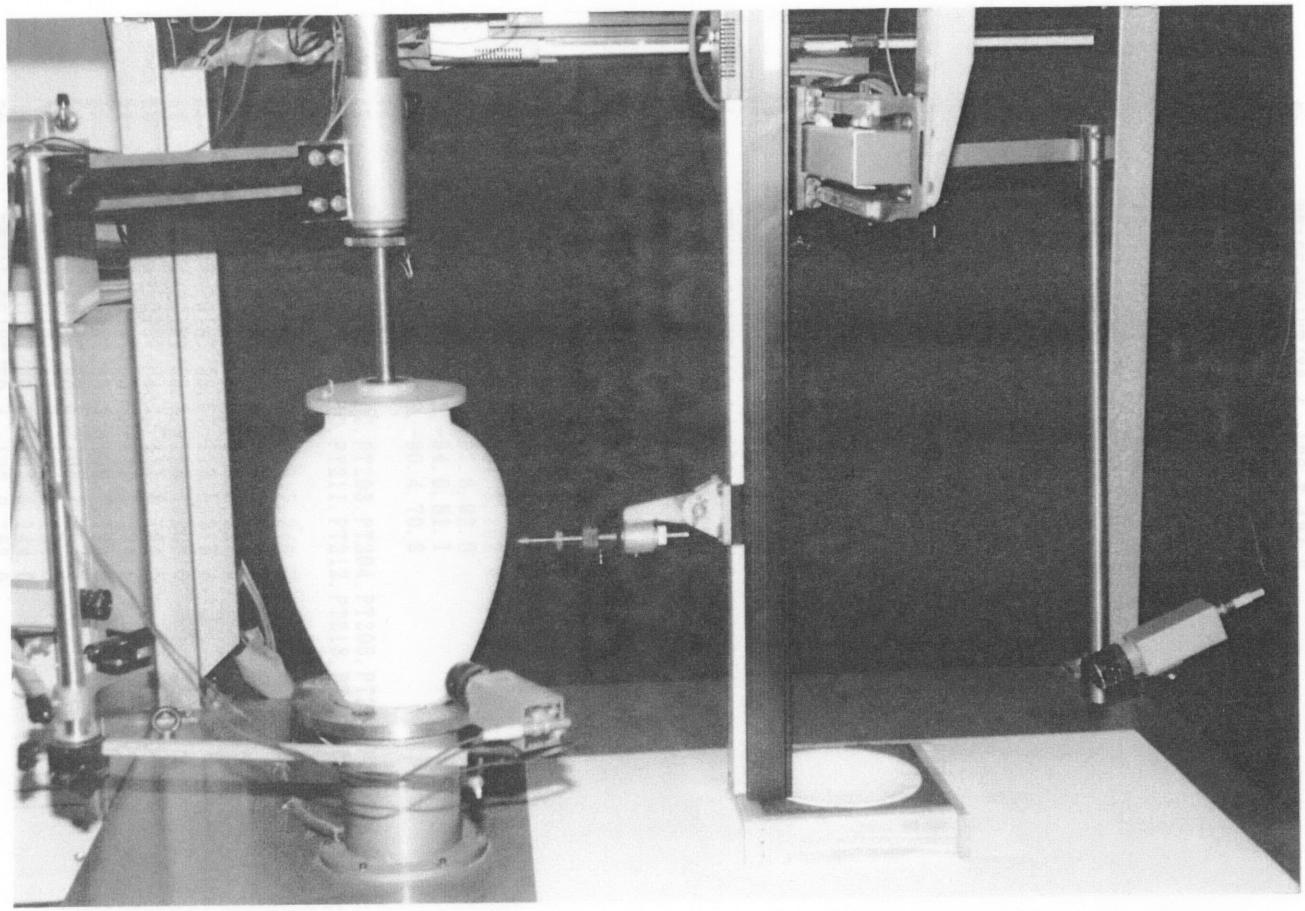


図５．７　計測システムおよび描画システムの外観

```
 1: $$  GRAPL PROGRAM TUBO
 2: $$
 3:       METRIC/
 4:       PT100=POINT/22.0,-124.7,246.7
 5:       PT101=POINT/22.3,-126.5,236.2
 6:       PT102=POINT/22.5,-127.4,226.0
 7:       PT103=POINT/22.6,-128.0,215.6
 8:       PT104=POINT/22.5,-127.5,205.0
 9:       PT105=POINT/22.4,-126.9,194.5
10:       PT106=POINT/22.2,-125.8,184.5
11:       PT107=POINT/22.0,-124.7,174.3
12:       PT108=POINT/21.6,-122.6,164.3
13:       PT109=POINT/21.4,-121.5,154.3
14:       PT110=POINT/20.8,-118.2,144.0
15:       PT111=POINT/20.5,-116.0,133.9
16:       PT112=POINT/20.1,-113.8,123.6
17:       PT113=POINT/19.4,-109.9,113.7
18:       PT114=POINT/18.7,-106.1,102.4
19:       PT115=POINT/18.0,-102.3,92.0
20:       PT116=POINT/17.4,-98.5,81.1
21:       PT117=POINT/16.7,-94.8,70.6
22:       SPL1=SPCURV/$
23:       PT100,PT101,PT102,PT103,PT104,PT105,PT106,PT107,$
24:       PT108,PT109,PT110,PT111,PT112,PT113,PT114,PT115,$
25:       PT116,PT117
26:       PT200=POINT/43.3,-119.0,246.7
27:       PT201=POINT/43.9,-120.7,236.2
28:       PT202=POINT/44.2,-121.5,226.0
29:       PT203=POINT/44.5,-122.2,215.6
30:       PT204=POINT/44.7,-122.7,205.0
31:       PT205=POINT/44.1,-121.1,194.5
32:       PT206=POINT/43.7,-120.1,184.5
33:       PT207=POINT/43.3,-119.0,174.3
34:       PT208=POINT/42.6,-116.9,164.3
35:       PT209=POINT/42.2,-115.9,154.3
36:       PT210=POINT/41.4,-113.8,144.0
37:       PT211=POINT/40.3,-110.7,133.9
38:       PT212=POINT/39.5,-108.6,123.6
39:       PT213=POINT/38.2,-104.9,113.7
40:       PT214=POINT/36.9,-101.3,102.4
41:       PT215=POINT/35.5,-97.6,92.0
42:       PT216=POINT/34.2,-94.0,81.1
43:       PT217=POINT/32.9,-90.4,70.6
44:       SPL2=SPCURV/$
45:       PT200,PT201,PT202,PT203,PT204,PT205,PT206,PT207,$
46:       PT208,PT209,PT210,PT211,PT212,PT213,PT214,PT215,$
47:       PT216,PT217
48:       PT300=POINT/63.3,-109.7,246.7
49:       PT301=POINT/64.2,-111.3,236.2
50:       PT302=POINT/64.7,-112.0,226.0
51:       PT303=POINT/65.5,-113.5,215.4
52:       PT304=POINT/65.3,-113.1,205.0
53:       PT305=POINT/64.4,-111.6,194.5
54:       PT306=POINT/63.9,-110.7,184.5
55:       PT307=POINT/63.3,-109.7,174.3
56:       PT308=POINT/62.8,-108.7,164.3
57:       PT309=POINT/61.7,-106.8,154.3
58:       PT310=POINT/60.6,-104.9,144.0
59:       PT311=POINT/59.4,-103.0,133.9
60:       PT312=POINT/57.8,-100.1,123.6
61:       PT313=POINT/56.4,-97.7,113.7
62:       PT314=POINT/54.4,-94.3,102.4
63:       PT315=POINT/52.6,-91.0,92.0
```

図５．８　壺形状計測結果のＣＡＤ入力データの一部

```
 1: $$  GRAPL PROGRAM SARA
 2: $$
 3:      METRIC/
 4:     SPL1=SPCURV/PT16367
 5:     PT210=POINT/5.0,116.1,56.9
 6:     PT212=POINT/5.0,103.9,57.7
 7:     PT213=POINT/5.0,91.7,57.2
 8:     PT215=POINT/5.0,79.2,57.0
 9:     SPL2=SPCURV/$
10:     PT210,PT212,PT213,PT215
11:     PT309=POINT/10.0,128.2,56.4
12:     PT310=POINT/10.0,116.1,56.9
13:     PT312=POINT/10.0,103.9,56.7
14:     PT313=POINT/10.0,91.7,56.2
15:     PT315=POINT/10.0,79.2,57.0
16:     PT316=POINT/10.0,67.3,57.0
17:     SPL3=SPCURV/$
18:     PT309,PT310,PT312,PT313,PT315,PT316
19:     PT407=POINT/15.0,140.5,57.3
20:     PT409=POINT/15.0,128.1,57.3
21:     PT410=POINT/15.0,116.2,56.0
22:     PT412=POINT/15.0,104.0,54.8
23:     PT413=POINT/15.0,91.7,54.2
24:     PT415=POINT/15.0,79.2,56.0
25:     PT416=POINT/15.0,67.3,57.0
26:     PT418=POINT/15.0,55.2,57.3
27:     SPL4=SPCURV/$
28:     PT407,PT409,PT410,PT412,PT413,PT415,PT416,PT418
29:     PT506=POINT/20.0,153.1,56.5
30:     PT507=POINT/20.0,140.6,56.4
31:     PT509=POINT/20.0,128.3,55.5
32:     PT510=POINT/20.0,116.4,53.3
33:     PT512=POINT/20.0,104.1,51.9
34:     PT513=POINT/20.0,91.7,52.2
35:     PT515=POINT/20.0,79.2,53.1
36:     PT516=POINT/20.0,67.1,55.2
37:     PT518=POINT/20.0,55.2,57.3
38:     PT519=POINT/20.0,43.1,57.3
39:     SPL5=SPCURV/$
40:     PT506,PT507,PT509,PT510,PT512,PT513,PT515,PT516,$
41:     PT518,PT519
42:     PT606=POINT/25.0,153.1,56.5
43:     PT607=POINT/25.0,140.8,55.5
44:     PT609=POINT/25.0,128.7,52.7
45:     PT610=POINT/25.0,116.6,50.6
46:     PT612=POINT/25.0,104.2,50.0
47:     PT613=POINT/25.0,91.7,49.2
48:     PT615=POINT/25.0,79.2,50.1
49:     PT616=POINT/25.0,66.9,53.4
50:     PT618=POINT/25.0,55.0,55.5
51:     PT619=POINT/25.0,43.1,57.3
52:     SPL6=SPCURV/$
53:     PT606,PT607,PT609,PT610,PT612,PT613,PT615,PT616,$
54:     PT618,PT619
55:     PT706=POINT/30.0,153.1,56.5
56:     PT707=POINT/30.0,141.1,53.6
57:     PT709=POINT/30.0,129.0,50.9
58:     PT710=POINT/30.0,116.8,48.7
59:     PT712=POINT/30.0,104.3,47.0
60:     PT713=POINT/30.0,91.7,46.5
61:     PT715=POINT/30.0,79.2,48.2
62:     PT716=POINT/30.0,66.7,50.6
63:     PT718=POINT/30.0,54.9,53.6
```

図５．９　皿形状計測結果のＣＡＤ入力データの一部

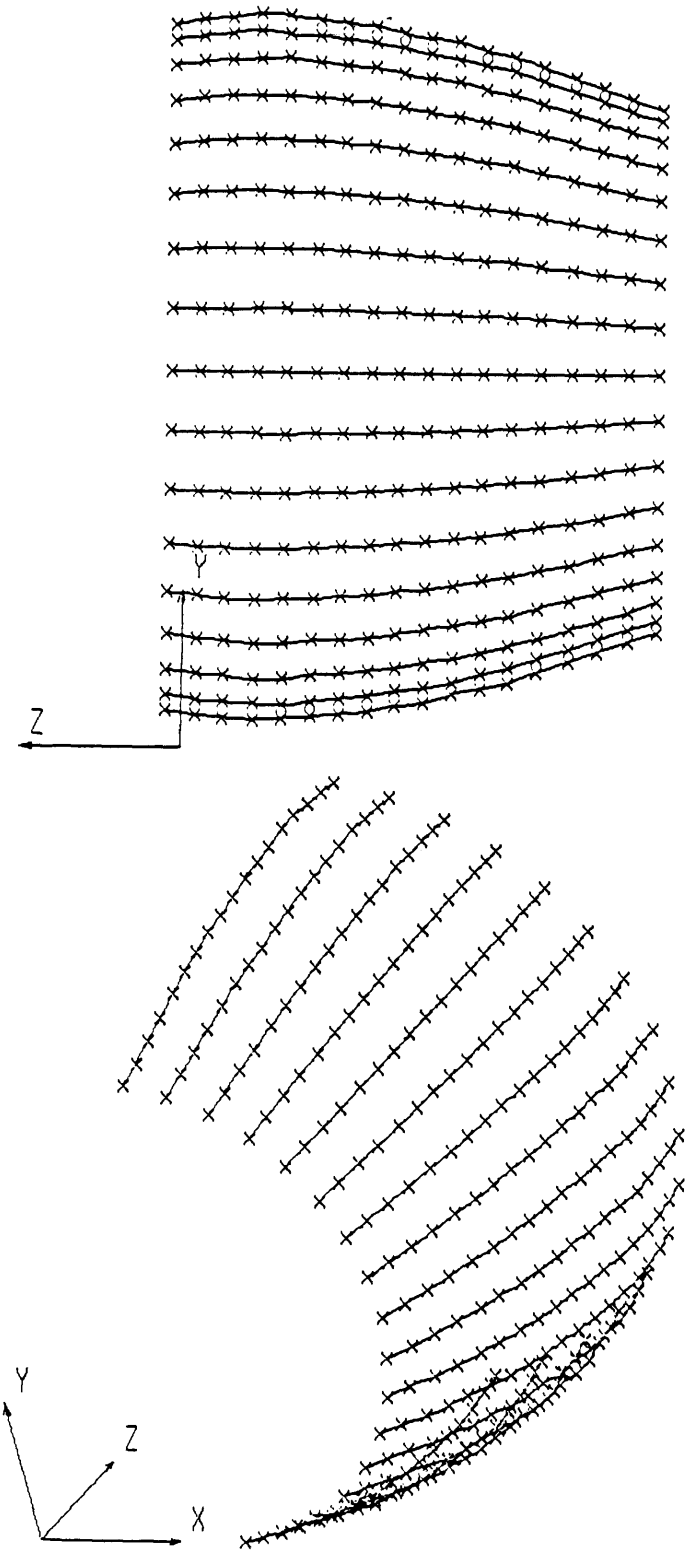


図５．１０　壺形状の復元（その１）

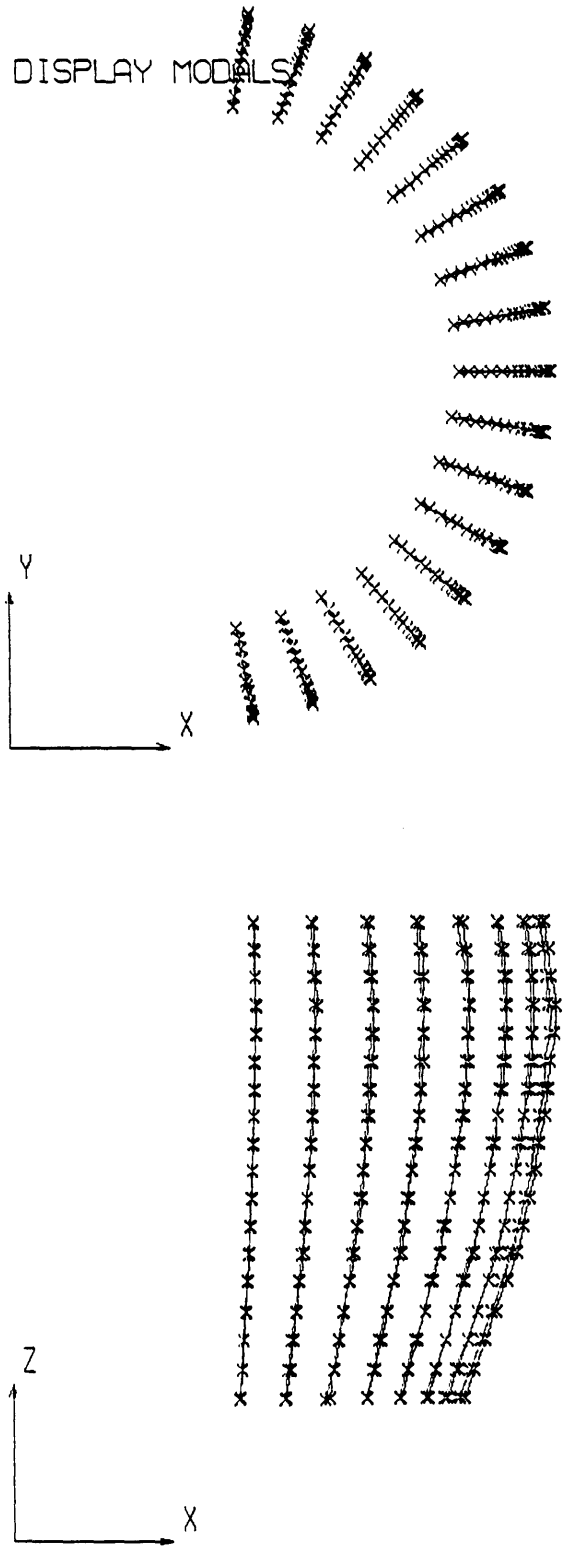


図５．１０　壺形状の復元（その２）

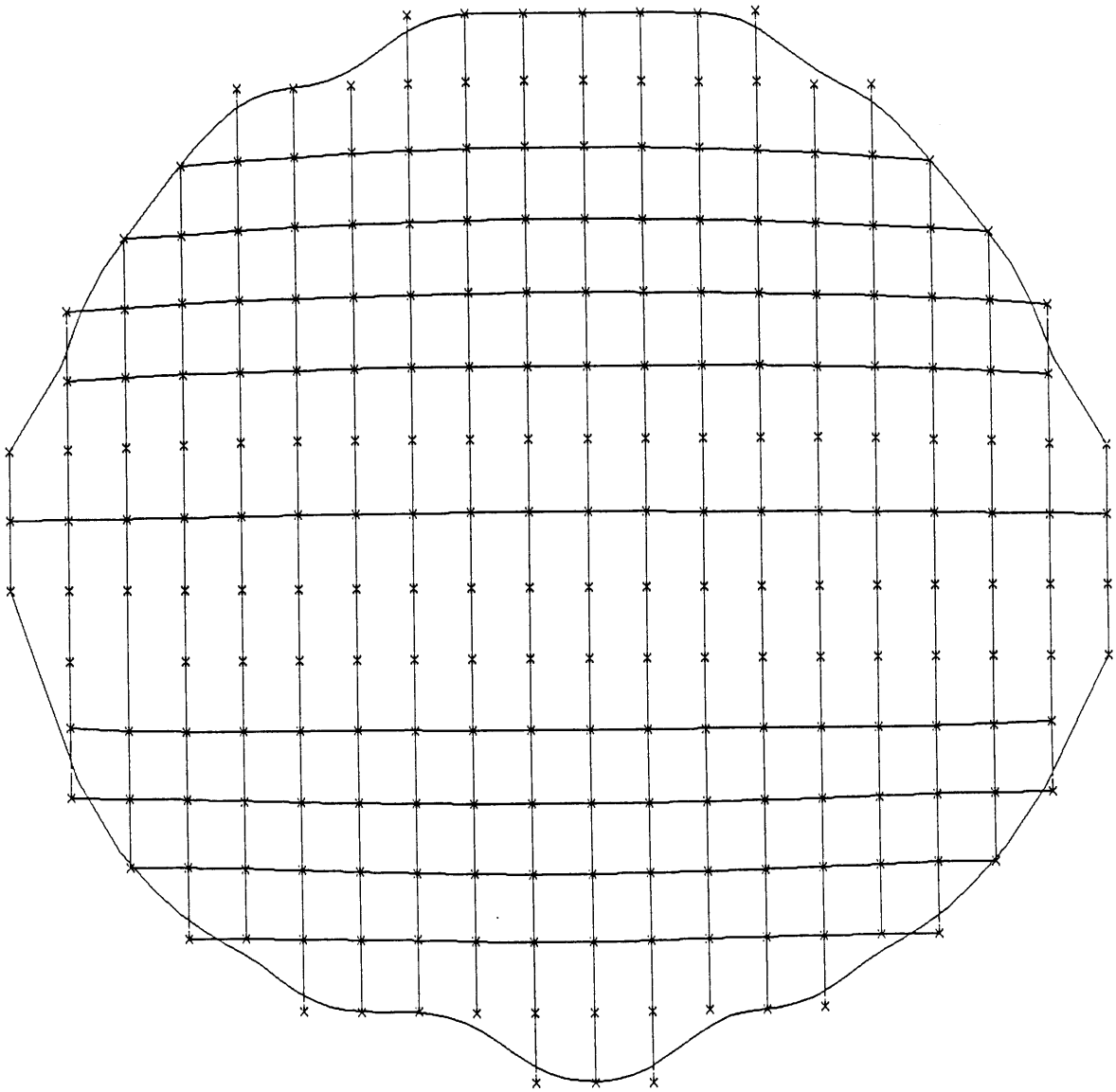


図５．１１　皿形状の復元

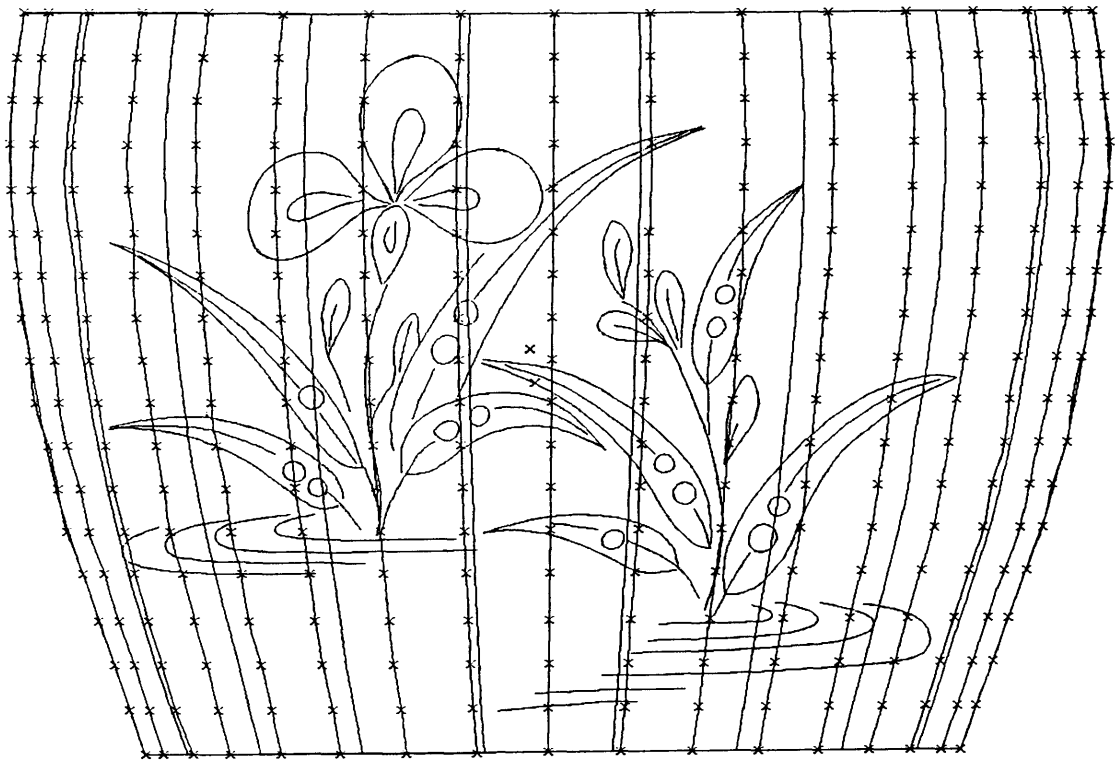


図５．１２　壺上に描画するデザインの位置合わせ

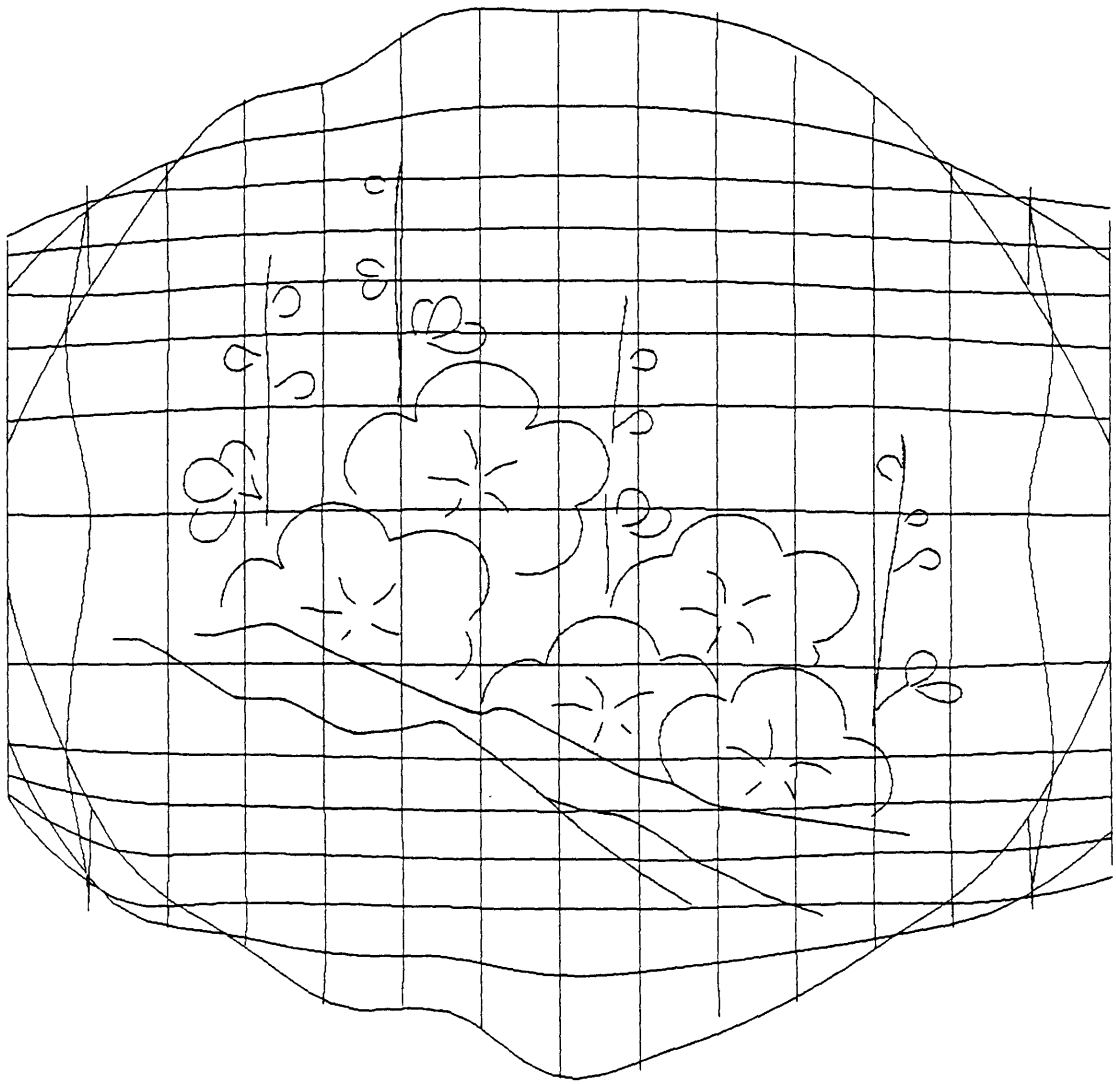


図５．１３　皿上に描画するデザインの位置合わせ

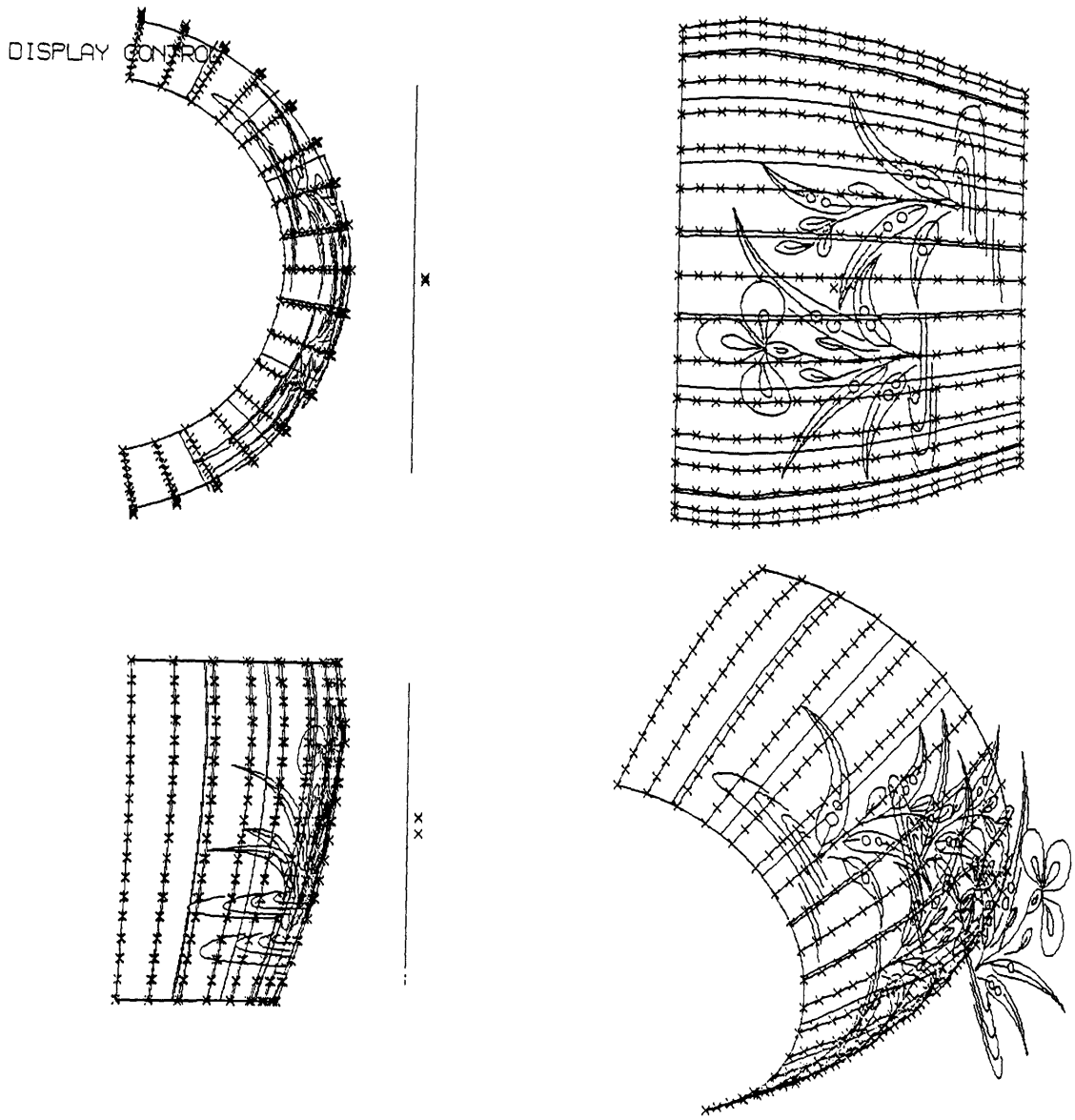


図５．１４　壺へのデザインの投影結果

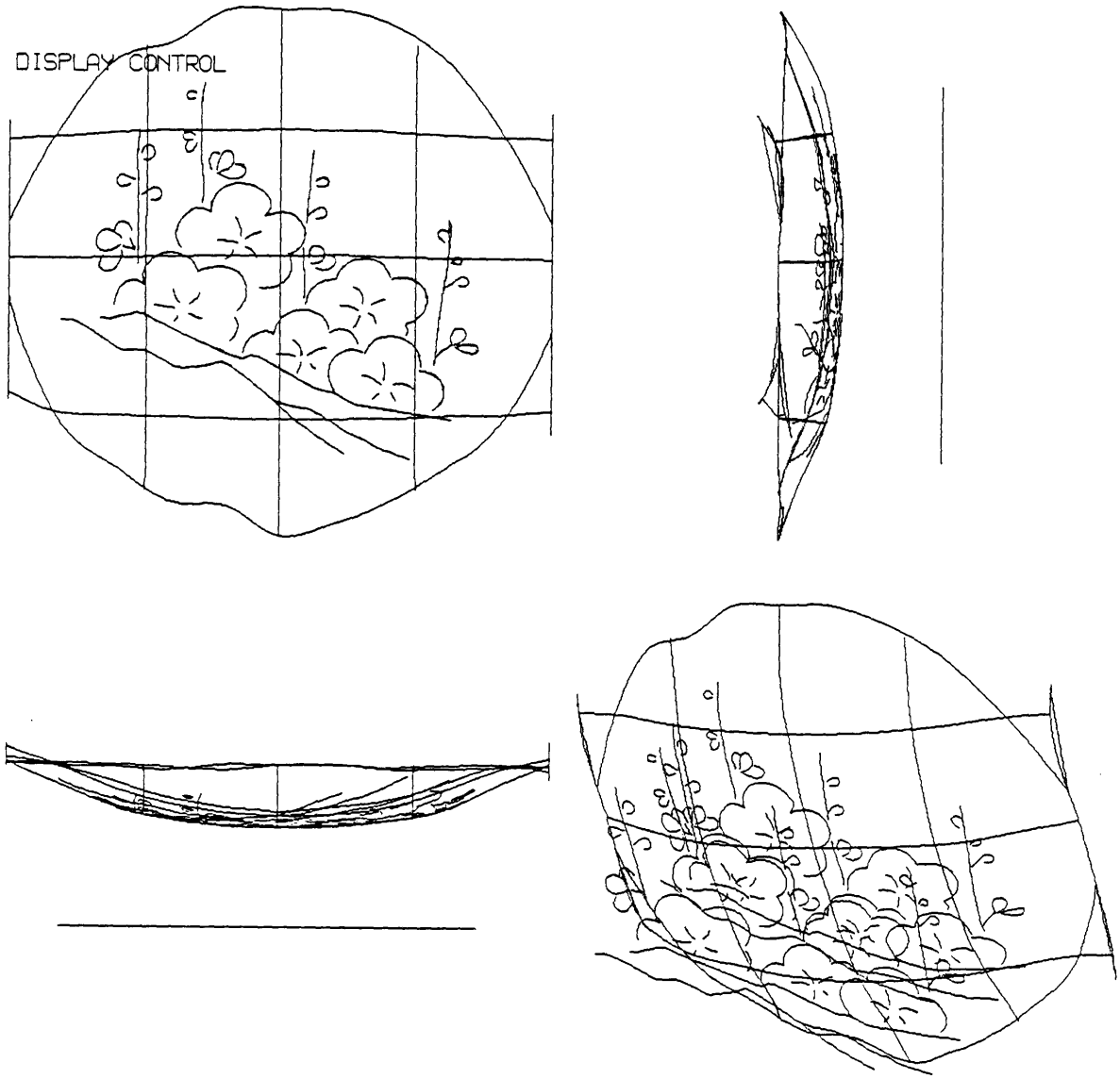


図５．１５　皿へのデザインの投影結果

```
 1: PARTNOhana2
 2: %
 3: N001G90
 4: N002G17G01X100000Y-54989Z113659
 5: N003X98121
 6: N004X93584Y-62276Z113703
 7: N005X86765Y-71592Z113700
 8: N006X77305Y-81696Z113825
 9: N007X67744Y-90034Z114445
10: N008X59084Y-96352Z115542
11: N009X53212Y-99911Z116997
12: N010X52582Y-100787Z118750
13: N011X54339Y-100467Z120350
14: N012X57483Y-99289Z121700
15: N013X63204Y-96562Z123164
16: N014X71450Y-91954Z124919
17: N015X100000
18: N016Y-43214Z116116
19: N017X105557
20: N018X97858Y-56991Z116204
21: N019X91528Y-66960Z116332
22: N020X85071Y-75278Z116552
23: N021X78636Y-82185Z116944
24: N022X73332Y-87254Z117647
25: N023X70834Y-89973Z119144
26: N024X71641Y-90356Z121235
27: N025X74489Y-88958Z122895
28: N026X78308Y-86243Z124251
29: N027X82941Y-82225Z125441
30: N028X89187Y-75789Z126602
31: N029X100000
32: N030Y-17144Z119262
33: N031X113952
34: N032X107885Y-39721Z118800
35: N033X100852Y-53880Z118721
36: N034X93623Y-65840Z118976
37: N035X87116Y-75035Z119766
38: N036X84961Y-78367Z121408
39: N037X85455Y-78718Z123195
40: N038X87224Y-77401Z124735
41: N039X89516Y-75103Z125668
42: N040X92390Y-71777Z126370
43: N041X96003Y-67275Z127069
44: N042X100454Y-61151Z127738
45: N043X100000
46: N044Y-21986Z121859
47: N045X113705
48: N046X111814Y-29709Z121802
49: N047X109173Y-38267Z121680
50: N048X105545Y-46999Z121615
51: N049X101817Y-54540Z121851
52: N050X98588Y-60573Z122390
53: N051X96831Y-63960Z123196
54: N052X96757Y-64722Z124234
55: N053X97486Y-64200Z125205
56: N054X98793Y-62707Z126042
57: N055X100946Y-59834Z126872
58: N056X103803Y-55383Z127758
59: N057X100000
60: N058Y-40626Z123323
61: N059X108791
62: N060X111106Y-39893Z129154
63: N061X112578Y-39888Z133373
```

図５．１６　壺へ描画するデザインのＣＡＤ出力データの一部

```
 1: PARTNOsara1
 2: %
 3: N001G90
 4: N002G17G01X48173Y81884Z100000
 5: N003Z51431
 6: N004X49612Z50732
 7: N005X51051Z50068
 8: N006X52490Z49418
 9: N007X54201Y81025Z48778
10: N008X55937Y80089Z48137
11: N009X57673Y79152Z47499
12: N010X60988Y76959Z46488
13: N011X64620Y74515Z45557
14: N012X68252Y72071Z44500
15: N013X71284Y71460Z43566
16: N014X74117Z42998
17: N015X76950Z42520
18: N016X80285Y70120Z42163
19: N017X83871Y68110Z41306
20: N018X87457Y66100Z40501
21: N019X90603Y65409Z39787
22: N020X93436Y65660Z39350
23: N021X96268Y65912Z38997
24: N022X98895Y66323Z38708
25: N023X101316Y66894Z38377
26: N024X103737Y67465Z37990
27: N025X106377Y66903Z37765
28: N026X109324Y64756Z37869
29: N027X112271Y62609Z38082
30: N028X115133Y60424Z38261
31: N029X117829Y58163Z38408
32: N030X120524Y55901Z38566
33: N031X123111Y53697Z38859
34: N032X125372Y51664Z39305
35: N033X127634Y49631Z39907
36: N034X129994Y47579Z40649
37: N035X132849Y45432Z41676
38: N036X135704Y43285Z42789
39: N037X138565Y41161Z43939
40: N038X141489Y39288Z44987
41: N039X144413Y37415Z46041
42: N040X147337Y35542Z47162
43: N041Z100000
44: N042X122546Y54205
45: N043Z38777
46: N044X125274Y53285Z38924
47: N045X128001Y52365Z39175
48: N046X131434Y51698Z39536
49: N047X134983Y51073Z40081
50: N048X138087Y49721Z40881
51: N049X141012Y48078Z41776
52: N050X143749Y46266Z42667
53: N051X146346Y44326Z43621
54: N052X149154Y42627Z44551
55: N053X152243Y41246Z45322
56: N054X155192Y39847Z46205
57: N055X157788Y38401Z47264
58: N056X160690Y36927Z48631
59: N057X165424Y35283Z50922
60: N058X170156Y33640Z53139
61: N059Z100000
62: N060X62117Y82729
63: N061Z45044
```

図５．１７　皿へ描画するデザインのＣＡＤ出力データの一部

```
 1: TUBO_HANA_PRINT2
 2: G90
 3: G92X0.Y0.Z0.A0.
 4: G01 F1000
 5: Y 270.500
 6: Z 465.17
 7: X292.39 Z465.17 A10.275
 8: X292.40 Z465.19 A9.653
 9: X292.41 Z465.22 A9.056
10: X292.42 Z465.25 A8.483
11: X292.44 Z465.29 A7.758
12: X292.46 Z465.34 A7.077
13: X292.48 Z465.40 A6.439
14: X292.50 Z465.47 A5.844
15: X292.53 Z465.56 A5.159
16: X292.56 Z465.66 A4.511
17: X292.60 Z465.75 A3.859
18: X292.64 Z465.83 A3.202
19: X292.68 Z465.92 A2.541
20: X292.73 Z466.00 A1.875
21: X292.78 Z466.07 A1.205
22: X292.83 Z466.15 A0.529
23: X292.89 Z466.22 A-0.168
24: X292.91 Z466.29 A-0.777
25: X292.91 Z466.38 A-1.436
26: X292.93 Z466.49 A-2.145
27: X292.95 Z466.58 A-2.710
28: X292.97 Z466.67 A-3.303
29: X293.00 Z466.78 A-3.925
30: X293.04 Z466.89 A-4.576
31: X293.09 Z467.01 A-5.256
32: X293.14 Z467.14 A-5.965
33: X293.19 Z467.28 A-6.705
34: X244.53 Z467.28 A-4.531
35: X244.96 Z463.19 A-1.281
36: X291.73 Z463.19 A-1.861
37: X291.74 Z463.13 A-1.301
38: X291.75 Z463.05 A-0.484
39: X291.70 Z462.97 A0.304
40: X291.64 Z462.90 A1.063
41: X291.59 Z462.84 A1.792
42: X291.55 Z462.78 A2.493
43: X291.52 Z462.72 A3.165
44: X291.49 Z462.67 A3.809
45: X291.47 Z462.63 A4.426
46: X291.45 Z462.59 A5.014
47: X291.44 Z462.55 A5.573
48: X291.43 Z462.51 A6.276
49: X291.42 Z462.48 A6.928
50: X291.41 Z462.46 A7.530
51: X291.40 Z462.44 A8.213
52: X291.40 Z462.44 A8.817
53: X291.40 Z462.45 A9.395
54: X291.40 Z462.45 A10.019
55: X291.40 Z462.44 A10.697
56: X291.40 Z462.44 A11.274
57: X291.40 Z462.43 A11.884
58: X291.40 Z462.42 A12.527
59: X291.39 Z462.41 A13.202
60: X291.39 Z462.39 A13.911
61: X291.38 Z462.38 A14.465
62: X291.38 Z462.37 A15.037
63: X291.37 Z462.35 A15.629
```

図５．１８　壺へ描画するデザインのＮＣデータの一部

```
 1: SARA_UME_PRINT
 2: G90
 3: G92X0.Y0.Z0.
 4: G01 F1000
 5: X56.40 Y312.03
 6: Z515.22
 7: X58.14 Y311.09 Z515.86
 8: X59.87 Y310.15 Z516.50
 9: X63.19 Y307.96 Z517.51
10: X66.82 Y305.52 Z518.44
11: X70.45 Y303.07 Z519.50
12: X73.48 Y302.46 Z520.43
13: X76.32 Y302.46 Z521.00
14: X79.15 Y302.46 Z521.48
15: X82.49 Y301.12 Z521.84
16: X86.07 Y299.11 Z522.69
17: X89.66 Y297.10 Z523.50
18: X92.80 Y296.41 Z524.21
19: X95.64 Y296.66 Z524.65
20: X98.47 Y296.91 Z525.00
21: X101.10 Y297.32 Z525.29
22: X103.52 Y297.89 Z525.62
23: X105.94 Y298.47 Z526.01
24: X108.58 Y297.90 Z526.24
25: X111.52 Y295.76 Z526.13
26: X114.47 Y293.61 Z525.92
27: X117.33 Y291.42 Z525.74
28: X120.03 Y289.16 Z525.59
29: X122.72 Y286.90 Z525.43
30: X125.31 Y284.70 Z525.14
31: X127.57 Y282.66 Z524.70
32: X129.83 Y280.63 Z524.09
33: X132.19 Y278.58 Z523.35
34: X135.05 Y276.43 Z522.32
35: X137.90 Y274.29 Z521.21
36: X140.77 Y272.16 Z520.06
37: X143.69 Y270.29 Z519.01
38: X146.61 Y268.42 Z517.96
39: X149.54 Y266.54 Z516.84
40: X149.54 Y266.54 Z464.00
41: X124.75 Y285.21 Z464.00
42: X124.75 Y285.21 Z525.22
43: X127.47 Y284.29 Z525.08
44: X130.20 Y283.37 Z524.83
45: X133.63 Y282.70 Z524.46
46: X137.18 Y282.07 Z523.92
47: X140.29 Y280.72 Z523.12
48: X143.21 Y279.08 Z522.22
49: X145.95 Y277.27 Z521.33
50: X148.55 Y275.33 Z520.38
51: X151.35 Y273.63 Z519.45
52: X154.44 Y272.25 Z518.68
53: X157.39 Y270.85 Z517.80
54: X159.99 Y269.40 Z516.74
55: X162.89 Y267.93 Z515.37
56: X167.62 Y266.28 Z513.08
57: X172.36 Y264.64 Z510.86
58: X172.36 Y264.64 Z464.00
59: X64.32 Y313.73 Z464.00
60: X64.32 Y313.73 Z518.96
61: X66.10 Y313.66 Z519.66
62: X68.05 Y313.66 Z520.42
63: X72.28 Y314.72 Z522.07
```

図５．１９　皿へ描画するデザインのＮＣデータの一部

図５．２０　壺への描画風景

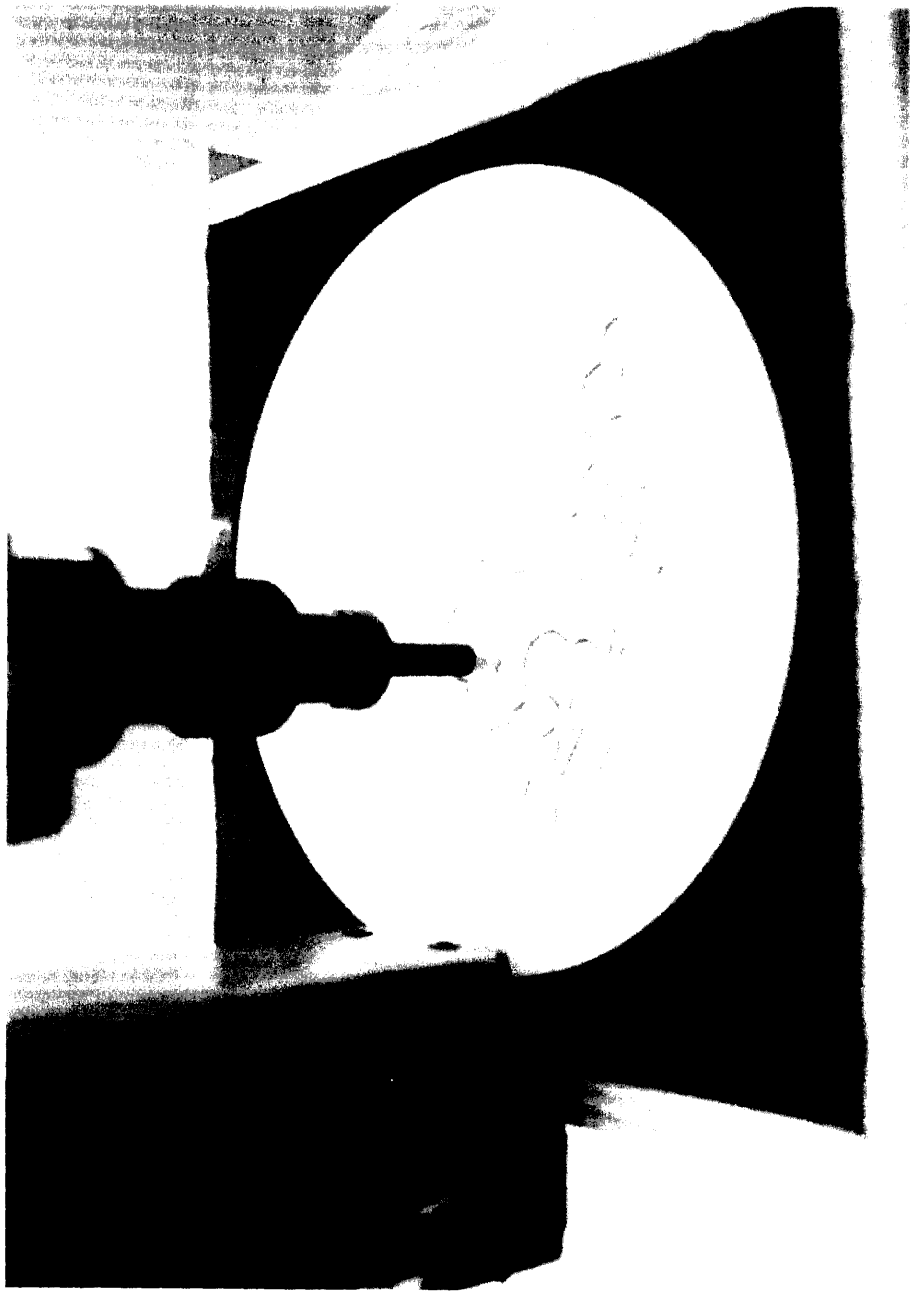


図５．２１　皿への描画風景

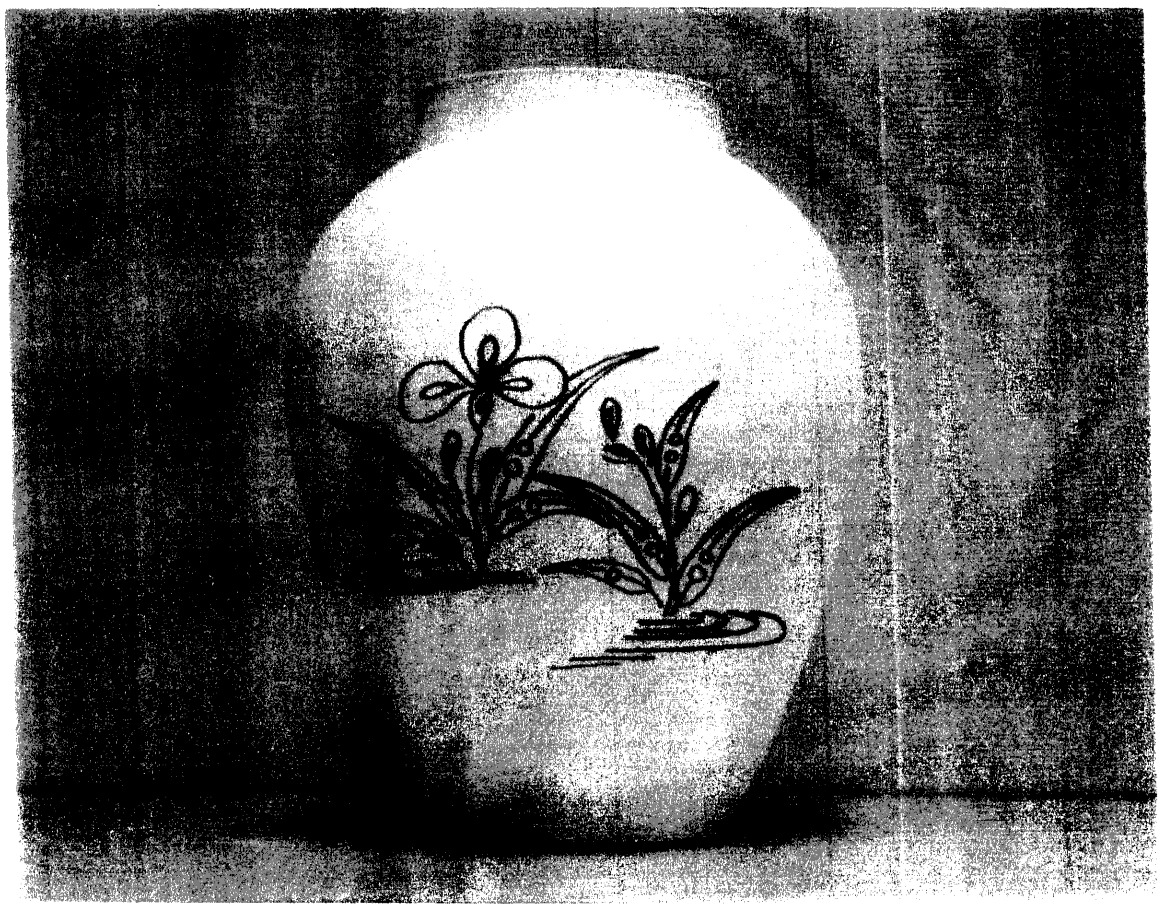


図５．２２　壺への描画結果

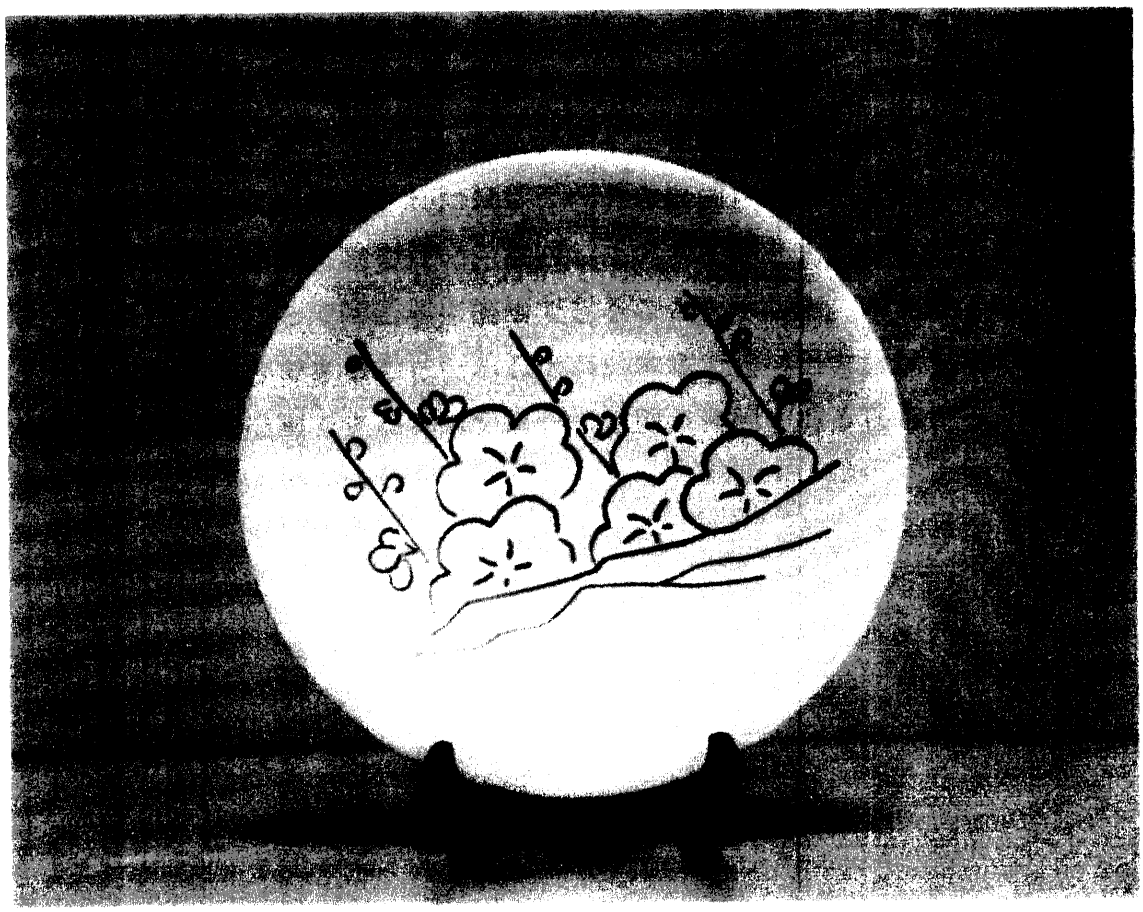


図５．２３　皿への描画結果

５．５　むすび

本章では、陶磁器への描画を実現するためのシステムについて提案した。陶磁器への描画を実現するために、本章では機械加工の分野で一般に利用されているＣＡＤシステムを用い、ＣＡＤから出力されるＮＣデータを用いる方法を提案した。まず、ＣＡＤ上に描画対象の形状を作成することが必要であったので、描画対象の陶磁器の形状を第４章で示した計測システムにより計測し、計測結果をＣＡＤへ入力する方法を示した。ついで、入力された計測データを用いてＣＡＤ上に描画対象の陶磁器を復元する方法を示した。また、描画デザインのＣＡＤへの入力方法を示し、入力したデザインをＣＡＤの機能を用いて陶磁器曲面へ投影した。投影されたデザインについて、デザインを構成している線の軌跡をＮＣデータとして出力した。出力されたＮＣデータを描画ロボットで動作するためのＮＣデータに変換し描画実験を行い、意図したデザインを人間が写しかえるのと同じように自然なかたちで陶磁器に描画できることを示した。本実験では、陶磁器にデザインを線描きできることを示したが、本章で述べた方法は本来の絵付けと同様に色を用いて描画できるシステムへの拡張が可能であると考える。

第６章

結論

本論文は、画像処理技術の産業界への応用の観点から、牛枝肉等級の自動判定と陶磁器への描画の自動化について研究した結果をまとめたものである。　本研究によって得られた研究成果の概要は以下のとおりである。

第１章では、本研究の背景と扱っている問題を示し、あわせて論文の概要について述べた。

第２章では、牛枝肉の肉質の中で最も重要とされている脂肪交雑に基づく等級付けを画像処理とニューラルネットワーク及び重回帰分析を用いて実現する方法を提案した。ニューラルネットワークにより肉画像を２値化（脂肪領域とその他の領域）し、２値化画像を処理して等級と相関の高い２つの変量を求め、等級とその変量との関係式（重回帰式）を作った。重回帰式を用いて求めた等級が格付員のものとよく一致することを示した。

第３章では、牛枝肉の肉質の格付けをテクスチャ解析により行う方法を提案した。テクスチャ解析手法として濃度共起行列を用い、提案した手法により求めた等級が格付員のものとよく一致することを示した。

第４章では、陶磁器形状を３次元的に計測するシステムを提案した。２種類の計測システムを提案し、さまざまな形状の陶磁器を計測可能にした。そこでは２つのカメラを用いて、簡便に死角を改善する方法をも示した。

第５章では、陶磁器への描画システムを提案した。４章で述べた計測システムにより陶磁器を計測し、その計測データと３次元ＣＡＤを用いて描画すべき絵画のＮＣ（数値制御）データを作成し、ＮＣ描画装置により陶磁器への描画を可能

にした。

本論文では、熟練した専門家の目視により行われている牛枝肉の等級判定の自動化ならびに専門家が行っている陶磁器への描画の自動化を実現する方法について述べた。牛枝肉の等級判定については、肉質を決定する最重要な要因である脂肪交雑に着目して自動化を試みたが、その他にも肉質を決定する要因はある。今後その他の要因についても検討を加え、総合的な等級判定システムの開発が必要であろう。陶磁器への自動描画については、本来の絵付けと同様に色を用いて描画できるシステムへの発展を期す必要がある。

これからも熟練した専門家により行われている作業の自動化の期待は大きい。

画像処理の産業応用は、多くの分野で成功を収めているとは言え、産業用に開発された視覚は、まだ人間の目と比較して決定的な差異が数多く認められる。過去に考えられた用途のすべてにおいて、画像処理の応用が容易に実現したわけでは決してなく、むしろ、外界の環境の整備、対象の設計変更、アルゴリズムの工夫などとも組み合わせて、実用化へのいばらの道を切り開かれてきたというのが実状であろう。”機械の目”に対する要求は、ますます高度になることは容易に想像できる。今後も引き続き視覚技術のあらゆる部分で挑戦的な研究が望まれる。

特に、ものの形を３次元的に計測する技術は、人間の視覚では定量的に示すことができない部分であるので、さらに３次元計測システムが構造的にコンパクトになり、たとえば３次元計測用ＬＳＩという形で実現できれば、人間の視覚にはない新しい視覚技術の実現ともなろう。

本論文で述べた事柄が、画像処理技術の産業界への応用に関して、いささかなりとも寄与すれば幸いである。

謝辞

本研究を遂行し、また、まとめるにあたり、多くの方々に御指導、御助言及び御鞭撻を頂きました。深く感謝いたします。

九州芸術工科大学 芸術工学部 画像設計学科 瀧山龍三教授には、本研究を進めるにあたり、終始御指導いただきました。本研究の核となる部分は、瀧山教授の議論と指導なくしては、成り立ち得なかったものです。

本論文の作成にあたっては、九州芸術工科大学 浦浜喜一教授　長島健次教授　福島重廣教授に懇切な御指導と御鞭撻を賜りました。

九州芸術工科大学 坂本博康講師、小野直樹助手には、有効適切な御意見と御助言を賜りました。

佐賀県工業技術センター 石鉢高雄所長には、本研究の機会を与えていただきました。

以上、御指導、御協力頂いた方々に対し、あらためて深謝いたします。

参考文献

（１）江尻正員：”工業用画像処理”，昭晃堂，（昭和６３）．

（２）高木幹雄，坂上勝彦：”画像処理の基礎技術”，テレビジョン学会誌，Vol. 41, No. 10, pp. 863-871, (1987).

（３）Kenneth R. Castleman:"Digital Image Processing", Prentice-Hall Inc. , (1979).

（４）Rafael C. Gonzales and Paul Wints:"Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company(1987).

（５）L. P. Yaroslavsky:"Digital Picture Processing", Springer-Verlag Berlin Heiderberg (1984).

（６）R. Michael Hord:"Digital Image Processing of Remotely Sensed Data", Academic Press(1982).

（７）今里悠一，大橋昭南：”医用画像処理”，昭晃堂，（1993）．

（８）的崎健，周藤安造：”医用画像処理”，コロナ社，（1986）．

（９）中本雅志，村上正憲，山田博章，小野良樹：”濃度レベル差分法による超音波断層画像からの肝疾患評価の試み”，1993年電子情報通信学会春季大会講演論文集，pp. 7-193，（1993）．

(10) Michael P. Ekstrom:"Digital Image Processing Techniques", Academic Press(1984).

(11) Tzay Y. Young and King-Sun Fu:"Handbook of Pattern Recognition and Image Processing", Academic Press(1986).

(12) 金山憲司：”道路交通システムにおける画像認識の現状と技術課題”，電子情報通信学会技術報告, PRMU97-32, pp. 57-64, （1997）.

(13) 高橋一哉, 北村忠明, 小林芳樹：”画像処理による交通流監視方法の研究”，電子情報通信学会技術報告, PRMU97-6, pp. 41-48, （1997）.

(14) 早船一弥, 渡辺武司：”運転支援システムにおける走行環境認識の現状と課題”，電子情報通信学会技術報告, PRMU97-33, pp. 65-72, （1997）.

(15) 森秀太郎, 中山善博, 渡辺茂幸, 井上繁夫, 舟橋淳：”きゅうり選別箱詰システムの開発”，日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 '95講演論文集（Vol. B）, pp. 1061-1063, （1995）.

(16) 滝沢恒治, 平林守男, 半田一郎, 向井文章, 永田博俊：”パターン計測応用の新形果実野菜選別システム”，三菱電機技報, Vol. 10, No. 10, pp. 72-77, （1982）.

(17) 小平俊実, 鈴木洋二, 小室明夫, 山村辰男, 一川邦夫：”農産物選別におけるビデオセンサの応用”，富士時報, Vol. 56, No. 9, pp. 614-619, （1983）.

(18) 島立征夫, 野村良忠, 井出俊之, 伊藤修學：”パターン計測技術応用の魚種魚体自動選別装置”，三菱電機技報, Vol. 56, No. 3, （1982）.

(19) 目視検査の自動化技術調査委員会編：”画像処理による目視検査の自動化事例集”，株式会社新技術コミュニケーションズ, （平成２）.

(20) 石井明，加藤章，加藤純一，木村美記夫，輿水大和，竹本正勝，角田興俊，

行田尚義，橋本憲慶，星野弘，水庭佳弘，森本吉春，矢ケ崎隆義：”視覚検査に関する技術動向調査報告書”，精密工学会画像応用技術専門委員会視覚検査に関する技術動向調査ワーキング・グループ，(1992).

(21) 田村秀行編：”コンピュータ画像処理（応用実践編）第１巻”，総研出版，(1990).

(22) 田村秀行編：”コンピュータ画像処理（応用実践編）第２巻”，総研出版，(1990).

(23) 田村秀行編：”コンピュータ画像処理（応用実践編）第３巻”，総研出版，(1990).

(24) 輿水大和：”産業応用からみた画像処理アルゴリズムの動向”，画像処理アルゴリズムの最新動向，別冊O plus E，新技術コミュニケーションズ，pp. 172-187，（1986）.

(25) 本多庸悟編：”画像処理と視覚認識”，オーム社，（1995）.

(26) 長田典子，亀井光仁，赤根正樹，中島紘之：”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，pp. 89-92，（1991）.

(27) 谷水克行：”カラー印刷画像の色調目視判定の自動化”，精密工学会第４回外観検査の自動化ワークショップ，pp. 32-37，（1992）.

(28) 社団法人日本食肉格付協会：”新しい牛枝肉取引規格”，(1988).

(29) 口田圭吾，八巻邦次，山岸敏宏：”画像解析による牛枝肉評価法の確立とその応用”，畜産の研究，Vol. 47, No. 4, pp. 505-507(1993).

(30) 白仁田和彦：”画像解析による牛枝肉評価の一検討”，日本機械学会九州支部長崎地方講演会講演予稿集”，No. 958-2, pp. 161-162(1995)

(31) 白仁田和彦, 宮島恒晴, ”画像処理を用いた牛枝肉評価のための特徴抽出” 平成７年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集”，pp. 686(1995).

(32) 大津展之：”判別および最小２乗基準に基づく自動しきい値選定法”，電子通信学会論文誌（Ｄ), Vol. 56-D, No. 11, pp. 662-669, (1980).

(33) 森田英毅, 渡辺大和：”陶磁器の絵付け装置” 公開特許公報（平1-313380), (1989).

(34) Jarvis, R. A. :"A perspective on range finding techniques for computer vision", IEEE Trans. , Vol. PAMI-5, no. 2, pp. 122-139(1983).

(35) R. A. Jarvis:"A laser time-of-flight range scanner for robot vision", IEEE Transaction, vol. PAMI-5, No. 5, pp. 505-512(1983).

(36) D. Nitzan, A. E. Brain and R. O. Duda:"The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis", Proceedings IEEE, vol. 65, No. 2, pp. 206-219(1977).

(37) M. Rioux:"Laser range finder based on synchronized scanners", Applied Optics, vol. 23, No. 21, pp. 3837-3844(1984)

(38) O. D. Faugeras and E. Pauchon:"Measuring the shape of 3-D objects", Proc. CVPR, pp. 2-7(1983).

(39) 小川洋司, 田中芳夫, 白仁田和彦：”カラー画像認識機能を有する簡易ロボ

ット”, 第18回画像工学コンファレンス論文集, pp. 307-310(1987).

(40) 小川洋司, 田中芳夫, 白仁田和彦, 松田浩一郎 : ” PC9801によるムーブマスタの知能化”, 映像情報（産業開発機構株式会社）, Vol. 19, No. 24, pp. 59-66(1987).

(41) 井口征士, 佐藤宏介 : ” 三次元画像計測”, 昭晃堂, (1990).

(42) Y. Nishikawa and S. Inokuchi:"Range data entry techniques using a laser spot scanner and two linear solid-state image sensor", IEEE Trans. , vol. IM-30, no. 4, pp. 270-273(1981).

(43) 石松隆和, 田口喜祥, 落合積, 大幡高之 : ” 三次元形状計測の高速化の一手法”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 57, No. 538, pp. 1969-1973(1991).

(44) M. Oshima and Y. Shirai:"Object recognition using three-dimensional information", IEEE Transactions, Vol. PAMI-5, No. 4, pp. 353-361(1983).

(45) K. Sato and S. Inokuchi:"Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging", Journal of Robotic System, vol. 2, no. 1, pp27-39(1985).

(46) 荒木和男, 田中伸宜, 藤野智浩, 佐藤幸男 : ” 高速３次元計測装置”, 第18回画像工学コンファレンス論文集, pp. 201-204(1987).

(47) 五味睦子, 川原豊樹, 池谷和俊, 津田幸文, 三宮邦夫 : ” ＣＡＤ用三次元形状入力装置”, PRU91-87, pp. 71-78(1991).

(48) 西野治彦, 秋山健二, 小林幸雄 : ” 光切断法による３次元形状計測と形状再構成”, 電子情報通信学会論文誌 DII, Vol. J72-DII, No. 11, pp. 1778-1787 (1989)

(49) 井越昌紀：”ＣＡＤの機械設計への応用”，テレビジョン学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 530-533, (1987).

(50) 横山哲男：”ＮＣ加工”, pp. 28-51, 啓学出版 (1983).

(51) 白仁田和彦, 宮島恒晴, 瀧山龍三：”ニューラルネットワークと画像処理を用いた牛枝肉の等級格付け”, 平成８年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp. 881(1996).

(52) 白仁田和彦, 宮島恒晴, 瀧山龍三：”画像処理とニューラルネットワークによる牛枝肉の等級判定”, 電子情報通信学会技術報告, NC96-55, pp. 41-46 (1996).

(53) 白仁田和彦, 杉本信和、草津智幸：”ニューラルネットワークを用いた手書き数字認識システム” 平成８年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp. 882(1996).

(54) K.Shiranita,T.Miyajima,and R.Takiyama:"Grading meat quality by image processing and neural network techniques",Proceedings of 1996 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications(NOLTA'96) ,pp.437-440 (October 1996).

(55) R. M. Rumelhart:"Parallel Distributed Processing", vol. 1, The MIT Press, (1986)

(56) 菊池豊彦：”入門ニューロコンピュータ”, オーム社, pp. 17-52(1990).

(57) 白仁田和彦, 宮島恒晴, 瀧山龍三：”画像処理による牛枝肉の等級判定”, 日本機械学会論文集（Ｃ編）, Vol. 63, No. 614, pp. 204-209(1997).

(58) 菅民郎：”多変量解析の実践（上）”，現代数学社, pp. 26-85(1993).

(59) R. M. Pickett:"Visual Analysis of Texture in the Detection and Recognition of Objects" in Picture Processing and Psychopictorics, B. C. Lipkin and A. Rosenfeld, Eds. , Academic Press, New York, pp. 289-308, (1970).

(60) J. K. Hawkins:"Textural Properties for Pattern Recognition", in Picture Processing and Psychopictorics, B. S. Lipkin and A. Rosenfeld, Eds. , Academic Press, New York, pp. 347-370, (1970).

(61) H. R. Johnston et al. , "Rapid Cartographic Processing System Study", AD 454086, (October 1964).

(62) A. Rosenfeld:"Automatic Recognition of Basic Terrain Types from Aerial Photographs", Photogrammic Engineering, 28, 1, pp. 115-132, (March 1962).

(63) 富田文明, 白井良明, 辻三郎：”テクスチャの解析”，情報処理, Vol. 19, No. 2, pp. 173-182(1978).

(64) 高木幹雄, 下田陽久：”画像解析ハンドブック”，東京大学出版会, (1991).

(65) R. W. Conners and C. A. Harlow:"A Theoretical Comparison of Texture Algorithms", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-2, No. 3, pp. 204-222, (May 1980).

(66) J. S. Weszka, C. R. Dyer, and A. Rosenfeld:"A Comparative Study of Texture Measures for Terrain Classification", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-6, No. 4, pp. 269-285, (1976).

(67) R. M. Haralick, K. Shanmugam, and I. Dinstein:"Textural Features for Image

Classification", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-3, No. 6, pp. 610-621(1973).

(68) 瀧山龍三, 矢野啓司 : ” 共起行列に基づくテクスチャ画像の識別” , 電子情報通信学会技術報告, PRU91-148, pp. 15-22(1992).

(69) 梅田三千雄 : ” ＰＤＰモデルによるテクスチャ画像の識別” , 電子情報通信学会技術報告, PRU90-123, pp. 93-100(1991).

(70) 白仁田和彦, 宮島恒晴, 瀧山龍三 : ” テクスチャ解析による牛枝肉の等級判定” , 映像情報メディア学会誌, Vol. 51, No. 6, pp. 931-934(1997).

(71) 矢野啓司, 白仁田和彦, 瀧山龍三 : ” 輪郭線とテクスチャの統合情報による画像認識” , 映像情報メディア学会誌, Vol. 51, No. 6, pp. 935-939(1997).

(72) 白仁田和彦 : ” 画像計測による有田焼線描き工程の自動化” , 画像ラボ（日本工業出版）, Vol. 4, No. 7, pp. 43-46(1993).

(73) 白仁田和彦, 石松隆和 : ” 光切断法における校正、レンズ歪補正の簡易法及び３次元計測システムの開発” , 平成３年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp. 545(1991).

(74) 白仁田和彦 : ” ３次元画像計測の適用による有田焼線描き工程の自動化” , 画像の認識理解シンポジウム講演論文集（ MIRU'92), Vol. 2, pp. 113-118 (1992).

(75) 白仁田和彦 : ” 光切断法による陶磁器描画システムの開発” , 日本機械学会論文集（Ｃ編）, Vol. 61, No. 587, pp. 332-338(1995).

(76) 涌井良幸, 涌井貞美 : ” Ｃ言語グラフィック入門” , 誠文堂新光社, pp. 137-

144(1989).

(77) 白仁田和彦：”画像処理による陶磁器３次元計測下絵描画システム”，第８回ソフトウェアコンファレンス論文集, pp. 121-124(1992).

(78) K. Shiranita:"Development of sketching system of porcelain using slit-light method", Proceedings of 2nd Japan-France Congress on Mechatronics(International), vol. 2 of 2, pp. 633-636(1994).

(79) 株式会社唐津鉄工所：” NC-MATE4取扱説明書” (1987).

(80) 株式会社東芝：” ANVIL5000取扱説明書” (1987).

(81) 株式会社東芝：” ANVIL5000取扱説明書 GRAPL 編”, (1987).

図目次

2.1　牛脂肪交雑基準 15
2.2　牛枝肉のカラー画像の例 19
2.3　牛枝肉の８ビット白黒画像の例 20
2.4　牛枝肉の７ビット白黒画像の例 20
2.5　牛枝肉の６ビット白黒画像の例 21
2.6　牛枝肉の５ビット白黒画像の例 21
2.7　牛枝肉の４ビット白黒画像の例 22
2.8　牛枝肉の３ビット白黒画像の例 22
2.9　牛枝肉の２ビット白黒画像の例 23
2.10　牛枝肉の１ビット白黒画像の例 23
2.11　等級付け格差 26
2.12　脂肪パターンと筋肉パターンの例 28
2.13　ニューラルネットワークの構成 30
2.14　ニューラルネットワークにより得られた２値画像 31
3.1　変位 40
3.2　16階調の牛枝肉白黒画像の例 42
3.3　等級３の標準テクスチャ特徴ベクトル 43
3.4　等級４の標準テクスチャ特徴ベクトル 43
3.5　等級５の標準テクスチャ特徴ベクトル 44
3.6　等級６の標準テクスチャ特徴ベクトル 44
3.7　等級７の標準テクスチャ特徴ベクトル 45
3.8　等級８の標準テクスチャ特徴ベクトル 45
3.9　等級９の標準テクスチャ特徴ベクトル 46
3.10　等級10の標準テクスチャ特徴ベクトル 46
4.1　陶磁器の製造工程 53
4.2　回転系の計測システム 55
4.3　平板系の計測システム 56
4.4　回転系における絶対座標系とカメラ座標系との関係 59
4.5　平板系における絶対座標系とカメラ座標系との関係 60

4.6　校正用板 61
4.7　カメラ座標系のベクトル表現 62
4.8　コンピュータ画面の座標系 67
4.9　回転系での計測手順 71
4.10　回転系で計測する壺 72
4.11　壺の計測結果のコンピュータ表示 73
4.12　平板系での計測手順 74
4.13　平板系で計測する皿 75
4.14　皿の計測結果のコンピュータ表示 76
5.1　デザイン描画システムの構成 80
5.2　描画デザインのＮＣデータの作成手順 82
5.3　GRAPLによるスプライン曲線の記述例 84
5.4　描画デザインの線の入力 86
5.5　壺へ描画するために入力したデザイン 87
5.6　皿へ描画するために入力したデザイン 88
5.7　計測システムおよび描画システムの外観 91
5.8　壺形状計測結果のＣＡＤ入力データの一部 92
5.9　皿形状計測結果のＣＡＤ入力データの一部 93
5.10　壺形状の復元 94
5.11　皿形状の復元 96
5.12　壺上に描画するデザインの位置合わせ 97
5.13　皿上に描画するデザインの位置合わせ 98
5.14　壺へのデザインの投影結果 99
5.15　皿へのデザインの投影結果 100
5.16　壺へ描画するデザインのＣＡＤ出力データの一部 101
5.17　皿へ描画するデザインのＣＡＤ出力データの一部 102
5.18　壺へ描画するデザインのＮＣデータの一部 103
5.19　皿へ描画するデザインのＮＣデータの一部 104
5.20　壺への描画風景 105
5.21　皿への描画風景 106

5.22　壺への描画結果 107
5.23　皿への描画結果 108

表目次

2.1　格付員による等級付け結果 24
2.2　34種の肉画像の５つの変量値 33
2.3　変量間の相関係数 35
2.4　等級付け結果 36
3.1　等級付け結果 48
3.2　サンプル番号１の各等級の類似度 49
4.1　２台のカメラによる死角対処のためのテーブル 65
4.2　回転系による円柱直径の計測結果 68
4.3　平板系による円柱直径の計測結果 69