

卒業論文

CABINのVRを用いた

破面三次元表示技術

1p ~ 47p 完

平成 15年 2月7日 提出

指導教官 泉 聡志 講師

10165 岡島 智史

目次

第1章	序論	6
1.1	背景	7
1.1.1	従来の破面観察	7
1.1.2	バーチャルリアリティ	7
1.2	本研究の目的	8
1.3	本論文の構成	8
第2章	CABIN	9
2.1	CABIN の特徴	10
2.2	CABIN システム	10
2.3	CABIN における開発環境	12
2.4	CABIN の破面観察への応用	12
第3章	CABIN 用破面観察プログラムの開発	13
3.1	観察手法の考案	14
3.2	破面観察プログラムの開発	15
3.2.1	立体破面像の表示	15
3.2.2	破面像操作による観察の多様化	17
3.3	開発した破面観察プログラムの流れ	18
第4章	破面観察結果	20
4.1	観察対象破面	21
4.2	破面表示結果	23
4.2.1	CABIN による破面像	23
4.2.2	破面観察結果	26
第5章	考察	28
5.1	第三者による問題提起	29
5.2	問題点の分析	29

第6章 結論	31
6.1 結論	32
参考文献	33
あとがき	35
付録A SEMの仕様	37
付録B CABINのスペック	44

目 次

2.1	CABIN	10
2.2	CABIN の描画システム	11
3.1	考案した手法の流れ	14
3.2	高さデータ点からのポリゴン作成	15
3.3	テクスチャマッピングの利用による等高線描画	16
3.4	可変倍率観察のためのポリゴン数抑制手法	18
3.5	操作情報の表示	19
3.6	開発したプログラムのフローチャート	19
4.1	SEM による組織観察写真	21
4.2	き裂進展 7mm 付近の SEM 写真	22
4.3	き裂進展 7mm 付近の鳥瞰図	22
4.4	き裂進展 10mm 付近の SEM 写真	22
4.5	き裂進展 10mm 付近の鳥瞰図	22
4.6	き裂進展 15mm 付近の SEM 写真	22
4.7	き裂進展 15mm 付近の鳥瞰図	22
4.8	低倍率 SEM 像貼り付け	23
4.9	低倍率 等高線描画	23
4.10	高倍率 SEM 像貼り付け	23
4.11	高倍率 等高線描画	23
4.12	低倍率 SEM 像貼り付け	24
4.13	低倍率 等高線描画	24
4.14	高倍率 SEM 像貼り付け	24
4.15	高倍率 等高線描画	24
4.16	低倍率 SEM 像貼り付け	25
4.17	低倍率 等高線描画	25
4.18	高倍率 SEM 像貼り付け	25
4.19	高倍率 等高線描画	25
5.1	マスター-スレイブ間の三次元像表示位置の違い	30

A.1 Appearance of ERA-4000 SEM device 38

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 従来の破面観察

材料が破壊した際に現れた面、すなわち破断面には破壊の進行状況を示す特徴的な模様が現れる。その模様の観察によって得られた情報を元に破壊原因及び機構の解明を行う手法をフラクトグラフィという。走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope 以下 SEM と略す) の登場以後、焦点深度が深い、倍率可変域が大きいなどの特徴から、SEM を用いた破面観察はフラクトグラフィ解析の重要な手段となっている [1]。

SEM 像は一般の光による陰影とは異なる色付けをされた二次元濃淡像であり、SEM 像から観察物の立体形状を理解するためには SEM に対する知識及び経験が必要とされる [2]。立体形状把握のための従来の方法としてステレオ写真 (人間が両目から見る場合のように同じ対象の異なる側面が写っている二枚の写真) を撮影し立体視する方法が行われてきたが、コンピュータを活用し二枚のステレオ写真から自動的に立体形状を算出する手法が開発され、また直接破面の立体形状が測定できる機器が登場するなど、デジタルデータとして定性的に観察することも可能となっている。

1.1.2 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ (Virtual Reality = VR) は人工的に、実世界と本質的に同等な世界を作る技術である。VR の実現のためには人間にとって自然な三次元空間を構成することの他に、対象の人間と構成された空間の間に対話性が存在すること、構成された世界の中に使用している人間が入り込んだような状態を作ることが必要とされており、その実現のため人間の各種の感覚に対して働きかける技術及び人間の動作等の能動的な要素を読み取る技術といったものが多数研究開発されている [3]。

本大学の施設である IML (Intelligent Modeling Laboratory) の CABIN (Computer Augment Booth for Image Navigation) は VR を実現するための装置であり、高い仮想空間への「没入感」を得ることができる。これを応用することで高い現実感を持つ破面の立体像を表示することが可能になると考えられる。

1.2 本研究の目的

本研究ではCABINによる高い没入感を与えるVRを利用して、知識や経験を必要としない破面三次元観察技術を構築することを目的とする。具体的には、

1. 高いリアリティを持ち容易に立体形状が理解できる立体破面像を表示する
2. 多様な視点・角度・倍率からの観察を行う

以上の二つを目的とする。

1.3 本論文の構成

第1章 序論 では、本研究の背景について概説し、本研究の目的を示した。

第2章 CABIN では、本研究で用いたCABINの特徴について簡単に説明する。

第3章 CABIN用破面観察プログラムの開発 では、本研究で考案した破面観察手法と、手法の実現のために開発したソフトとアルゴリズムについて説明する。

第4章 破面観察結果 では、考案した手法の有効性を検証するため、考案した手法を用いて破面観察を行った結果を示す。

第5章 考察 では、観察者が複数となった場合の問題点とその解決策を考察する。

第6章 結論 では、本研究を通して得られた結論を総括する。

第2章 CABIN

2.1 CABINの特徴

CABIN(Computer Augment Booth for Image Navigation)は東京大学IML(Intelligent Modeling Laboratory)内に設置されている没入型多面ディスプレイ装置である。上下左右前の五面に強化ガラスを設置し、装置内での立体視が可能となる。

CABINには以下のような特徴がある。[6][7]

- 広視野角による周辺視効果がある。
- 様々な入出力デバイスによるインタラクションが可能である。
- 下面 15mm 厚二枚重ねの強化ガラスを用い、被験者が入り込むことが可能である。
- 視点連動により、様々な角度、位置からコンテンツを観察できる。



図 2.1: CABIN

2.2 CABINシステム

CABINの描画システムを図2.2に示す。

CG Rendering

5台のマシン (Front, Bottom, Top, Right, Left) はそれぞれ5面のスクリーンに対応している。描画された映像はRGB信号でディスプレイに送られるが、それを分岐させてプロジェクターに信号を送っている。

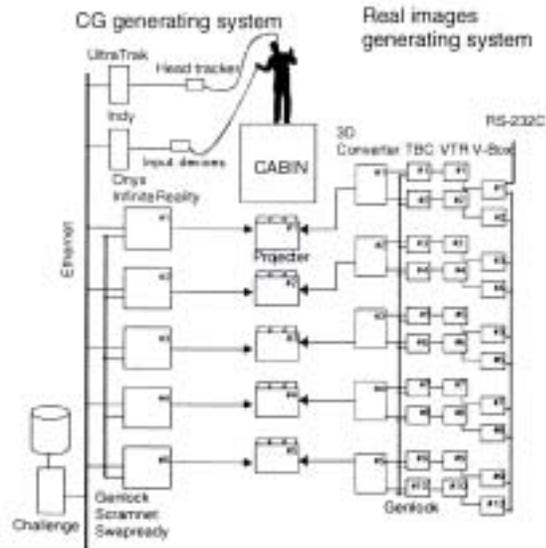


図 2.2: CABIN の描画システム

共有メモリ

5 台のマシン全てに SCRAMNet のボードが組み込まれており、どれか一つに書き込みが行われると、その情報を光ファイバーで他の SCRAMNet ボード上のメモリに更新する。

立体視

立体視は Crystal Eye(TM) を用いている。Crystal Eye は液晶シャッタ方式の両眼視差立体眼鏡である。液晶シャッタの切り替えは、赤外線エミッタから出力される。

入力デバイス

Nintendo64 コントローラや、振動ポインタなどが入力デバイスとして使用可能である。

トラッキング

三次元位置トラッキングは Polhemus 社 Ultratrak を用いている。Ultratrak は磁気式位置センサで、磁場を生成するソース部分と磁気をセンシングするセンサー部分から成り立つ。視点位置、手や足などの身体位置をトラッキングすることによっ

て様々なインタラクションを可能にする。

同期

表示する物体の位置や座標系などの各面について共通なデータを共有メモリ内に置き、front をソースにして同期を行うことによって仮想空間が生成される。

2.3 CABIN における開発環境

CABIN におけるプログラム開発のために OpenGL CABIN Library というライブラリが用意されている [7]。OpenGL CABIN Library は三次元グラフィックライブラリとして OpenGL[4] を利用している場合に、CABIN の各種システムの設定を行うライブラリである。

本研究では開発言語に C を、三次元描画のために OpenGL を使い、CABIN システムの利用のために OpenGL CABIN Library を利用している。

2.4 CABIN の破面観察への応用

CABIN は広視野の立体表示を行うため、HMD(Head Mount Display) などによる VR 表示と比べ高い没入感を得ることができる。これを破面観察に応用することで、あたかも手元に破壊した物体の実物があるかのような高い現実感を持つ観察が行えると考えられる [5]。

第3章 CABIN用破面観察プログラムの開発

3.1 観察手法の考案

CABIN による人間の感覚に鋭く訴える VR 空間を活用し、理解の容易な破面観察を行うために、図 3.1 に示す観察手法を考案した。次節から本手法の実現に用いたアルゴリズムについて解説する。

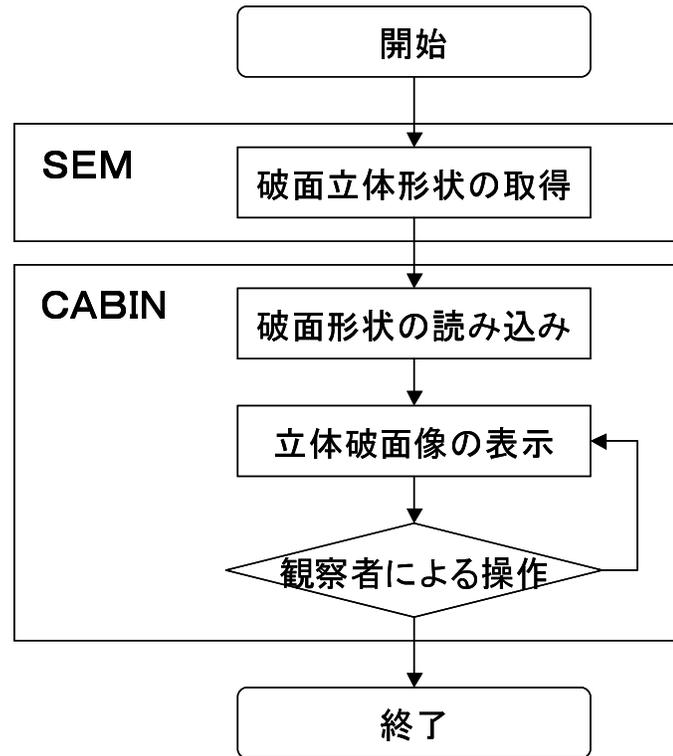


図 3.1: 考案した手法の流れ

破面立体形状の取得

破面の立体形状を、破面上の X, Y 方向に等間隔な点のそれぞれの Z 方向高さとして取得する。立体形状取得の方法として二枚の SEM 写真によるステレオ解析と、四つの検出器を持つ SEM による立体形状計測が挙げられる。

破面像の表示

取得した破面の高さデータをコンピュータに移し、CABIN 上で破面像を表示する。CABIN は液晶シャッターメガネによる立体視と 5 面のスクリーンによる広視野角、磁気式位置センサによる三次元位置トラッキングによって高い没入感を与える VR

空間を作り出すが、表示される破面像がリアリティに欠けたものであればこの没入感
 は容易に損なわれてしまう。そのため表示する破面像は高いリアリティを持つもの
 である必要がある。

観察者による操作

CABIN には入力デバイスとして Nintendo64 コントローラが備え付けられている。
 このコントローラを用いて観察者が表示される破面像に対して操作を加え、多様な
 観察を行えるようにする。

3.2 破面観察プログラムの開発

3.2.1 立体破面像の表示

高さデータからの立体破面像の構成

前記のとおり、破面の立体形状は破面上の X,Y 方向に等間隔な点の Z 方向高さ
 として与える。破面像は三角形ポリゴンの集合体として描画した。すなわち破面
 の X 方向 i 番目、Y 方向 j 番目の点を点 $(x(i), y(j), z(i)(j))$ とし、図 3.2 のように点
 $(x(i), y(j), z(i)(j))$ と点 $(x(i+1), y(j), z(i+1)(j))$ 、点 $(x(i), y(j+1), z(i)(j+1))$ の3点を
 結んだ三角形 (図中 1) と点 $(x(i+1), y(j), z(i+1)(j))$ と点 $(x(i), y(j+1), z(i)(j+1))$ 、
 点 $(x(i+1), y(j+1), z(i+1)(j+1))$ の3点を結んだ三角形 (図中 2) のポリゴン
 を作り表示した。

また破壊によって生成した二つの破面をともに解析することで破壊に関してより
 深い理解が得られる。そこでプログラム起動時の選択により二つの破面を同時に表
 示できるようにする。

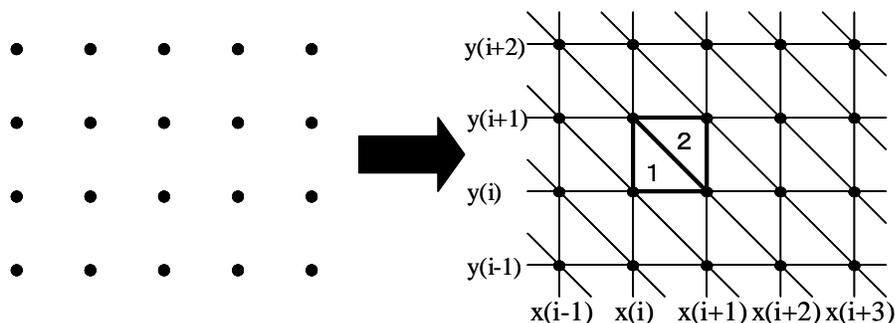


図 3.2: 高さデータ点からのポリゴン作成

テクスチャマッピングによる破面立体形状の特徴化

開発に用いた OpenGL には、表示する立体像の表面に対して二次元画像を貼り付けることで、ポリゴンで表現すると処理速度の大幅な低下を引き起こす表面の質感や模様を容易に表現できる「テクスチャマッピング」という機能がある [4]。この機能を利用して破面の特徴的形状を克明に捉えている SEM 像を立体破面像に貼り付けることで、破面の特徴的形状を強調することとなり形状の理解がより容易になった。SEM 像の貼り付けのためには、あらかじめ破面像構成の段階で各データ点が SEM 像のどの位置にあたるかを指定する必要がある。

また OpenGL には、表示される立体像上の点が、貼り付ける画像上のどの位置と対応しているのかを、点の三次元座標をもとに計算し自動的に指定する機能が備わっている。これを利用して図 3.3 のように、縞模様の画像を用意し立体破面像上の点の Z 座標の定数倍を用意した画像の座標とすることで、破面像に等高線を描くことができた。等高線を描画することにより破面の平坦部の傾斜および凹凸が理解しやすくなった。

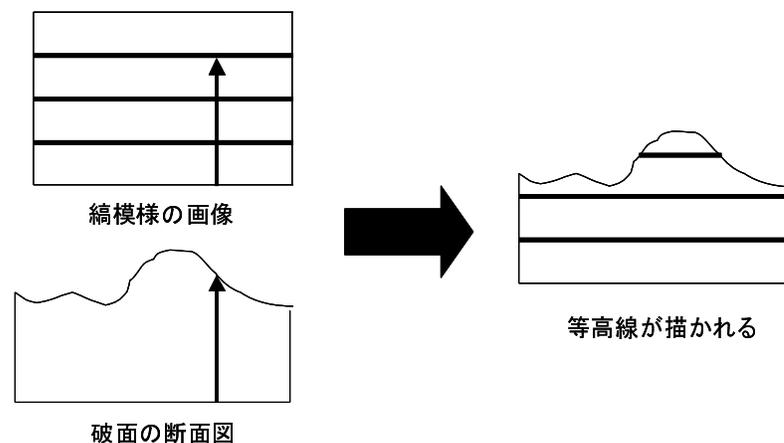


図 3.3: テクスチャマッピングの利用による等高線描画

SEM 像の貼り付けと等高線の描画は同じテクスチャマッピング機能を利用しているため、同時に行うことは不可能である。SEM 像の貼り付けと等高線の描画の両者の長所を生かした観察を行うために、観察者が必要に応じて破面像特徴化手法を切り替えられるようにした。

陰影の付与によるリアリティの向上

我々が日常的に目にする立体物には、周囲の光源の影響で陰影が付与されている。仮想的な光源を設定し陰影を付与することで、表示される立体破面像がより現実に

近いものとなり、リアリティが向上した。

表示される像に含まれる点は、仮想光源への方向ベクトルとその点における法線ベクトルをもとに輝度が決定される。破面像の正しい法線ベクトルはポリゴン辺により不連続的に変化するため、破面像に対し正確に陰影付けを行うとポリゴン辺が強調されて見える。しかし三角形ポリゴンによる破面像の立体形状は実物の破面形状の近似であり、ポリゴンの形状が強調されることは破面像のリアリティの低下を引き起こす。ポリゴンの各頂点における法線ベクトルを周囲のポリゴンの法線ベクトルの平均と仮定して輝度を決定し、線形補間を行うことで陰影をつける(グーローシェーディング)ことで、ポリゴン辺部分での輝度の変化の不連続性が解消され高いリアリティを得ることができるようになる [4]。

また背景が黒であると、破面像のうち陰影によって暗く色付けされた部分が背景に溶け込んでしまい質感を損ねるので、背景を青色であらかじめ色付けた。

3.2.2 破面像操作による観察の多様化

平行移動・回転操作

OpenGLには、表示される像に対し平行移動・回転操作を行うコマンドが存在する。破面像の表示を行う際にこの二つのコマンドを実行し、観察者が Nintendo64 コントローラを用いて平行移動距離及び回転角を操作することで、観察者が対話的に表示される破面像の平行移動及び回転移動操作を行うことができるようになった。

二つの破面の同時表示を行っている場合には、両破面を独立に平行移動・回転させることで、破面の位置関係を様々に変化させて観察が行えるようにした。これにより Fractgraphy の一手法である FRASTA 解析を CABIN 内で行うことができるようになった [5]。

可変倍率観察

多様な倍率での観察を行うためには広範囲に狭い間隔で高さデータを与える必要があり、データ点数は膨大なものになる。このとき与えられた高さデータ点すべてを用いて破面像を構成しようとする、過剰なポリゴンの使用により処理速度の低下を引き起こす。処理速度の低下は観察者の動き及び入力操作への表示の追従速度の低下となり、対話性を損ない表示の現実感を損ねる結果となる。このため多様な倍率の観察を行う際には、処理速度の低下を避けるために破面構成に用いるポリゴン数を節約する必要がある。

そこで低倍率観察の場合は等間隔にデータ点を間引いて破面像を構成し、破面の全体的な形状を表示できるようにした。また高倍率観察では限定した範囲のみを通常通りに、範囲外はごく粗く破面像を構成することで細部の観察を行えるようにし

た。中間の倍率で観察を行う際は二つのポリゴン数抑制手法を併用することとした。

以上の破面構成手法を観察者の入力操作によって切り替えることで、処理速度の低下を抑えつつ多様な倍率での観察が可能となった。図 3.4 はこの破面像構成手法を示したもので、左側が低倍率、右側が高倍率の場合の破面構成手法である。黒丸は高さデータ点、太枠は表示範囲を示す。

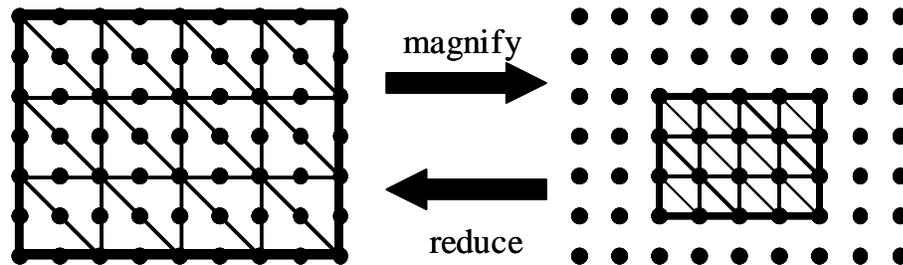


図 3.4: 可変倍率観察のためのポリゴン数抑制手法

倍率変更を行うためには新しい表示範囲を決定した上で再度破面像構成を行う必要がある。本研究では観察者が倍率変化を指示した時に CABIN の中央にある高さデータ点を中心点として求め、中心点の周囲のデータ間引き率に比例した大きさの範囲を新しい表示範囲とした。

入力操作の補助

破面観察によって深い知見を得るためには、観察倍率を把握することは必要不可欠である。倍率・表示範囲の操作を繰り返していると観察倍率や観察範囲が破面中のどこにあたるかなどの情報を見失う可能性が高い。また破面像に対し平行移動・回転のどちらを行っているのか、どちらの破面像を操作しているかといったフラグが明示されていないと、観察者の意図と異なる誤操作を誘発する。

操作上の混乱を避けるために CABIN 内に図 3.5 のような表示を行い、現在の倍率・破面構成範囲・行っている操作を確認できるようにした。右上の緑色の四角形はデータとして与えた破面の範囲、赤枠は破面像の構成範囲を示す。下部の「LOWER」は操作対象が下側破面であること、「PARALLEL」は平行移動の操作中であることを示す。

3.3 開発した破面観察プログラムの流れ

図 3.6 に本研究で開発したプログラムのフローチャートを示す。



図 3.5: 操作情報の表示

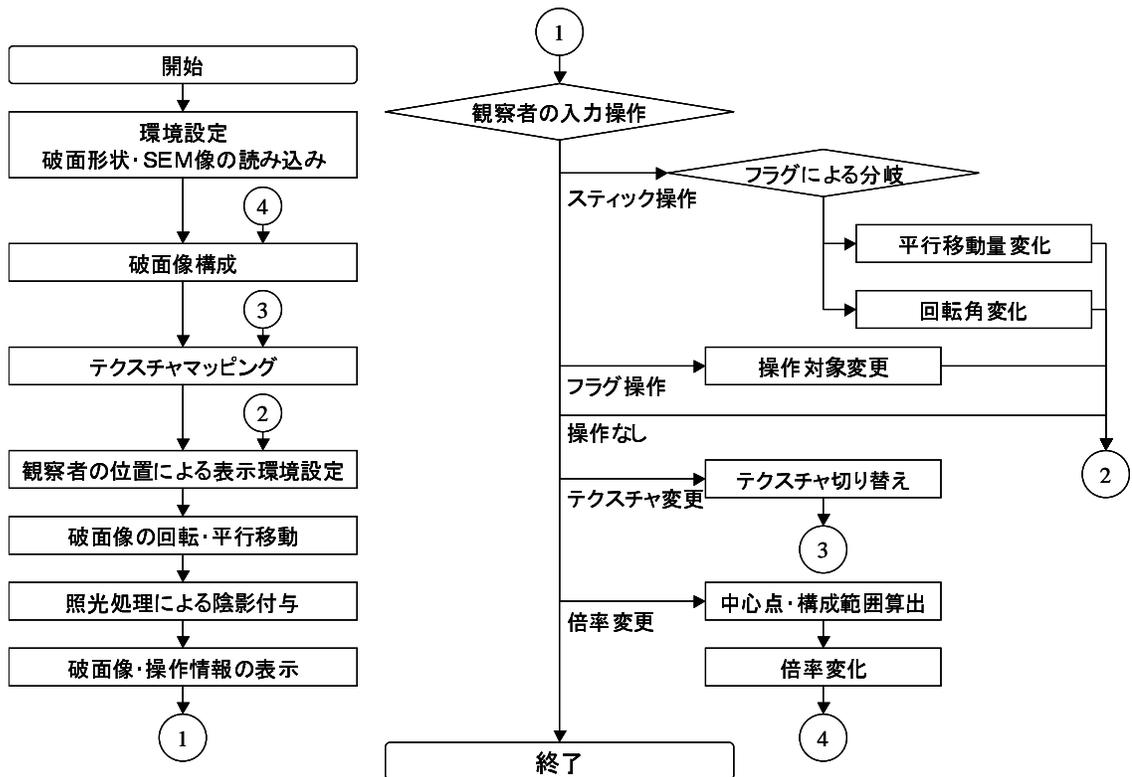


図 3.6: 開発したプログラムのフローチャート

第4章 破面觀察結果

4.1 観察対象破面

観察対象としてジュラルミン (A2017-T4) の疲労破壊破面を用い、き裂進展距離の異なる3箇所について観察を行った。SEMを用いて破面を200倍で観察した様子を図4.2、図4.4、図4.6に示す。同時にSEMにより立体形状測定を行い、高さデータ点としてそれぞれ2001×1501点を取得した。取得した高さデータをもとにMicroAVSを用いて作成した鳥瞰図を図4.3、図4.5、図4.7に示す。またSEMによって同破面の組織観察を行った写真(倍率100倍)を図4.1に示す。



図 4.1: SEM による組織観察写真

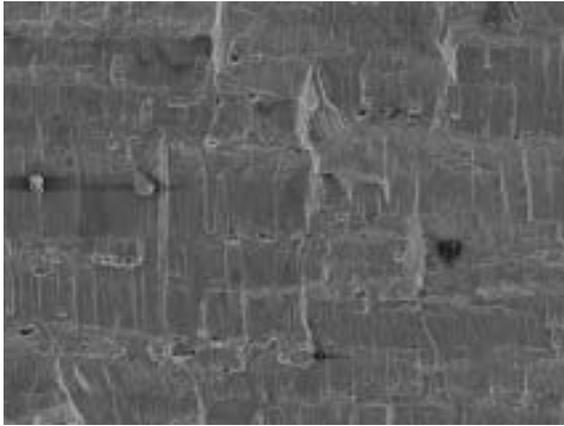


図 4.2: き裂進展 7mm 付近の SEM 写真

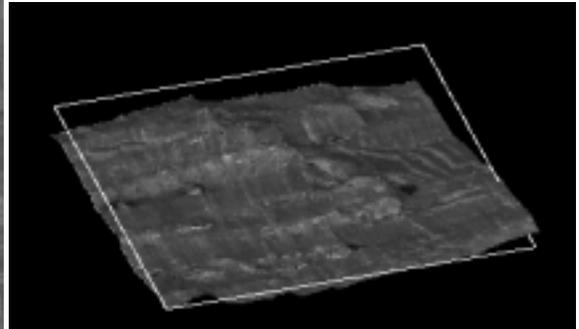


図 4.3: き裂進展 7mm 付近の鳥瞰図

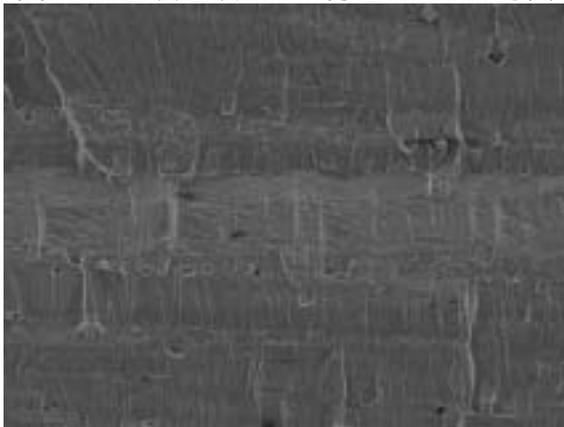


図 4.4: き裂進展 10mm 付近の SEM 写真

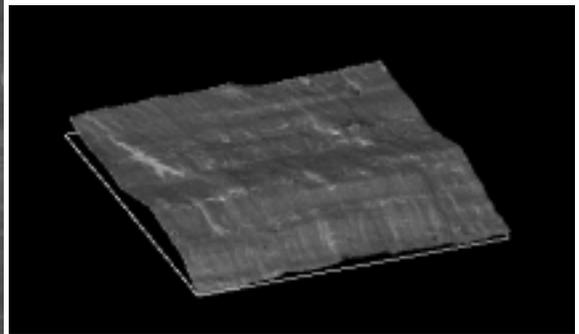


図 4.5: き裂進展 10mm 付近の鳥瞰図

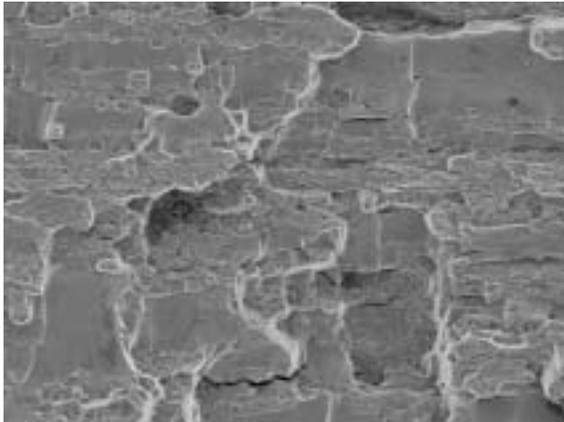


図 4.6: き裂進展 15mm 付近の SEM 写真

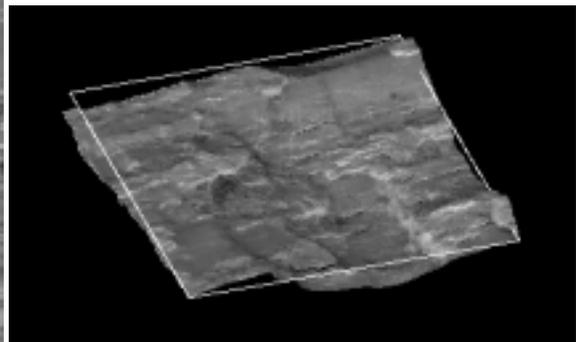


図 4.7: き裂進展 15mm 付近の鳥瞰図

4.2 破面表示結果

4.2.1 CABIN による破面像

CABIN 内に表示された破面像を以下に示す。ただし以下の写真の撮影時には全て CABIN の液晶シャッターメガネによる立体視機能を用いていない。

き裂開始点から $7mm$ 付近の破面

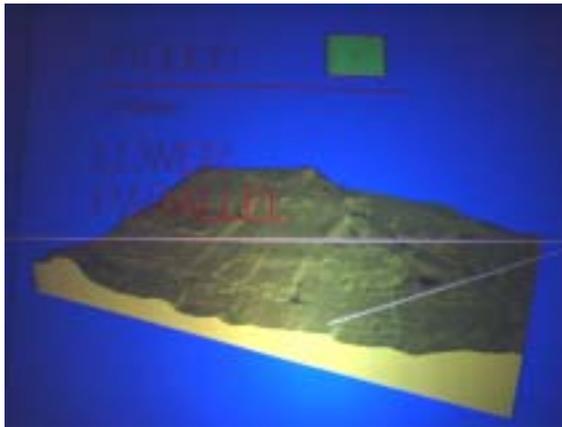


図 4.8: 低倍率・SEM 像貼り付け

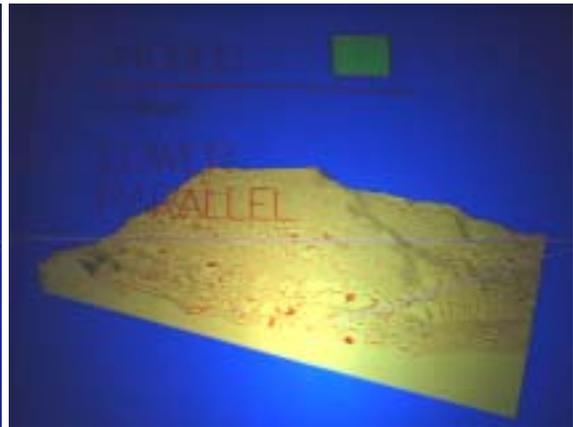


図 4.9: 低倍率・等高線描画

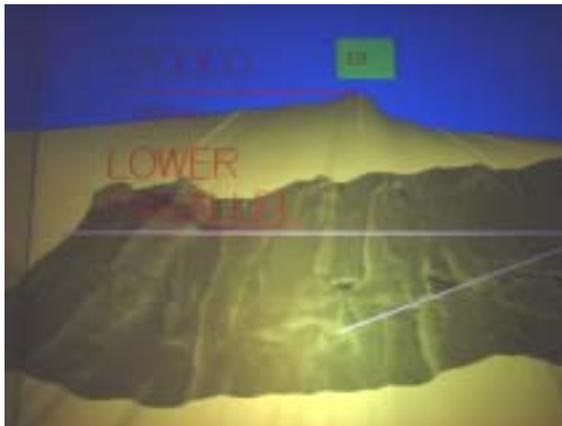


図 4.10: 高倍率・SEM 像貼り付け



図 4.11: 高倍率・等高線描画

き裂開始点から 10mm 付近の破面

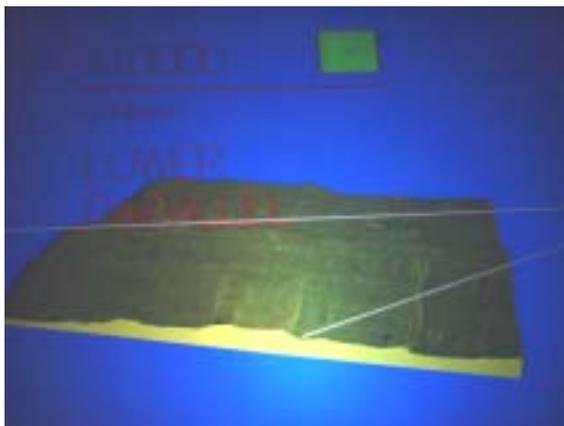


図 4.12: 低倍率・SEM 像貼り付け

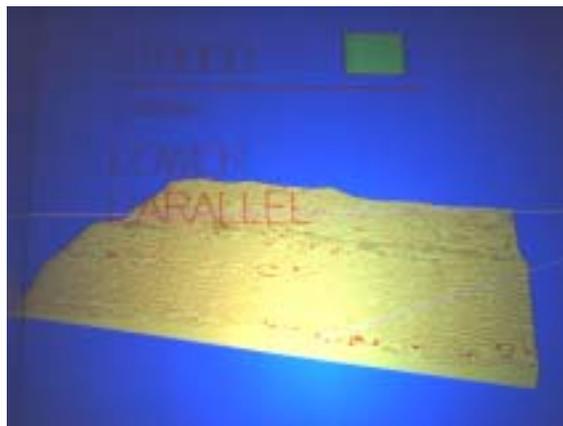


図 4.13: 低倍率・等高線描画



図 4.14: 高倍率・SEM 像貼り付け



図 4.15: 高倍率・等高線描画

き裂開始点から 15mm 付近の破面

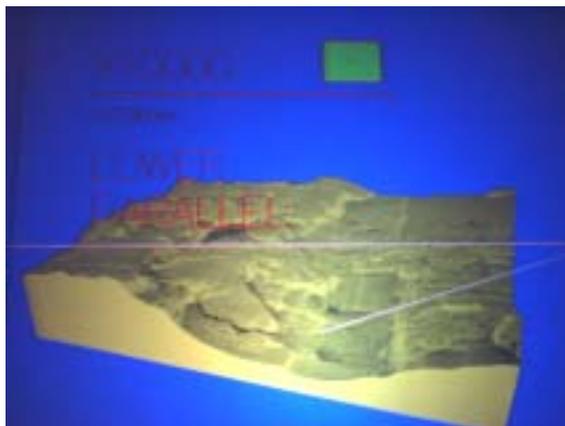


図 4.16: 低倍率・SEM 像貼り付け

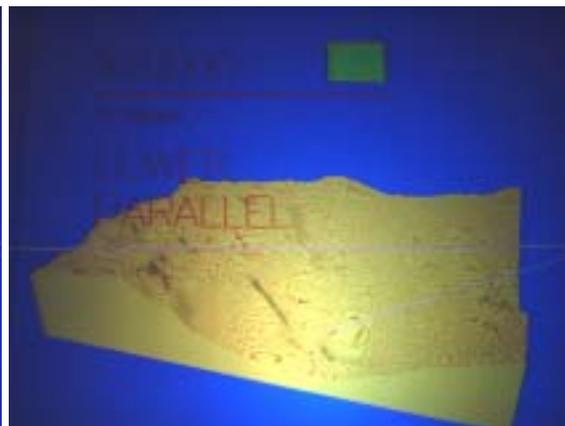


図 4.17: 低倍率・等高線描画

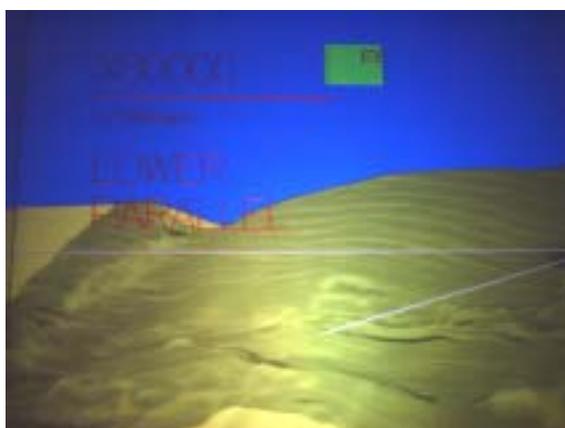


図 4.18: 高倍率・SEM 像貼り付け

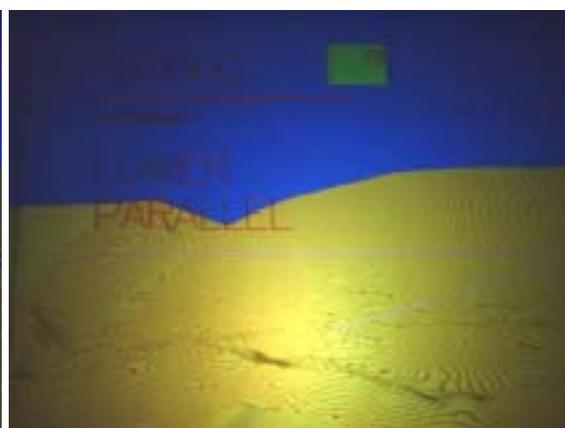


図 4.19: 高倍率・等高線描画

4.2.2 破面観察結果

き裂進展距離 7mm

全体にわたって観察を行ったところ (図 4.8、図 4.9) 起伏はあまり激しくなく、また SEM 像を貼り付けている場合 (図 4.8) では微小な構造が横方向に連なっているのが観察できた。微小構造付近を拡大して観察してみると (図 4.10、図 4.11)、微小構造が介在物によるくぼみであることがわかった。とくに等高線を描画してみると (図 4.11) くぼみの形状が明快に理解できた。

図 4.1 を見ると、介在物である黒い粒が横方向に連なっており、観察されたくぼみの特徴と一致している。

き裂進展距離 10mm

全体にわたって観察を行ったところ (図 4.12、図 4.13)、SEM 写真 (図 4.4) で確認された中央部を横断している特徴的な構造が凸構造であることがわかった。中央部を拡大して観察すると (図 4.10、図 4.11)、特徴構造部においても起伏は激しくなく、ストライエーションも確認できた。この特徴形状が破壊状況の変化を示しているのではないかと考えたが、特徴形状前後で破壊様相があまり変化しておらず、また破壊試験中にき裂進展距離 10mm 付近での大きな変化は見られていないため、この特徴形状は破壊状況の変化によるものではない。

図 4.1 を見ると横縞状に異なる組織が並んでいることがわかる。観察された特徴形状は横縞状に入った組織の性質の違いによって生じたと考えられる。

き裂進展距離 15mm

全体にわたって観察を行ったところ (図 4.16、図 4.17)、破面に激しい起伏が見られ、倍率変化を繰り返すことで多くのディンプル形状が確認できた。また右奥の平坦部を拡大して観察すると、SEM 像の貼り付けを行った場合 (図 4.18) にはストライエーションを明瞭に観察することができたが、等高線を描画した場合 (図 4.19) ではストライエーションは確認し難くなった。

観察結果総括

SEM 像と比較して CABIN 内で得られた像は、立体形状の認識が容易なものとなっていた。どの位置の観察においても、低倍率の観察では破面全体の起伏が明快に表示され、高倍率の観察ではストライエーションやディンプルなどの微小な形状を観察することができた。倍率を変更しながら観察を行うことで破面の立体形状を高解像度かつ広範囲に観察できた。

表示される破面像に SEM 像を貼り付けた場合ストライエーション等の特徴的形状はきわめて認識しやすくなるが、特徴の少ない平坦部の傾斜の理解は難しかった。破面像に等高線を描画した場合破面の傾斜や垂直方向に大きい立体形状は容易に理解できたが、垂直方向の変化の小さいストライエーションは見づらくなるという問題があった。

第5章 考察

5.1 第三者による問題提起

開発した CABIN における破面三次元観察技術を第三者に実際に利用してもらったところ、複数の観察者が CABIN 内で観察を行ったときに、一人が破面像のある点を指差した場合に、もう一人の観察者にはまったく異なる点を指差しているように見えるという問題点を指摘された。この問題は複数人による破面観察の際の意見交換に支障をきたす。

5.2 問題点の分析

CABIN は位置センサによって観察者の位置・角度を計測し、観察者から見て正しい位置に三次元像が観察できるように表示を行っているが、位置センサによる正しい三次元表示を保障される観察者は一人のみである。以下位置センサをもち正しい表示を保障されている観察者をマスタ、それ以外の観察者をスレイブとする。

図 5.1 にマスタとスレイブの三次元像の見え方の違いを示す。M はマスタ、S はスレイブである。点 A にマスタが観察している三次元像があるとすると A_L, A_R は実際に CABIN のスクリーンに映し出される点であり、 A_L は左目、 A_R は右目に対してのみ表示される。スレイブが観察する三次元像は点 A' の位置にあることになる。同じ像がマスタとスレイブで違う位置に観察されているため、指差しなどで(すなわち現実の座標を使って)像のある一点を指定しようとしてもマスタとスレイブで像に対する位置が異なるという結果になる。

マスタ・スレイブ間の三次元像表示位置の食い違いは CABIN の立体表示手法に起因するため、解消はきわめて困難である。三次元像の一点をマスタ・スレイブ間で正しく指定するためには現実の座標による指定でなく、「仮想空間の座標」による指定を行う必要があると考えられる。

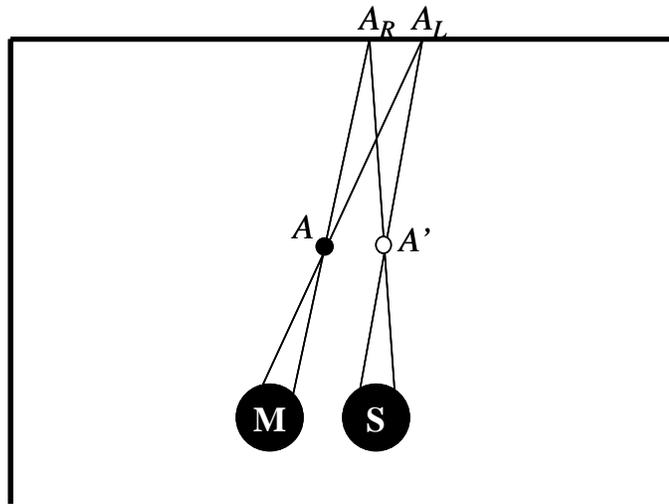


図 5.1: マスター-スレイブ間の三次元像表示位置の違い

第6章 結論

6.1 結論

本研究での結論は以下の通りである。

1. 高い没入感を与える CABIN の VR を用いて破面の立体観察を行う手法を考案した。
2. 陰影をつけてリアリティを増し、SEM 像の貼り付け及び等高線の描画によって立体形状を強調することで、容易に立体形状が理解できる三次元破面像の表示を行った。
3. 表示した破面像に対して観察者が平行移動・回転移動・倍率操作を行うことを可能にし、多様な視点・角度から広範囲・高解像度の観察を可能にした。
4. 複数の観察者の間で表示された破面像の注目部位を正しく伝えることが出来ない問題について、原因を分析した。

参考文献

- [1] 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編:“フラクトグラフィ 破面と破壊情報解析”, 丸善株式会社 (2000).
- [2] 日本電子顕微鏡学会関東支部編:“走査電子顕微鏡-基礎と応用-”, 共立出版株式会社.
- [3] 舘暲:“バーチャルリアリティ入門”, 筑摩書房 (2002).
- [4] OpenGL ARB:“OpenGL Programing Guide(日本語版) The Official Reference Document for OpenGL,Release 1”, アジソン・ウェスレイ・パブリッシャーズ・ジャパン株式会社 (1993).
- [5] 山田直秀:“CABIN を用いた VR 破面観察技術”, 東京大学卒業論文 (2001)
- [6] IML ホームページ
URL=<http://www.iml.t.u-tokyo.ac.jp/>
- [7] CABIN Club ホームページ
URL=<http://www.iml.u-tokyo.ac.jp/cabicla/index.html>

あとかき

謝辞

本研究は東京大学工学部 泉聡志講師のご指導のもとに進められました。酒井先生と泉先生には研究に対する様々なアドバイスをいただきました。こうして研究を一つの形としてまとめることが出来るのも先生方のおかげです。本当にありがとうございます。

またD3の山際さんにはコンピュータやSEMに関する様々な助言をいただきました。大変ありがとうございました。

酒井・泉研究室の皆様にご挨拶を申し上げます、これをもって謝辞に代えさせていただきます。

付録A SEMの仕様

SEM(ERA-4000)の概観



図 A.1: Appearance of ERA-4000 SEM device

SEM(ERA-4000)の仕様

主性能

- 1) Z方向分解能(凹凸測定時) $1nm$
- 2) XY方向分解能(SEM観察時) $4.5nm$

主機能

- 1) 2次電子線像機能 イメージプロセッサによるモード切替
 - (1) 差信号による凹凸2次電子像
 - (2) 和信号による組成2次電子像
 - (3) 通常の2次電子像
- 2) 3次元表面解析機能 (1) X-Z, Y-Z断面形状測定
 - (2) 3D断面形状測定
 - (3) X-Z, Y-Z表面粗さ解析
 - (4) 3D表面粗さ解析

仕様性能

- A. 電子光学系
 - 1. 電子銃 タングステンヘヤピン
 - 2. 加速電圧 $0.5 \sim 30kV$ ($0.1kV$ ステップアップ)
 - 3. 二次電子像分解能 $4.5nm$
 - 4. レンズ 3段磁界レンズ
 - 5. ワーキングディスタンス $8 \sim 40mm$
 - 6. 倍率 $\times 10 \sim \times 300,000$
 - 7. 視野移動 $\pm 30\mu m$
 - 8. 焦点非点合わせ オートフォーカス&スティグ及び手動

B. 画像

- | | |
|-----------------|---|
| 1. 走査モード | FRAME, REDUCED FRAME, SPOT, LINE X, LINE Y, CB-MONITOR |
| 2. 走査速度 | TV, 0.2, 5, 20, 40, 80, 160 秒/フレーム |
| 3. 走査方向 | 360 °回転可能 |
| 4. 画像種類 | A, B, A+B, A-B, EXT |
| 5. 画像記憶 | SEM 像
576 × 440 …… 2 フレーム |
| 6. 画像寸法 | 観察用 …… 165 × 125mm
撮影用 …… 120 × 90mm |
| 7. 画像記録 (オプション) | イメージプリンタ 100 × 75mm
ポラロイドフィルム 118 × 89mm
ブローニフィルム 60 × 70mm |
| 8. スーパーインポーズ | a. ミクロンマーカ、フィルムナンバー (オートカウント), タイマー (年月日)
b. 電源電圧値
c. コメント
d. 試料位置
e. +字線 |
| 9. 積分画像 (オプション) | 積分回数 1 ~ 255 回
積分スキャンスピード Rapid(0.2 秒) |

C. 試料ステージ

- | | |
|-------------|---|
| 1. 試料寸法 | 最大径 $\phi 125 \times H10mm$
最大厚 $\phi 50 \times H30mm$
小試料 $\phi 10 \times H10mm$ |
| 2. X - Y 移動 | 30 × 68mm モーター駆動 |
| 3. Z 移動 | 8 ~ 40mm |
| 4. 回転 | 360 °エンドレス モーター駆動 |
| 5. 傾斜 | 0 ~ 60 °(但し、試料大きさ、Z-位置により制限あり。) |
| 6. 試料交換 | 大気解放 |
| 7. ステージ送り | 最少ピッチ 5 μm |
| 8. 位置表示 | X, Y 位置 4桁、回転 1 °単位 |
| 9. 送り速度 | 倍率連動 |

D. 排気系

1. 操作 完全自動排気
2. 試料交換時間 4分以内
3. 到達真空度 2.6mmPa
4. 真空ポンプ 油拡散ポンプ
油回転ポンプ(直結型)

E. その他

1. 架台 密封式エアーマウント
2. 保護機能 対停電、対断水、対真空劣化

F. 三次元表面解析機能

1) プロファイル測定

- (1) ビーム走査 デジタル走査
- (2) 測定方向 二次電子画像の X 方向、Y 方向切換
- (3) 測定位置表示 CRT 上+字マークによる。
- (4) 測定の長さ X 方向 $2.4\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$
Y 方向 $1.8\mu\text{m} \sim 45\mu\text{m}$ が適切である。
(測定長は画像倍率で設定する。)
- (5) 測定点設定 最大 4096 点/1 ライン (1 ライン測定)
最大 4096 点/1 ライン (エアロビュー)
* 但し、ライン × 測定点は 250,000 以下
- (6) 測定ライン数設定 2 ~ 4096 ライン (エアロビューの時設定)
- (7) Z/X, Z/Y 比 0.1 ~ 1000 倍
- (8) 傾斜補正 1 ライン測定時 オート・マニュアル
エアロビュー オート
- (9) 測定データ及び記録
 1. 凹凸プロファイル カラー CRT ディスプレイ
 2. ズーム機能 1 ライン測定の一部を拡大して
カラー CRT ディスプレイ
 3. エアロビュー カラー CRT ディスプレイ
 4. 二点間測定 カーソルにより 1 ライン上の相互の 2 点を
指定し、2 点の距離、高さの差、角度を
測定できる。
 5. 記憶 フロッピーディスク及びハードディスク
 6. CRT 表示記録 カラーハードコピー (オプション) による。

2) 三次元粗さ解析

- | | |
|------------|---|
| (1) 測定方向 | X 方向及び Y 方向 |
| (2) 入力データ数 | 最大 4096 点/ライン
最大 4096 点/ライン/フレーム
(ライン × 測定点 = 250,000 以内) |
| (3) 記憶 | ハードディスク (100MB 以上) 及び
フロッピーディスク |
| (4) メモリー | 1.6MB + 8MB |
| (5) 解析機能 | 解析結果はカラー CRT にディスプレイすると
共に、カラーハードコピーが可能である。 |

解析機能

1. 等高線表示

指定されたスレッシュホールド値とステップ数により、同じ高さの場所を地図のように結ぶ。スレッシュホールド値を順次変えながらその時の切口の形状を表示することにより画像化する。

2. 切断面の面積率

指定した切断面の総面積の全測定面積に対する比率を算出、表示する。また、スレッシュホールド値と切断面積との関係をヒストグラムで示すことが出来る。

3. 指定面積あたりの山数

指定した切断面の切口の数 (山の数) を算出、表示する。(但し、切口形状が単純形状の場合に限る。) また、スレッシュホールド値と切口の数 (山の数) との関係をヒストグラムで示すことが出来る。

4. 粒度

切断面の総面積を切口の数 (山の数) で割ったもの、つまり切断面の平均面積を算出、表示する。また、スレッシュホールド値における粒度をヒストグラムで表示する。

5. 各切断面の最大高さ

各切断面の切口の最大高さ (山の高さのばらつき) を算出する。

6. 表面粗さの三次元パラメータ

表面粗さの三次元パラメータ R_a , R_z , R_{max} を算出する。

- R_a …… 中心線平均粗さ
- R_z …… 10 点平均粗さ
- R_{max} …… 最大高さ

R_a , R_z については、平均値、最大値、最小値を算出する。また、グラフにすることも出来る。

7. 表面積代替値
測定された形状データから表面積を計算する。また、二次元平面 (測定面) の面積との比をとることも出来る。(表面積率)
8. データのフィルタリング機能
測定された形状データに対し指定した周波数による高域、低域、中域フィルタリングをかけることが出来、結果のデータは1~8の解析にかけることが出来る。
9. 鳥瞰図表示
鳥瞰図表示を行なうことが出来る。Z方向倍率、視野(角度)は入力により設定することができる。
10. BATCH 処理
解析を1個ずつ実行するのではなくて、処理順序を決めたFILEを作成し、そのFILEに従って順次解析を連続的に行なっていく機能である。無人で長時間の処理をいくつか行なう時に便利である。(ただし、解析データは全てハードディスク上にFILEされている必要がある。)
処理順序はユーザーが自由に作成、変更、削除することができる。

装置寸法

- | | | |
|-----------|------------------------------------|-------|
| 1. 本体 | $W540 \times D750 \times H1350mm$ | 265kg |
| 2. 操作 | $W1000 \times D750 \times H1200mm$ | 90kg |
| 3. 油回転ポンプ | $W500 \times D260 \times H410mm$ | 30kg |

付録B CABINのスペック

CG Rendering

CPU	MIPS R4400
FPU	MIPS R4000
CLOCK	250MHz
Main Memory	256MB
Texture Memory	16MB
Rendering Engine	Infinite Reality(10M Polygon/s)

共有メモリ

SCRAMNet™	容量 1Mbyte
-----------	-----------

立体視

通常モード	1280pixelx1024pixel 60Hz (スクリーン表示部分 中央正方形部分 1000x1000)
立体視モード	1024pixelx768pixel 96Hz (スクリーン表示部分 中央正方形部分 750x750)

トラッキング

Ultratrak	磁場を生成するソース部と、磁気をセンシングするセンサ部から成り立つ。 取り付け可能なセンサ数 16 個 (これを Station と呼ぶ) 実空間三次元の 6 自由度 (位置、角度) のデータを返す。分解能 2 インチ。 UDP にて bottom と接続
-----------	---

同期

RGB 信号同期	Genlock を用いている。特に立体視をする場合に必要。 Front がソース。
共有メモリアクセスセマフォ	開発者がソフトウェア的に実装

入力デバイス

Nintendo64 コントローラ	信号変換機を通して、 RS232C 経由で Front の tty ポート 番に接続
振動ポインタ	信号変換機を通して、 RS232C 経由で Front の tty ポート 番に接続

以上

1～47 ページ 完

卒業論文

平成15年 2月7日 提出

10165 岡島 智史