

赤外線映像装置によるき裂の検知と画像処理*

白鳥正樹*¹, 桑嶋隆夫*², 高橋嘉明*³Detection of Cracks and Its Image Processing
by Infrared Thermography

Masaki SHIRATORI, Takao KUWAJIMA and Yoshiaki TAKAHASHI

The authors have developed an experimental and computational hybrid measuring system for the purpose of nondestructive detection of cracks embedded in structural members. The system consists of an infrared thermal video system (TVS-5000), by which the temperature distribution of a body surface can be measured and processed to express its thermal image, and an engineering work station (EWS), by which image processing of the thermal image can be carried out. Various methods for heating or cooling the specimen have been examined. Further more, an image processing expert system has been developed to obtain definite pictures of the defects.

Key Words: Nondestructive Inspection, Detection of Cracks, Hybrid System, Infrared Thermography, Image Processing, Expert System

1. はじめに

構造物に発生する欠陥・損傷が問題になっており、その検知同定は安全管理上、非常に重要視されている。現在、非破壊検査法として浸透探傷法や磁粉探傷法、および x 線や超音波を用いる方法などが採用されているが、これらの方法で広範囲の検査を行うにはかなりの時間と労力を要する。一方、物体表面より放出される電磁波中の赤外域を非接触でとらえ、二次元の熱画像を作り出す赤外線映像装置がさまざまな分野で広く利用されてきている^{(1)~(5)}。近年、この赤外線映像装置を使って、き裂・欠陥を非破壊的に検出する方法が研究されている⁽⁶⁾。その手法として、パルス電流負荷による非定常温度場に基づく欠陥・損傷検出⁽⁷⁾や、光照射により物体表面を加熱したときの温度分布に基づく薄膜コーティング材の界面欠陥の検出⁽⁸⁾などが報告されている。

さらに赤外線映像装置によるき裂検知では、熱画像を基にき裂を検知することから画像処理の技術と切り

離して考えることはできない。画像処理によって、熱画像についての理解認識を高め、さらに詳細な情報を熱画像から得ることができる。

本研究では赤外線映像装置を用いて、より迅速で簡単に表面き裂を検知するためのいくつかの手法について、その有効性の検討考察を行った。なかでも画像処理の重要性に着目して、き裂検知をサポートする画像処理エキスパートシステムの開発を行った。

さらに本報では、き裂問題に加えて、ハニカム断面構造部材の内部構造を探る試みについても述べる。

2. き裂検知システムの構成

本システムは図1に示すように赤外線映像装置とエンジニアリングワークステーション(EWS)からなる実験・計算ハイブリッドシステムである。

2.1 赤外線映像装置 このシステムで使用した赤外線映像装置は、日本アビオニクス社製のTVS-5000である。この装置は対象物から放射される赤外線を検出器によって電気信号に変換し、処理することにより対象物の温度分布を可視像としてリアルタイムに再構成することができるものである。そのおもな仕様を表1に示す。

2.2 エンジニアリングワークステーション 赤

* 原稿受付 平成4年5月20日。

*¹ 正員, 横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。*² 正員, 富士総合研究所 (〒108 東京都港区海岸3-2-12)。*³ 学生員, 横浜国立大学大学院。

外線映像装置で得た熱画像温度データはEWSに転送して画像処理を行う。EWSはSONY社製のNEWS NWS-3460(NWS-821)で、主記憶が8MB(4MB)、CPUは、R3000(MC68020×2)、浮動小数点演算用コプロセッサR3010(MC68881)を一個装備している。カラーディスプレイには256色同時表示が可能である。

3. き裂検知の方法

赤外線映像装置を用いてき裂検知を行うには、対象物の温度分布を可視化した熱画像中のき裂に起因する温度分布の特異なパターンをとらえることになる。そのためには内部発熱、外部加熱などの方法により対象物に温度変化を起こす必要がある。その原理としては、さまざまなものが考えられるが、内部発熱を用いる手法としては、塑性変形による発熱を検知する塑性発熱法、外部加熱ではレーザー加熱法などが検討されてきた⁽⁹⁾。

そこで本研究では、さらに以下の三つに基づく手法を検討した。

- [1] き裂による熱伝導阻止に基づく方法
 - [2] き裂部の電気抵抗の違いに基づく方法
 - [3] き裂への浸透効果を利用する方法
- そしてその手法として、高温ガス吹き付けによる加熱、

表1 赤外線映像装置の仕様

	TVS-5000
Temperature range	-40~280℃
Sensitivity	0.05℃
Field of view	10° × 15°
Frame time	0.05 sec
Picture resolution	256 × 200

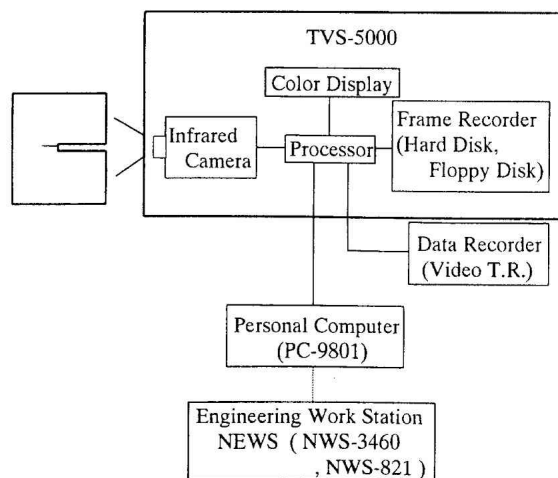


図1 ハイブリッドシステムの構成

冷却剤による局所冷却、および交流電流、高周波渦電流を用いた加熱の4通りの手法で実験を行い、それぞれの手法に対しての有効性の考察を行った。

さらに赤外線映像装置で得た熱画像を画像処理して、き裂や欠陥を確実に検出同定できるようにした。

4. 実 験

4.1 実験方法 実験は、図2のように対象とする試験片に向けた赤外線カメラで、試験片表面の温度分布をとらえ、リアルタイムにカラーディスプレイで確認するとともに、その熱画像温度データをEWSに転送し、画像処理でき裂部を抽出・強調することによりき裂・欠陥を検知する。

加熱や冷却を行う装置について以下に述べる。高温ガスによる加熱には、液化ブタンガスの触媒酸化反応熱を利用した携帯形の熱風器、冷却にはスプレー式のスポット冷却剤を用い、通電加熱では交流電流供給装置の電極から試験片に約1kAの電流を供給した。一方高周波加熱では高周波発振器を用いてコイルに430kHzの高周波電流を流し、物体表面に高周波渦電流を発生させた。

4.2 試験片 本研究で使用した試験片は次のようなものである。(1)CTスリット試験片：スリットの先にさらに約16mmの疲労き裂を入れたもの。(2)スリット試験片：長方形の平板試験片中央に深さ(2mm~貫通)や幅(5~50mm)の異なるスリットを

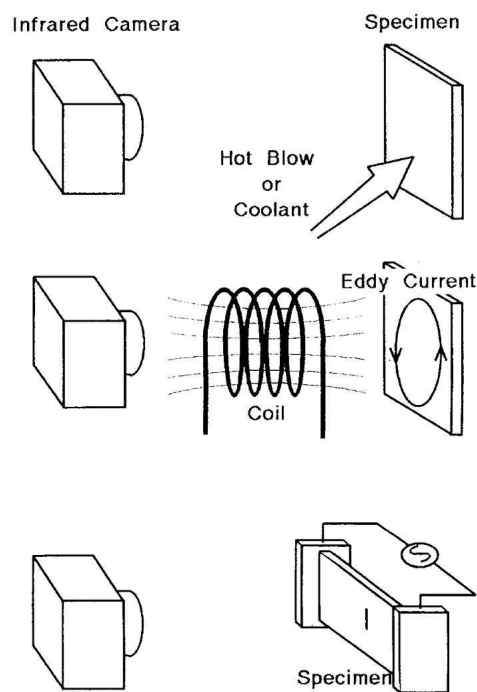


図2 加熱法

放電加工によっていたもの。

また、(1)の試験片表面には橋梁などの一般構造物に用いられているのと同様の白色塗料を塗布、(2)には黒体塗料を塗布してある。

5. 結 果

5・1 き裂による熱伝導阻止に基づく方法 この方法は、き裂近傍を加熱冷却した時に、き裂部の不連続でその熱伝導が阻止されることによる温度分布の異状からき裂を検知する方法である。

この方法で得た熱画像を図3に示す。これはCTスリット試験片の疲労き裂をとらえたものである。

5・2 き裂部の電気抵抗値の違いに基づく方法

き裂が完全に開いている場合には、き裂による断面積の減少による抵抗増大、また疲労き裂のようにき裂が閉じてき裂面が部分的に接触しているような場合にも、ほかの部分に比べて抵抗値が大きくなる。そこに電流を流せばより大きなジュール熱による発熱がある。

図4はスリット試験片を、交流電流によって通電加熱をしたときの温度分布を撮った熱画像であり、電流によってスリット部で生じた局所的な発熱をとらえている。

5・3 き裂部への浸透効果を利用する方法 浸透探傷剤をき裂に浸透させ現像液により表面に吸い出す代わりに、冷却剤を探傷面に吹き付けて、冷却剤がき裂に浸透することによって健全な表面に比べて、き裂部分がより冷却され温度が低下する現象をとらえる。

この現象をとらえた熱画像が図5である。

5・4 スリットの寸法と加熱位置の関係 本研究では手法の検討と並行して、き裂の寸法がき裂検知能力に対して及ぼす影響を検討した。試験片にはき裂の寸法の違いに対する定量的なデータを得るために、スリット試験片を選んだ。加熱法は、赤外線探傷の利点である、非接触で広範囲にそしてリアルタイムにき裂検知ができるという点を損なわないということから高周波渦電流による加熱を選び、さらに図6のように3箇所の加熱位置を設け、加熱位置の及ぼす影響についても検討した。

加熱位置①のとき、スリットからの発熱はなく、熱伝導が不連続になることによってのみスリットを確認することができる。しかし、2mm程度の深さしかないスリットの場合、熱伝導の不連続面が不明りようになり、この加熱位置での浅いき裂の検知能力が高くないことがわかる(図7(a)参照)。

加熱位置②のとき、渦電流の流れを妨げることでより、スリットとコイルの交点周辺より発熱があり、検

知が可能である。しかし、短いスリットの場合、発熱はスリットの先端より確認できるが、深さの浅いものではその発熱は弱く、コイル下部からの発熱と区別がむずかしくなる(図7(b)参照)。

加熱位置③のとき、発熱が増大し、浅いき裂でもスリットの先端からの発熱をはっきり確認できた(図7(c)参照)。

6. 画像処理エキスパートシステム⁽¹⁰⁾

画像処理エキスパートシステムは「画像処理専門家の持つ画像処理技術に関する知識」を備えた画像処理のシステムであり、これは知識工学の分野で発展めざましいエキスパートシステムの技法を画像処理に適用するものである。

これは大きく分けると次の2通りに分類できる。

(1) 画像の特徴の抽出や領域分割などの画像処理アルゴリズムを自動的に選択・実行するシステム

(2) ユーザとの対話によって画像処理に関する指示助言を与えるコンサルテーションシステム

エンジニアリング・ワークステーション上でき裂検知のための画像処理を効率よく確実にを行うためのプロ

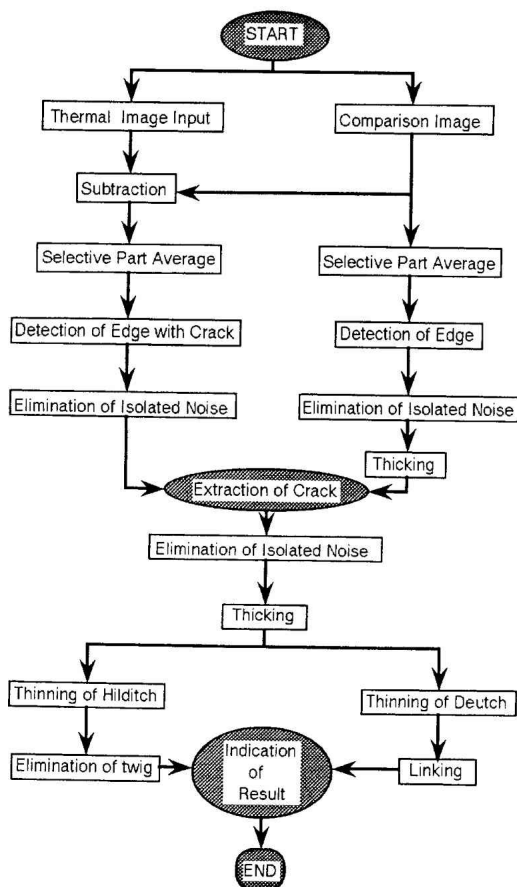


図8 画像処理エキスパートシステムの流れ

グラムを C 言語と CGI(Computer Graphics Interface)で作成した。このプログラムの開発過程においては、平滑化、雑音除去といったさまざまな種類の画像処理の素過程に対応する単位プログラム(C言語の関数)を作成してきた。そして、それらの処理を赤外線映像装置で得た熱画像に対して実行し、その効果や特徴に対する知識・経験を蓄えてきた。実際の処理では

画像処理の素過程をいくつかの組み合わせ、繰返し行うことになる。これが“大まかな処理手順”であり、さらに一連の処理系列の中の各種パラメータには最適な設定(詳細手順の決定)がある。この大まかな処理手順、詳

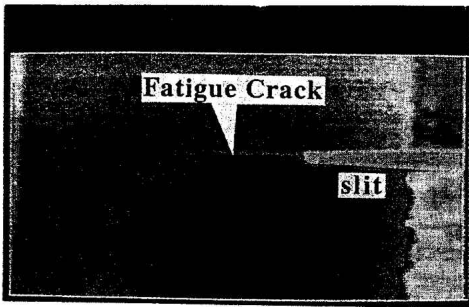


図 3 冷却剤による局所冷却による熱画像

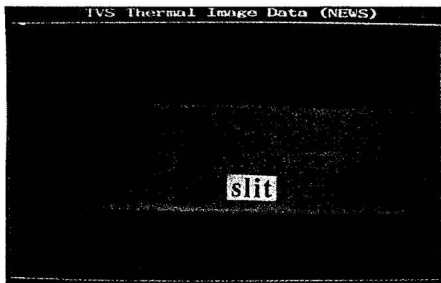


図 4 交流電流通電加熱による熱画像

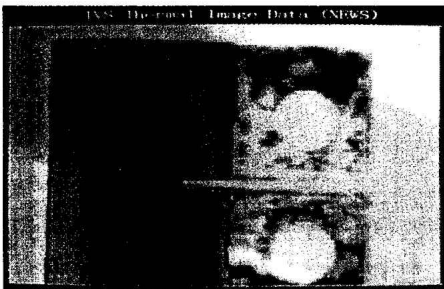


図 5 冷却剤の浸透効果による熱画像

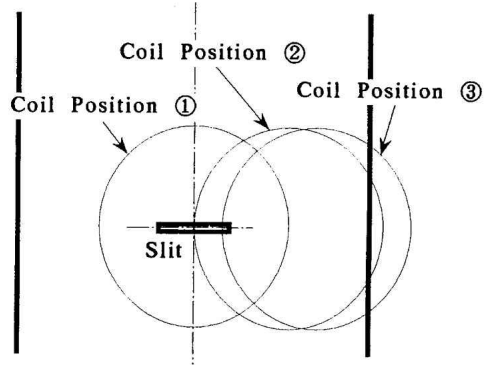


図 6 スリットと加熱コイルの位置関係



(a) スリット(深さ 5 mm 幅 10 mm) コイル位置①



(b) スリット(深さ 5 mm 幅 10 mm) コイル位置②



(c) スリット(深さ 2 mm 幅 10 mm) コイル位置③

図 7 スリットの寸法と加熱コイル位置の関係

細手順に関しても少しは知識を得ることができたと考えている。

そこで、各種画像処理機能とそれらに関する経験・知識をプログラム化し、赤外線映像装置によるき裂検知を支援するための画像処理エキスパートシステム EXPRODEC (EXpert PROgram for DEtecting Cracks) の開発を行った。このプログラムは、図 8 のように一般的な熱画像に対して行うべき“大まかな処理手順”を備えており、処理系列の中の重要なパラメータの設定は、その時点での画像や、画像の特徴を表すグラフなどを見ながら対話形式で行っていくようになっていく。

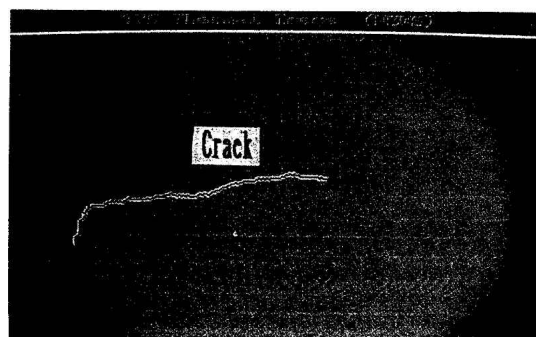
実行例として、図 9 (a) に高周波渦電流による加熱によって検知した CT 試験片の疲労き裂の熱画像（拡大レンズ使用）を示し、その画像処理結果を図 9 (b) に示した。

7. ハニカム構造部材

ハニカム構造部材は、内部がアルミニウムのハニカム構造になっており、表面を CFRP でおおった、軽量かつ剛性の高い材料で航空機などに使われている。この部材の異種材料間の接着面のはく離が近年問題になっている。そこで本研究では赤外線映像装置を用いて、この部材の内部構造を探ることを試みた。



(a) 原画像



(b) 処理結果

図 9 画像処理の結果

その手法は、部材の片面を一様加熱し、もう一方の面を赤外線カメラでとらえ、アルミの熱伝導により CFRP 表面に生じた温度分布をとらえる。そして、その温度分布から内部の様子を観察した。

さらに得られた熱画像を画像処理にかけ、より詳細に内部構造の様子を観察した。将来的には、赤外線映像装置による異種材料間の接着はく離部分の検知を目指す。

図 10 (a) に実験結果を示し、それを基にした画像処理結果を図 10 (b) に示す。

8. 考察とまとめ

本研究で行った赤外線映像装置によるき裂検知の各手法の有効性について以下に述べる。

(1) き裂による熱伝導阻止に基づく方法

- ・非常に簡単に表面き裂を検出できる。
- ・疲労き裂の検知が可能である。

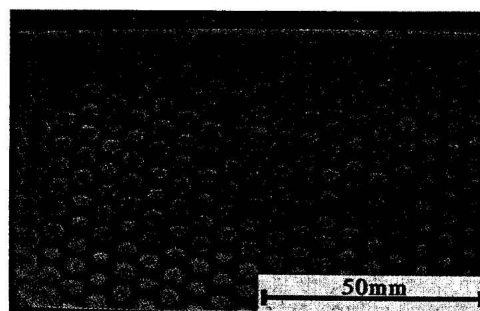
(2) き裂部の電気抵抗値の違いに基づく方法

a 交流電流による通電加熱

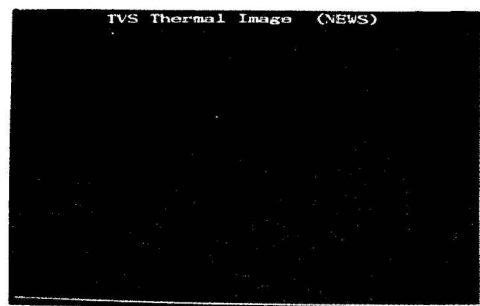
- ・装置がやや大がかりである。
- ・電極の取付けなど手間がかかる。

b 高周波渦電流による加熱

- ・簡単にき裂検出が可能である。
- ・疲労き裂の検知が可能である。
- ・き裂部の抵抗値の違いによる局所的な発熱をと



(a) 実験結果



(b) 画像処理結果

図 10 ハニカム構造部材の内部検知

らえる画像は、特に有効であると思われる。

- ・非接触ではあるが、コイルを構造物にかなり近づける必要がある。

(3) き裂部への浸透効果を利用する方法

- ・非常に簡単に表面欠陥を検出できる。
- ・疲労き裂の検知も可能である。
- ・従来の浸透探傷法より手間がかからない。

(4) スリットの寸法と加熱位置の関係

- ・浅く短いスリットの場合、検知はむずかしいが、加熱の位置を変えてやることにより、検知することが可能である。
- ・スリットの先端がコイル付近に存在するとき、検知能力が高くなるが、スリット全体の様子を知ることができない。

本研究で開発した画像処理エキスパートシステムの有効性について以下に述べる。

- ・き裂を抽出し、明りょうに表示することができる。
- ・二値化などのしきい値の設定を経験に頼らなければならない。
- ・厳密には、き裂の形状およびき裂先端位置の同定ができたとは言えない。

本研究で行ったハニカム構造部材の内部構造検知の有効性について以下に述べる。

- ・非常に簡便に非破壊で内部構造の様子を探ることができる。
- ・厳密な一様加熱を行わなければならない。

以上、赤外線映像装置を利用したき裂の検知に関して、各種の加熱法・冷却法および、開発した画像処理エキスパートシステムの有効性の検討を行った。開発した手法により、どの程度小さなき裂まで検知できるか、また実用的には溶接部のき裂の検知ができるかなど、検討すべき重要な課題が残されているが、これらについては今後の課題としたい。

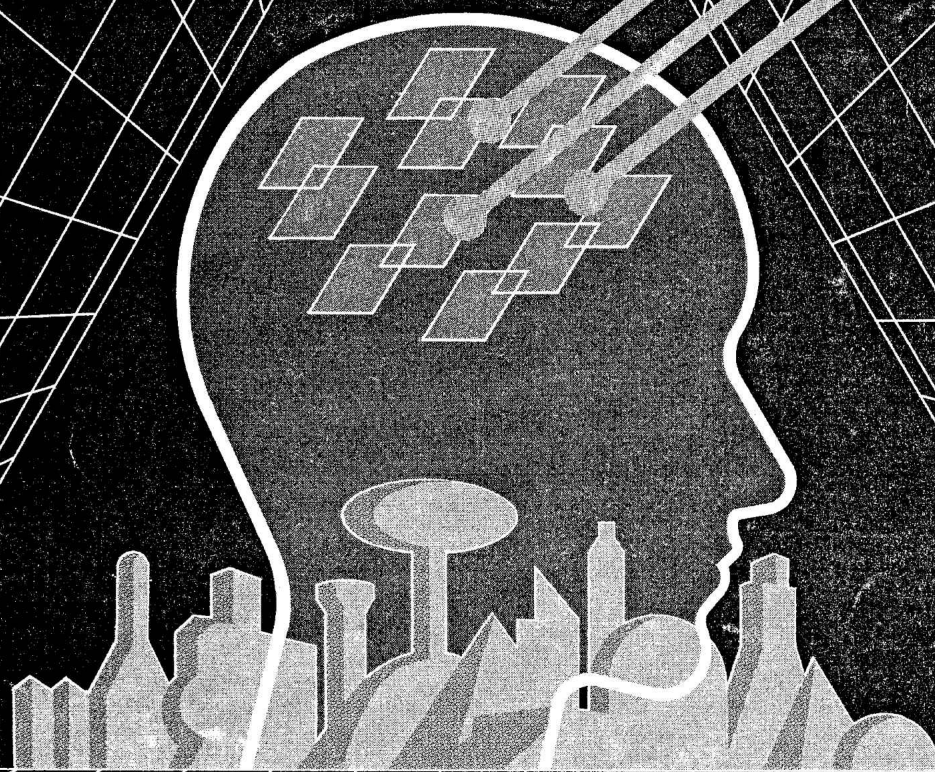
本研究で用いた赤外線映像装置は、日本アビオニクス株式会社より使用の便宜を受けたものである。また、スリット試験片は日本たばこ産業株式会社、ハニカム構造部材試験片は昭和飛行機株式会社より提供していただいたものである。また、研究の遂行においては、当時横浜国立大学工学部学生の方立石巖氏（現日産自動車）、吉村隆志氏（現大日本印刷）の協力を得た。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 白鳥・ほか3名, 機論, 52-478, A(1986), 1553.
- (2) 白鳥・ほか3名, 機論, 53-492, A(1987), 1699.
- (3) 白鳥・ほか3名, 機論, 55-509, A(1989), 159.
- (4) 白鳥・ほか3名, 機論, 55-515, A(1989), 1646.
- (5) 白鳥・ほか2名, 機論, 57-539, A(1991), 1593.
- (6) Shiratori, M., ほか4名, *JSM E Int. J.*, 33-3(1990), 400.
- (7) 阪上・小倉, 機論, No. 900-50(1990-8), 33.
- (8) 伊藤・ほか4名, 第5回破壊力学シンポジウム講演論文集, (1989), 26.
- (9) 白鳥・ほか3名, 機論, 55-511, A(1989), 538.
- (10) 鳥脇, 東海支部・関西支部合同企画第23回座談会画像処理とセンシング技術, (1990), 42.

日本機械学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS



A

編

第556号

December, 1992

第556号

第 **58** 卷

日本機械学会