

## 自動化装置の遠隔監視と故障の自動診断

香川敏昌\*， 柏木利幸\*

### 抄 録

ネットワークを利用して自動化装置の動作状態を遠隔地から監視し，故障の自動診断を行うための研究を行った．マイクロフォンで収集した音響データや，生産機械に組み込まれているシーケンサの入出力データをネットワーク経由で転送し，MTS 法(分散を考慮した多次元解析法)で解析した結果，故障の自動診断が可能であることがわかった．また，生産機械を CCD カメラや赤外線カメラで撮影してネットワーク経由で転送し，画像解析することによって故障の自動診断を行う方法を開発した．

### 1 はじめに

加工装置や検査装置などの自動化装置メーカーでは，限られた人員でメンテナンスと商品開発の両方を実施する必要があり，納入先へ出かけてのメンテナンスは時間的にも費用的にも負担が大きい．そこで，インターネット通信を利用して遠隔メンテナンスを行うための技術開発を行った．実験装置は動作情報を収集してメーカーへ転送するための「ユーザー側システム」と，受け取った動作情報を処理する「メーカー側システム」とで構成した．これら2つのシステムがネットワーク経由でデータ通信することによって遠隔メンテナンスに必要な様々な機能を実現する．本研究では遠隔メンテナンスに必要な機能を実現するために，次の4つの技術を検討した．

- 音響波形による加工ツールの診断
- シーケンサ入出力波形による故障診断
- 動画像による遠隔監視
- 赤外画像による故障診断

### 2 方法と結果

#### 2・1 音響波形による加工ツールの診断

診断を行う対象物として，当センターで保有するプリント基板作成装置を使用した．図1に示すように，ドリルの上部にコンデンサーマイクを取り付けて加工時の音響波形を収集した．図2に音響波形をネットワーク経由で転送するための方法を示す．ユーザー側とメーカー側それぞれに3つのリング・バッファを設け，ユーザー側では Buffer1 Buffer2 Buffer3 Buffer1・・・の順に録音する．録音はサウンドカードを利用し，分解能は16ビット，サンプリング周波数は44.1kHzで行った．各バッファへの録音が終了する度にメーカー側のリング・バッファへ音響波形を転送する．メーカー側では転送が終了したバッファの1つ前のバッファの波形を再生，表示する．この方法によって，音響波形を途切れることなくネットワーク経由で転送することがで

ユーザー側では Buffer1 Buffer2 Buffer3 Buffer1・・・の順に録音する．録音はサウンドカードを利用し，分解能は16ビット，サンプリング周波数は44.1kHzで行った．各バッファへの録音が終了する度にメーカー側のリング・バッファへ音響波形を転送する．メーカー側では転送が終了したバッファの1つ前のバッファの波形を再生，表示する．この方法によって，音響波形を途切れることなくネットワーク経由で転送することがで

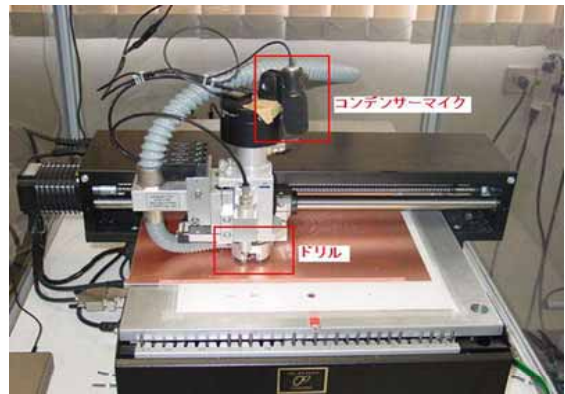


図1 ドリル加工時の音響波形の収集

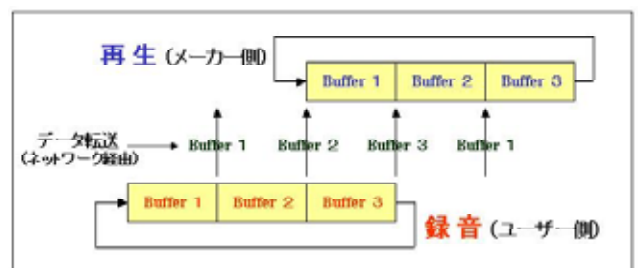


図2 音響波形の録音・転送・再生

\*企画情報課

きた。各バッファの録音時間を1秒に設定したため、ユーザー側で収集した音は2秒後にメーカー側で再生・表示される。

以上の方法で試作したユーザー側システムをプリント基板作成装置に取り付けて加工時の音を遠隔収集し、故障の自動診断に関する実験を行った。

ドリルの先端がプリント基板に接触してから貫通するまでの音響波形を図3に示す。上側は加工時の音響波形そのもので、下側はこの波形を時間軸方向にフーリエ変換した音響強度の分布図である。

図中、赤っぽい部分は音響レベルが高く、青っぽい部分は低いことを示している。

MTS法での故障診断に必要な特徴量の抽出方法として、図4に示すように周波数バンド毎の音響強度の積分値を求めた。0~20kHzを等間隔に5つの周波数バンドに区切り、それぞれのバンドの音響強度の積分値を計算して5つの特徴量とした。

これら5つの特徴量を用いてMTS法でドリルの診断実験を行った。MTS法とは図5に示すように、同じグループではあるがバラツキを持った特徴量を用いて基準空間を作成し、判定の対象となる特徴量から基準空間までのMahalanobis(マハラノビス)距離を計算し、どのグループへの帰属度が最も高い(距離が近い)かを調べる方法である。

図6に示すように、最初に新品ドリル10本で加工を行い、それぞれの音響強度の分布図から5個の特徴量を計算した。これらの特徴量からMTS法に従って基準空間を作成し、これを「正常空間」とした。次に、破損したドリル5本と摩耗したドリル5本で加工を行い、同様に「不良空間」を作成した。

加工中のドリルが正常であるか不良であるかの判定は、マイクで収集した音響波形から音響強度の分布図を求めて5つの特徴量計算し、「正常空間」と「不良空間」それぞれへのMahalanobis距離を計算し、どちらの空間への距離が近いかで判定した。

不良サンプルとして、破損したドリルを5本、摩耗(5000回加工)したドリルを5本、正常サンプルとして新品ドリル20本を用いて加工を行い、その時の音響波形から正常、不良を正確に判定できるかどうかを実験した。その結果、不良サンプル10本の中で、2本を誤って正常であると判定した。また、正常サンプル20本の中で、4本を誤って不良であ

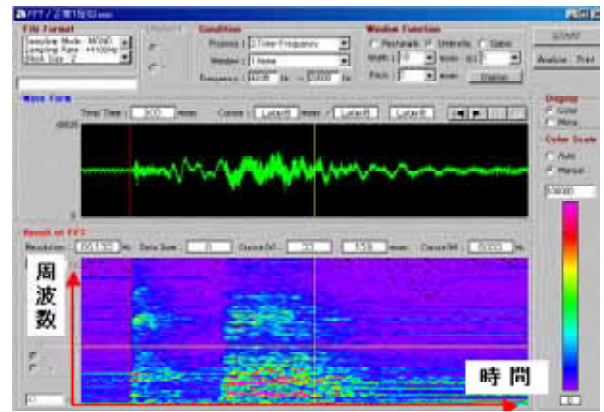


図3 ドリル加工時の音響波形と強度分布

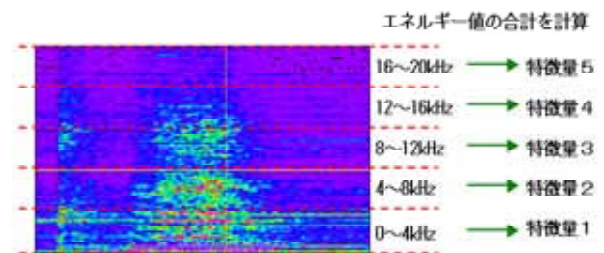


図4 ドリル診断のための特徴量抽出

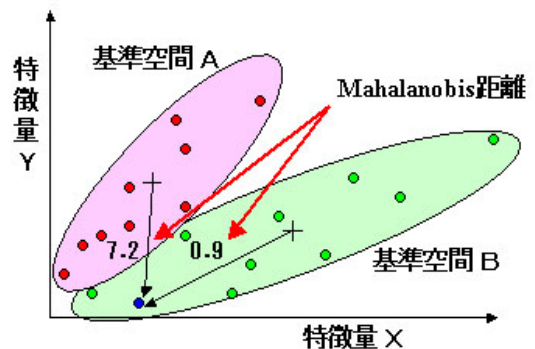


図5 MTS法による分類

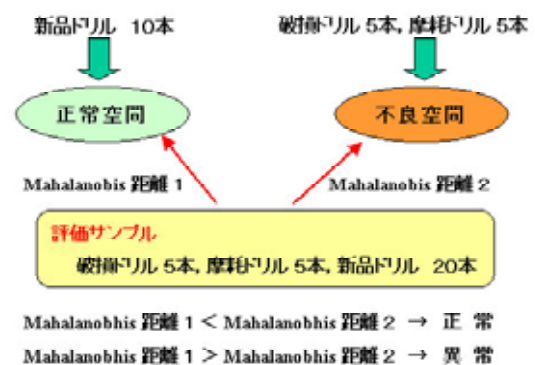


図6 ドリルの不良判定試験

ると判定した。これらの結果から、この方法による判定精度は約80%であることが分かった。

## 2・2 シーケンサ入出力波形による故障診断

大部分の自動化装置には、その制御用にシーケンサが内蔵されている。シーケンサには操作用のスイッチやセンサーからの入力信号、モーターやアクチュエータ制御のための出力信号など大部分の信号が接続されており、故障の自動診断を行う上で入出力波形を検査することは重要である。そこで、図7に示す制御動作を想定して、MTS 法による故障診断シミュレーションを行った。スイッチを押すとモーターが右方向に回転してコンベヤ上の物体は右へ移動する。右端に達すると右リミット・センサが反応してモーターが逆回転する。左端に達すると左リミット・センサが反応してモーターが停止する。

この一連の動作を行った時のシーケンサ入出力波形を図8に示す。各信号の最も近い変化点の間隔(時間)を11個抽出し、MTS 方に従って「正常空間」を作成した。但し、この入出力波形は意図的に作成した模擬信号であるため、実際の機械で発生する特徴量のバラツキが含まれていない。そこで、乱数を利用して信号変化時間に $\pm 20\%$ のバラツキを与えて10個の入出力波形を作成し、これらすべてから11個の特徴量を抽出して「正常空間」を作成した。

図9にシミュレーションの方法を示す。表1に示す5種類の故障を想定して「故障事例空間1~5」を作成し、評価波形を「正常空間」から任意の「故障事例空間」へ徐々に近づけて行った時の、「正常空間」および各「故障事例空間」までの Mahalanobis 距離の変化を計算した。

図10に「故障事例空間1」の作成方法を示す。故障事例1に対応した入出力波形を作成し、乱数による $\pm 20\%$ のバラツキを与えた10種類の入出力波形を作成する。それぞれの波形から11個の特徴量を抽出し、MTS 法に従って「故障事例空間1」を作成した。

図11は、評価波形を正常時の波形(グラフの左端)から故障事例1の波形(グラフの右端)へ徐々に近づけていった場合の各空間への Mahalanobis 距離の変化をプロットしたものである。上側のグラフは「正常空間」からの距離変化で、故障の度合いが強くなるに従って距離が遠くなっていることが分かる。下側のグラフは「故障事例空間1~5」までの距離変化で、「故障事例空間1」までの距離(青線)は急激

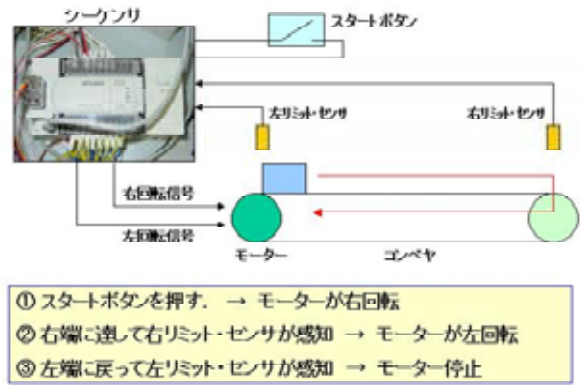


図7 シーケンサによる模擬制御

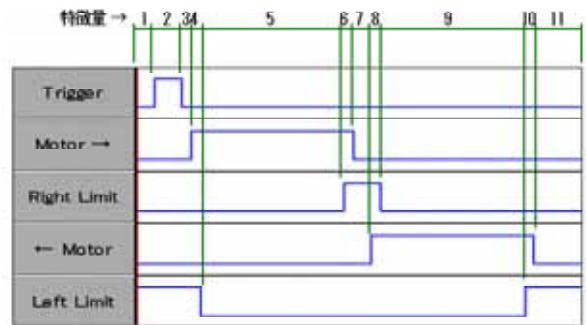


図8 入出力波形と特徴量の抽出

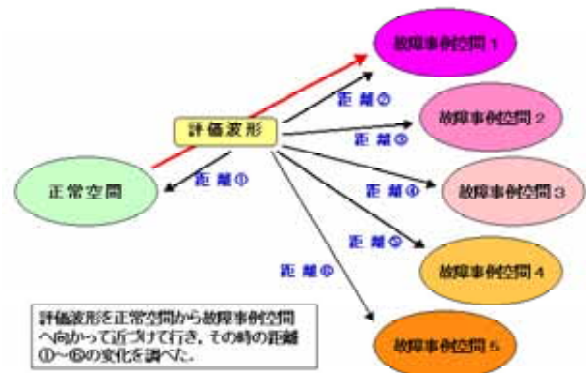


図9 シミュレーションの方法

表1 想定した故障事例

	故障の内容
故障事例1	右端に達する時間が100msec長い
故障事例2	右端に達する時間が100msec短い
故障事例3	折り返してから左端へ戻る時間が100msec長い
故障事例4	右リミット・センサの反応時間が100msec長く、左端へ戻る時間が100msec長い
故障事例5	スイッチを押してからスタートするまでの時間が100msec長い

に近くなっているが、他の空間への距離は増加したり、減少の度合いが少ないことが分かる。

最終的に評価波形が故障事例1の波形に一致した時点(グラフの右端)での「故障事例空間1」への距離が約9.3であるのに対し、他の故障事例空間への距離は300以上と極端に遠い。

同じ方法で「故障事例空間2」へ近付けた場合の各空間への距離を計算した結果を図12に示す。

こちらも同様に、「故障事例空間2」への距離(ピンク線)は急激に近くなっており、故障事例2の波形に一致した時点での「故障事例空間2」への距離が約4であるのに対し、他の空間への距離は1300以上と極端に遠い。さらに、同じ方法で「故障事例空間3~5」に近付けた場合も同様の結果を得ることができた。



図10 故障事例空間1の作成方法

これらの結果から、自動化装置が正常に動作している時の動作波形を記録しておけば、動作に異常が発生した場合に「正常空間」からの Mahalanobis 距離が極端に増加するため、予め故障の発生を予測できることが分かる。また、過去に故障が発生した場合の動作波形を事例としてデータベース化しておけば、各故障事例空間までの距離を随時観測することによって故障やその種類を予測したり、故障が発生した場合の原因や対処方法を特定することが可能である。

### 2.3 動画像による遠隔監視

自動化装置に発生した故障が軽微なものである場合、装置の管理担当者とメーカーの担当者とが電話などで情報交換しながらメンテナンスを行う。この時、メーカー側で現場の様子を視覚的にモニターすることができれば、より適切なアドバイスが可能である。そこで、CCD カメラで装置やその周辺を撮影してネットワーク経由で転送し、メーカー側でリアルタイム動画像として表示するための研究を行った。CCD カメラは自動化装置の適当な部分に取り付けるか、管理担当者が携帯してメーカーからの指示によって必要な部分を撮影する。撮影中の動画像はユーザー側システムのコンピュータに入力し、圧縮しながらネットワーク経由でメーカー側システムのコンピュータへ随時転送する。

図13に試作したメーカー側システムでの動画像表示ソフトを示す。メーカー側から指定した圧縮率で作成されたJPEG画像が指定の速度で配信され、表示される。JPEG画像1枚のサイズは、圧縮率に依存するが、画素数640×480のカラー画像で14~24kBと小さいため、インターネットのス

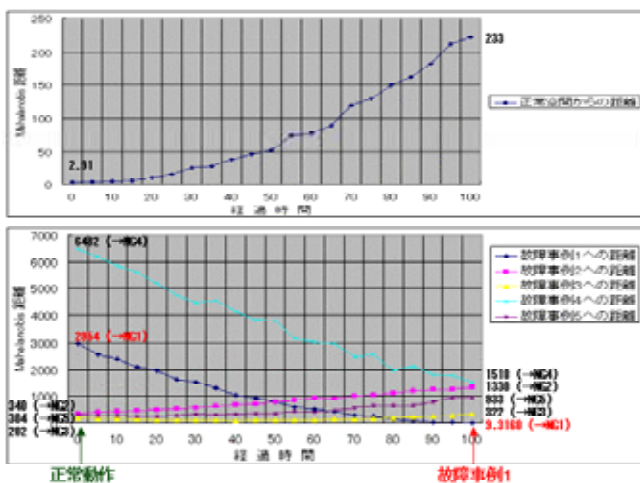


図11 故障事例1へ近づいた場合の各空間への距離

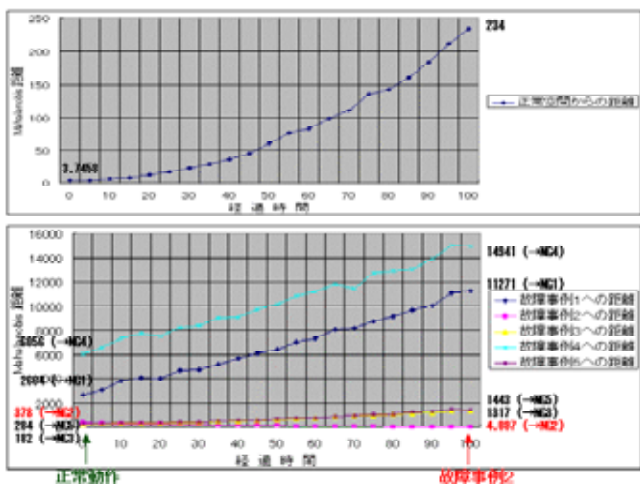


図12 故障事例2へ近づいた場合の各空間への距離

ピードが遅い場合でも、ストレス無く配信することが可能である。また、メーカー側からのコマンドにより、対象機器の動作のみの検出を行うことも可能である。

## 2・4 赤外画像による故障診断

自動化装置の故障を診断する際に、装置表面の部分的な温度上昇や温度分布を調べることで異常を検出できる場合がある。そこで、監視用の赤外線カメラと放射温度計を使用した熱画像のモニターシステムを開発した。熱画像を撮影できるものとしては、サーモグラフィーが販売されているが高価であり、監視目的のように長時間使用する場合には問題がある。これに対して監視用の赤外線カメラは、安価でしかも長時間使用することができる。しかし、監視用の赤外線カメラでは絶対温度を測定することができず、相対的な温度分布しか測定できない。そこで、監視用の赤外線カメラと放射温度計を組み合わせることによって、絶対温度の分布測定を可能にするためのシステムを開発した。

まず、放射温度計で対象物表面の任意の1点の絶対温度を測定する。次に、赤外線カメラで温度分布画像を撮影し、放射温度計で測定した時と同じ点の絶対温度を基準に温度分布画像の各点の絶対温度を計算して熱分布画像として表示する。

試作した熱分布画像のモニター画面を図14に示す。この図で、左側が赤外線カメラの画像で、右側が計算した絶対温度を基に擬似カラー表示した画像である。また、図15に本システムを用いて機器の内部の絶対温度分布を撮影した結果を示す。

本システムには、監視する部分をラインで指定し、そのライン上の温度が指定の温度範囲を超えた場合に異常であると自動で判断する機能を備えている。このような機能は、人間が常時監視できない場合に非常に有効である。図16の温度モニター画面で、点線で示しているラインが温度監視箇所であり、そのライン上の温度の時間的な変化を右側にグラフ表示している。判定は、設定温度の上限値と下限値の間に観測温度があるときはOKで、どちらかの範囲を超えた場合にNGとなる。また、対象機器が異常となった場合のために、一定の時間間隔で、計測したライン上の温度データを保存する機能もあり、故障時の原因を探る上で有効な手段となる。

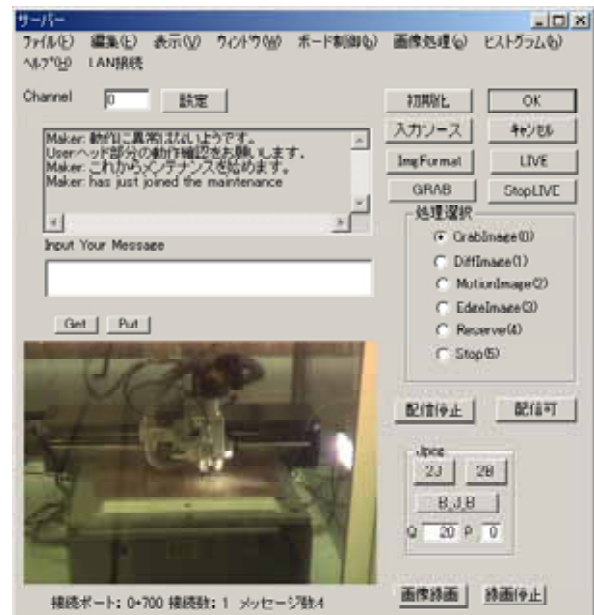


図13 動画像による遠隔モニター画面

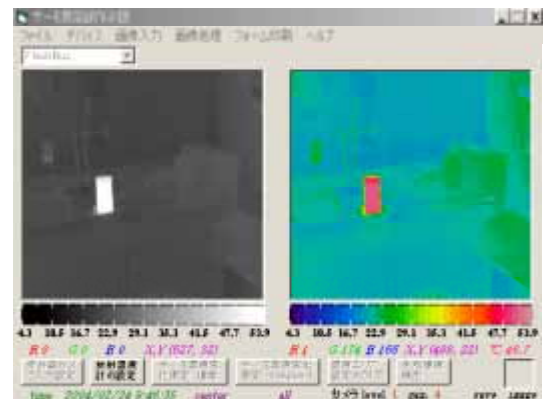


図14 熱分布画像表示システム

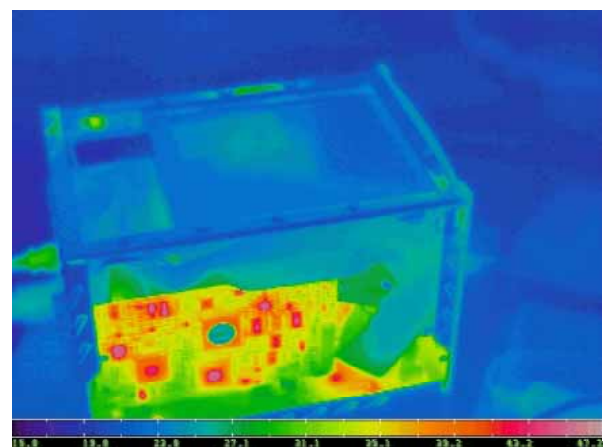


図15 熱分布画像の測定例

## 3 考察

音による故障診断の一例として加工ツールの診断を行い、約80%の診断精度が得られた。この精度は実用的なレベルではないが、加工ツールに限らず、

対象装置やその周囲に設定された他の装置から発せられる音をモニターすることは、故障の診断や原因の究明を行う上で有効な手段であり、今後の検討が必要である。

また、MTS 法によるシーケンサの入出力波形の診断は、特徴量のバラツキを考慮した診断方法である。通常、動作データを利用して故障の自動診断を行う場合、データのバラツキを観察しながら判定のためのしきい値を設定する必要がある。しかし、データの種類が多い場合、それらすべてに適切なしきい値を設定することは困難である。

本研究による方法では、多数の特徴量を用いて、しかも動作のバラツキを考慮した判定用の基準空間を自動作成するため、しきい値を設定する必要がない。また、MTS 法で定義されている有効性解析を用いることによって、多数の特徴量の中から故障の診断に有効な特徴量のみを自動選定したり、複数の特徴量の中から故障に至る原因と考えられる特徴量を自動的に発見することも可能であり、故障診断において有効な方法であると考えられる。

動画像による遠隔監視は、装置そのものの動作状態を診断できるだけでなく、周囲の状況や管理担当者のメンテナンス作業をメーカー側で観察できるため、自社に居ながらにして適切なアドバイスを送ることが可能である。

赤外画像と放射温度計を併用した絶対温度分布の測定方法は、従来の温度計測システムに比べて安価であるだけでなく、装置全体の温度変化を監視しながら高精度な異常の検出が可能であり、故障の自動診断や予測に有効な手段である。

今後、これらの成果を実際の自動化装置に適用して問題点を抽出し、実用化に適した改良を進めていく必要がある。

## 謝 辞

本研究は、平成 15 年度中小企業技術開発産学官連携促進事業を利用して実施したものであり、貴重なご意見、ご指導をいただきました徳島大学高度情報化基盤センター長の大恵俊一郎様をはじめとする

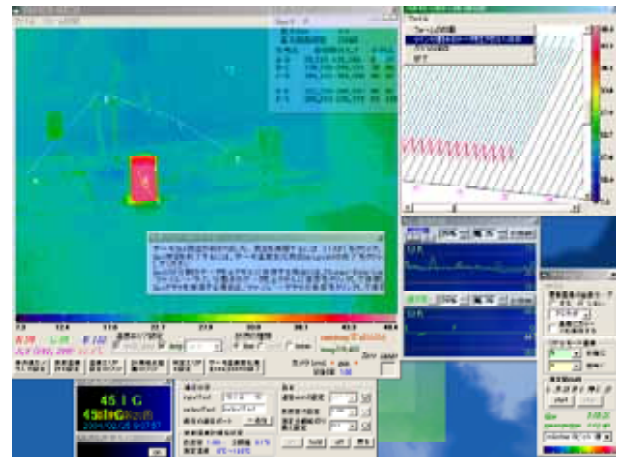


図 16 ライン指定による自動温度監視

産学官連携推進委員会の皆様方に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1)中野宏毅・山本鎮男・吉田靖夫：「ウェブレットによる信号処理と画像処理」, 共立出版 (2002 年)
- 2)P.J.Brockwell・R.A.Davis：「入門時系列解析と予測」CAP 出版(2000 年)