

打音検査における画像処理と音響処理の融合

Image and Sound Signal Processing in Hammering Test

○正 山下 淳 (静岡大) 原 隆弘 (静岡大) 金子 透 (静岡大) 正 三浦 憲二郎 (静岡大)

Atsushi YAMASHITA Takahiro HARA Toru Kaneko Kenjiro T. Miura
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

Abstract: In this paper, we propose a new method for a hammering test by using image and sound signal processing techniques. A method for discriminating a property of an object with the use of generated sound when striking it with a hammer is called a hammering test. However, this method depends on human experience and skills. In addition, if we perform this test over a wide area of objects, it is required to manually record hammering positions one by one. Therefore, this paper proposes a hammering test system consisting of two video cameras that can acquire image and sound signals of a hammering scene. The shape of the object is measured by the image signal processing from the result of 3-D measurement of each hammering position, and the thickness or material of the object is estimated by the sound signal processing in time and frequency domains. The validity of proposed method is shown through experiments.

Key Words: Hammering Test, Image Processing, Sound Signal Processing, 3-D Measurement, Discrimination Map

1. 序論

物体を叩いてその音の違いを聞き分けることで厚薄や材質の違い、欠陥の有無などを調べることができる。このように物体を叩いたときに発生する音を判別して検査する方法を打音検査法と呼び、発生した音を打音という。打音検査法には非破壊で簡易的に行えるといった長所があり、目で見ることが不可能な部位の検査において音を利用した打音検査法は非常に有効な方法のひとつである。人間は聴覚によりさまざまな現象における発生音の振幅や周波数などを記憶し、これと対比することができる。よってさまざまな判断を行うことができ、打音検査が可能となる。しかし打音検査は人間の経験や感覚に基づいて行われており、個人差もあるため客観性に欠けるといった問題点もある。そこでこの問題点を克服するために打音を数値的に解析し検討する必要がある。

打音検査の研究例としては、トンネルなど覆工コンクリートのひび割れの有無について打音を用いて解析的に検査を行う研究^{(1)~(4)}があり、これらの研究はコンクリートを対象として行われている。ただし、ひび割れ部と正常部の違いを評価しているだけのものが多く、実際に打音検査を行って具体的に厚さやひび割れなどの不可視部情報の推定を行っているものが少ない。他には、超音波を用いて可視部のひび割れ深さを検出する研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾も行われているが、あらかじめ可視部のひび割れを検出している付近に対して送受両探触子を接触させているため、不可視部情報を対象としていない。また、画像処理により構造物の損傷を検出する研究⁽⁷⁾も行われているが、画像のみを用いているため、不可視部情報を得ることはできない。

さらに、打音検査をある面積にわたって実施する場合、その検査結果の分布を知るために、どの位置を叩いたかなど打音位置を記録する必要がある。その具体的な方法としては、例えば検査領域に目盛をつける、物差をあてるなどして位置情報を読み取る方法が考えられる。しかし、これらの作業は大きな手間を必要とし、検査の効率を上げる上での 1 つの問題点となる。そこで画像処理を用いて打音位置を特定することができれば、全打音データをその位置情報と共に簡単に記録することができる。しかし、これまで打音検査に対して画像処理を同時に組

み込んだ試みはあまりなされていない。

そこで本研究では、画像信号と音響信号を同時に取得し処理を行う打音検査法を提案する。本手法に必要な機材はFig. 1に示すように、検査対象物体を叩くハンマー(人間が叩くものとする)と 2 台のビデオカメラであり、ビデオカメラは画像(映像)信号と音響信号を同期させて記録することができる。

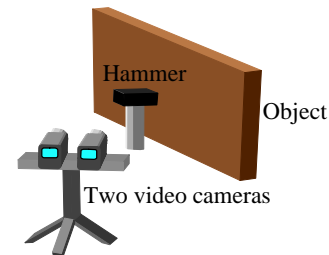


Fig. 1 Overview of hammering test.

音響処理では打音の違いを時間領域と周波数領域の両面から処理を行うことで、材料表面からは観測不能な厚薄や材質を計測する。

以下、提案手法における画像処理と音響処理の原理について説明し、厚薄判別と材質判別に関する検証実験により本研究の有効性を示す。

2. 打音検査手順

本手法は以下に示すように大きくわけて 2 つの処理から構成される。

事前処理

- (1) 音響処理
- (2) クラスタリング
- (3) 判別マップの作成

打音検査

- (1) 音響処理による不可視部情報の計測
- (2) 画像処理による可視部情報の計測
- (3) 打音検査結果の統合・提示

事前処理では判別マップを作成することを目的とする。ここで判別マップとは、音響処理で得られる特徴量を用いて、例えば厚薄や材質などの不可視部情報の違いを表現する図のことである。この判別マップは打音検査に先

だつて部材の厚薄や材質の代表的と思われる部分からサンプル点を収集して作成しておき、打音検査で不可視部情報を判別するとき用いる。

打音検査では実際の打音の様子を撮影し、音響処理と判別マップから不可視部情報を計測する。また画像処理では可視部情報の3次元情報を計測する。この2つの結果を統合して打音検査の結果を示す。

3. 事前処理

まず事前処理として判別マップを作成する。判別マップは検査対象物体の代表的部分を事前に叩き音響信号を取得した上で、以下に示す各処理を行い作成する。

3.1 音響処理

音響処理では外部からは見えない部材の厚みや材質などに関する不可視部情報を取得する。不可視部情報の変化による打音の違いを定量的に評価するため、時間領域と周波数領域の両面から解析した特徴量を利用する。本節では時間領域と周波数領域それぞれの処理法について説明する。

3.1.1 時間領域における処理法

時間領域における処理では、音波の減衰指数を特徴量として利用する。まず、音が鳴り始める時間 T_s を見つける必要がある。そこで振幅が急激に大きくなった時間を T_s と定義し、以下の条件を満たす時間 t を T_s と見なす。

$$|y(t+\Delta t)| - |y(t)| > L_1 \quad (1)$$

$$\left| \frac{y(t+\Delta t)}{y(t)} \right| > L_2 \quad (2)$$

ただし、 $y(t)$ は時間 t における振幅、 Δt は微小時間、 L_1 、 L_2 はそれぞれ閾値である。

減衰時間は室内音響学では一般に振幅が60dB減少するまでの時間、すなわち振幅が1/1000まで減少するまでの時間として定義されている。しかし、屋外環境など雑音が多量存在する条件の下では、雑音が大きすぎるためこの定義を打音解析に適用することは困難である。

そこで音波の減衰について、微小時間における $y(t)$ の絶対値の平均を表す $\bar{y}(t)$ を考え、次の方程式によって表せると仮定する。

$$\bar{y}(t) \cong C \times e^{-B(t-T_s)} \quad (t > T_s) \quad (3)$$

実際のデータに対して最小2乗法を利用することで、上式右辺の指数 B を求め、得られた指数 B を以後の音響処理過程で減衰指数として利用する (Fig. 2)。

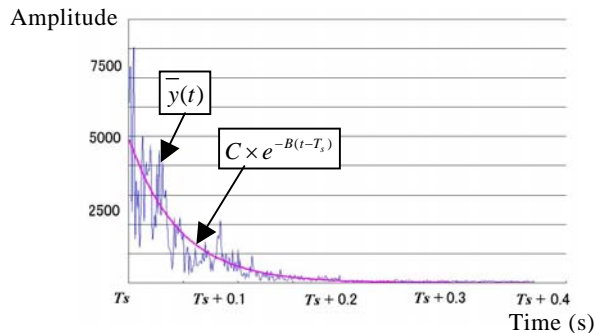


Fig. 2 Example of approximate curve.

3.1.2 周波数領域における処理

周波数領域における処理では、周波数スペクトルを得るために高速フーリエ変換 (FFT) を用いる。スペクトル分布を比較するために、周波数の平均値 \bar{f} からの広がりを表す周波数特徴量 V_f を式(4)から求める (Fig. 3)。

$$V_f = \frac{1}{A_s} \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 (f_i - \bar{f})^2} \quad (4)$$

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i A_i^2}{A_s^2} \quad (5)$$

$$A_s^2 = \sum_{i=1}^N A_i^2 \quad (6)$$

ただし、 f_i は i 番目の周波数、 A_i は i 番目の周波数成分の振幅、 N はデータ数である。

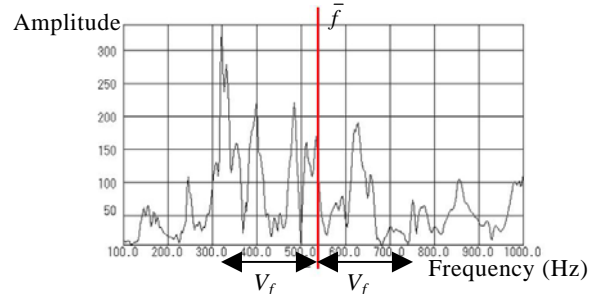


Fig. 3 Result of FFT.

3.2 クラスタリング

打音検査においては、厚さや材質などが他の部分と異なる部分を抽出することが重要である。そこで、クラスタリング処理により不可視部情報のグループ分けを行う。各打音の音響信号に対して3.1の処理により減衰指数 B と周波数特徴量 V_f を求めることができる。そこで横軸を B 、縦軸を V_f として各値をプロットした B - V_f 図を作成する。その後、プロットされた各点に対してISODATA法⁽⁸⁾を用いてクラスタリング処理を行い、不可視部情報をグループ分けする。ここでは、厚さや材質など n 種類の異なる性質を持った場所 (不可視部情報) において、 B - V_f 図に厚薄の違いに応じたグループを n 個作成しそのグループの中心位置を求める処理を行う。 $n=3$ としてクラスタリング処理した例をFig. 4に示す。

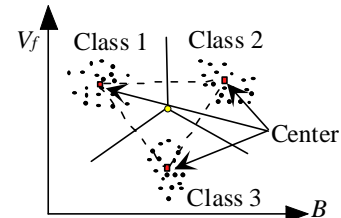


Fig. 4 Example of clustering and B - V_f diagram.

3.3 判別マップの作成

判別マップは不可視部情報を判別するために事前に作成する。クラスタリング処理により各グループの中心位置が求まるので、この各中心位置に不可視部情報の違いを表す値を与える。本研究ではこの値として厚さや材質の違いを直感的に提示するため色の違いを与えることとする。3.2で作成した B - V_f 図全体をこの色の違いで表せるように、各中心位置との距離関係から線形変化させた色の値を設定する。このように B - V_f 図全体の座標において色の値が与えられた図を判別マップと呼ぶことにする (Fig. 9(a), Fig. 12(a))。

4. 打音検査

検査対象物の表面を叩くことにより、打音点の位置とその打音点の不可視部情報を順次取得する。

4.1 音響処理による不可視部情報の計測

各打音点において3.1の音響処理による特徴量 B および

V_f を計算し、この結果と判別マップとを対応させてその色の値を読み取ることで対象物体の任意部分における不可視部情報を色情報として表現する。

4.2 画像処理による可視部情報の計測

検査対象物の打音点特定・立体形状復元を行うためには、打音位置の3次元情報を計測する必要がある。本研究では2台のカメラを用いたステレオビジョンにより3次元情報計測を行う。具体的には打音検査を行う際に用いるハンマーの3次元情報を利用する。ハンマーには位置・姿勢の計測が容易となるように特徴となるマークを数ヶ所に付着しておく。ハンマーの3次元位置・姿勢を計測することにより、叩いた瞬間にハンマー自身によって隠れてしまう検査対象物体の表面の3次元位置情報を得ることができる。ここでは、両側面に2箇所ずつ、頭面に1箇所マーク（マーク間の位置関係は既知）の付いたハンマーを用いる（Fig. 5）。

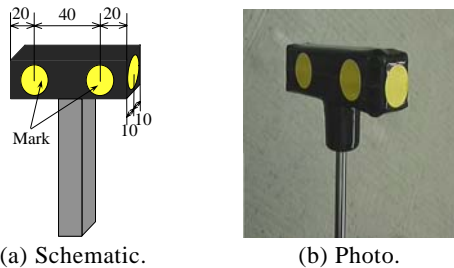


Fig. 5 Hammer.

まず音響処理により音の鳴り始める時間 T_s を求め、時間 T_s における画像を動画から抽出する。ここで、2台のカメラにおいてそれぞれ時間 T_s を求めることにより対象物を叩いた瞬間の画像を正確に同定することができるため、カメラ間の同期信号は必要ない。

画像からハンマーのマークを抽出する方法は以下の通りである。まず、ハンマーなど動物体が写っていない画像と時間 T_s における画像の差分処理を行うことで、ハンマーのみを抽出できる。この差分画像に対して2値化、膨張収縮、ラベリングの処理を施すことで画像上のハンマーのマークを抽出する（Fig. 6）。

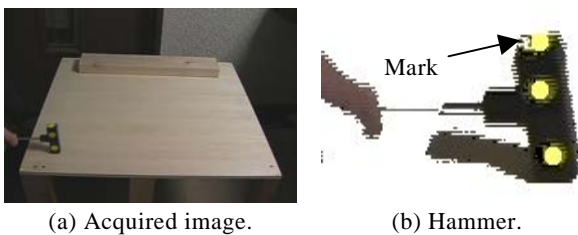


Fig. 6 Extraction of hammer's marks.

2台のカメラから得られる画像それぞれについて上記の処理を行い、画像における各マークの位置を抽出する。2枚の画像間で対応するマーク同士の視差を求めることで、三角測量の原理により各マークの3次元座標を求めることができる。最終的に、各マークの位置関係を用いることにより、打音点の3次元座標およびその位置での対象物表面の法線ベクトルを求めることが可能である。

4.3 打音検査結果の統合・提示

打音点の位置情報については、得られた3次元空間中の点群に対して形状復元を行う。ここでは、点群が平面を構成する場合には平面当てはめを行い、平面でない場合には3角パッチを用いて形状を表現する。

また、検査対象物体全体の厚薄や材質を表現するため

に、近傍4打音点の厚さを表す色の値から補間法を用いて各打音点間の領域の色の値を求める。具体的には、近傍4点で生成する四角形において、それぞれ縦横 M 分割し M^2 個の四角形を生成する。この M^2 個の四角形を平面状の点とみなして線形補間法をあてはめる。

5. 実験

音響信号と画像信号を容易に抽出できるように、デジタルビデオカメラを用いて打音検査の撮影を行った。また、ハンマーを用いて検査対象物の表面に対して垂直方向から同程度の力で叩くことで打音検査を行った。

計算機に取り込むデータについては、映像信号は画像サイズ 720×480 pixel、フレーム数 29.97 frame/s、音響信号はサンプリング周波数 44.1 kHz、チャンネル数1（モノラル録音）、ビット数16ビットと設定した。

5.1 厚薄判別

Fig. 7に示す木板の上部から撮影を行い、物体の厚薄判定の検証を行った。木板の厚さは3段階で構成されており、不可視部領域における厚い部分（クラス1）を 312 mm、可視部領域における厚い部分（クラス2）を 47 mm、薄い部分（クラス3）を 12 mmとした。

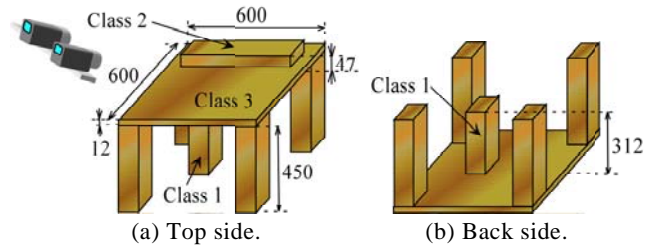


Fig. 7 Object I.

Fig. 8にそれぞれの厚さにおける打音波形（左図）とFFTによる周波数スペクトル（右図）の例を示す。ただし、FFTを行う際にはハニング窓を利用し、周波数特徴量 V_f は特に変化をもった周波数分布が見られる 100 Hzから 1 kHzまでの周波数帯で計算した。厚薄の違いで打音波形および周波数分布に違いがあることが分かる。

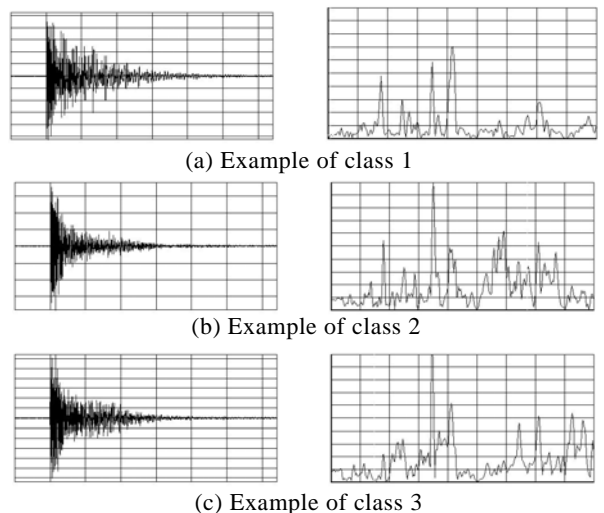


Fig. 8 Results of original signal and FFT.

また、クラスタリング処理により生成された判別マップをFig. 9(a)に示す。ここで、クラス1はイエロー、クラス2はシアン、クラス3はマゼンダとした。

各打音点における木板の厚薄を調べた結果をFig. 9(b)に示す。木板を 7×8 点について各点数回ずつ叩き、不可視部情報の厚さ（色の値）を決定した。

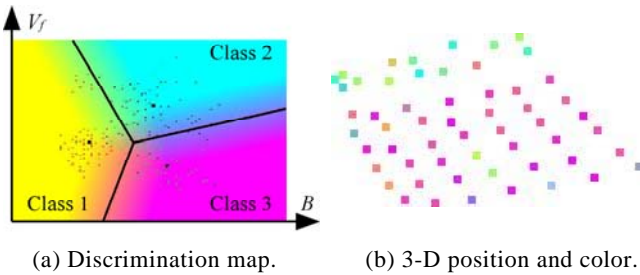


Fig. 9 Discrimination map and 3-D position of object I.

打音点以外の検査対象物表面の 3 次元位置および色を示した結果を Fig. 10 に示す. (a) は線形補間により表面を形成した結果, (b) は実際の検査対象物体の様子である.

3 次元形状および厚さの計測結果は, 実際の値とほぼ一致しており, 良好な結果が得られた.

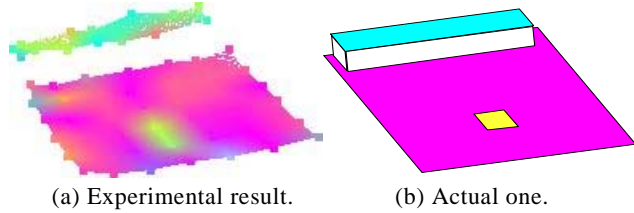


Fig. 10 Hammering test of object's thickness.

5.2 材質判別

材質判別に用いた実験対象を Fig. 11 に示す. 用いた材質は, 木, 発泡スチロール, プラスチック, コルクの 4 種類であり, これら 4 種類の材質を接着した. また材質の違いは画像によって色で判別できる恐れがあるため, 実験時には全体を白く覆い撮影を行った.

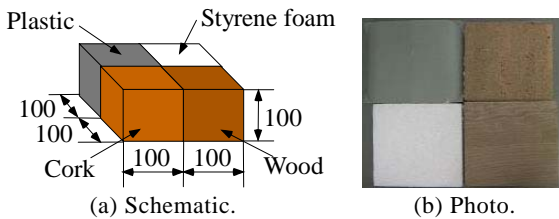


Fig. 11 Object II.

判別マップを Fig. 12(a), 各打音点の位置および色を Fig. 12(b), 検査対象物全体の結果を Fig. 13 にそれぞれ示す. 厚薄判別の場合と同様に, 3 次元形状および材質の計測結果は, 実際の値とほぼ一致した.

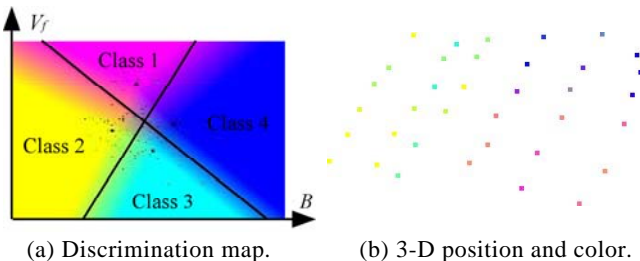


Fig. 12 Discrimination map and 3-D position of object II.

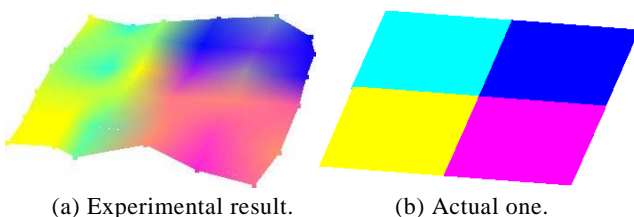


Fig. 13 Hammering test of object's material.

計算時間については, Pentium IV 1.6GHz の計算機を用いた場合, 打音点 1 箇所につき, 音響処理による不可視部領域の情報推定および画像処理による 3 次元位置算出に平均 2.3s 必要であった. 実際の作業では 2.3s 以内に 2 箇所以上の場所を叩くことは難しいため, リアルタイム処理に問題はないと考えられる. ただし, この計算時間に事前の判別マップ作成に必要な時間は含まれていない.

また, 叩く強さと音響処理における特徴量の関係について調べるため, 強・中・弱・微弱の 4 段階の叩き方で実験を行った. その結果, 雑音のレベルが相対的に大きくなる微弱以外の条件では, ほぼ同程度の特徴量の値となった. これは, 採用した 2 種類の特徴量はいずれも音の強さに影響を受けにくい特徴量であるためである.

6. 結論

本研究ではビデオカメラを用いて, 音響処理と画像処理を融合させた自動打音検査法について提案した. 音響処理では減衰指数と周波数分布の 2 つの特徴量を用いて木板の不可視部の厚薄を推定した. また画像処理ではハンマーの 3 次元形状を計測することで打音位置の 3 次元計測を行った. 検証実験により本手法の有効性を確認することができた. 以上, 本研究で提案した手法の利点は以下の通りである.

- ・特別な機器を新たに導入する必要がない
- ・音が鳴り始める時間を 2 台のカメラでそれぞれ求めることにより, カメラ間で同期を取る必要がない
- ・ハンマーの位置を計測しているため, テクスチャのない表面を持つ対象物の 3 次元形状も計測可能
- ・打音検査結果を定量的かつ簡便に保存可能
- ・色を用いることで直感的に人間に情報を提示可能

また, 今回の実験ではほぼ一定距離間隔で対象物を叩いたが, 他の場所と特徴が異なった場所を発見した場合には人間にその場所をより詳細に叩くように指定することにより, 検査の精度を向上させることも可能であると考えられる.

今後の課題としては, 検査項目を厚薄や材質のほかにも欠陥などに拡張することが挙げられる.

参考文献

- (1) 榎本 秀明, 稲川 敏春, 鈴木 文大, 松林 弘智, 千鳥 雅由: “トンネル履工コンクリートを対象とした打音評価手法”, 物理探査学会第 104 回学術講演論文集, pp.65-69, 2001.
- (2) 伊東 良浩, 魚本 健人: “ひび割れを有する鉄筋コンクリート梁の打撃音”, 土木学会論文集, Vol.35, No.564, pp.169-176, 1997.
- (3) 鎌田 敏郎, 浅野 雅則, 国枝 稔, 六郷 恵哲: “コンクリート表面部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用”, 土木学会論文集, Vol.55, No.704, pp.65-79, 2002.
- (4) T. Hirata and T. Uomoto: “Detection of Ultrasonic Pulse Echo through Steel Bar in Concrete Crack Depth Measurement”, *Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000*, pp.383-390, 2000.
- (5) 山口 哲夫: “超音波法によるコンクリートひび割れ深さの測定”, 非破壊検査, Vol.47, No.9, pp.636-641, 1998.
- (6) N. Kato, N. Saeki, Y. Tanigawa, K. Kato, T. Kawai and Y. Murata: “Evaluation of Deterioration and Specification of Defect of RC Structure by Natural Potential and External Impact-Acoustic Methods”, *Materials Science Research International*, Vol.7, No.2, pp.138-146, 2001.
- (7) 川合 忠雄, 伊藤 正称, 池田 直人: “画像処理を用いた建造物の損傷検知”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No.653, pp.17-22, 2001.
- (8) G. H. Ball and D. J. Hall: *ISODATA – Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*, Stanford Research Institute, 1965.