日本機械学会論文集(C編)
72巻715号(2006-3)

論文 No. 05-0691

画像処理と音響処理の融合による打音検査*

山下 淳*1, 原 隆浩*2, 金子 透*3

Hammering Test with Image and Sound Signal Processing

Atsushi YAMASHITA*4, Takahiro HARA and Toru KANEKO

*4 Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Sizuoka, 432-8561 Japan

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: Image Processing, Sound Signal Processing, Hammering Test, Stereo Measurement, FFT

1. 序 論

本研究では，検査対象を叩きながら観察することで，物体の形状や位置など目に見える性質（以降，可視部情報と呼ぶ）と，物体の内部構造や材質の違いなど目に見えない性質（不可視部情報）を同時に計測する手法を提案する(1)．

一般的に，可視部情報の計測を行う場合には，カメラなどの視覚センサから得られる映像信号を用いることが有効である．それに対して，不可視部情報を視覚センサで計測することは困難であるため，音響信号が利用されることが多い．具体的には，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1つである(2)．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．しかし人間による打音検査は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．

打音の数値的解析については，コンクリート構造物の安全性の維持は重要であるため(3)，コンクリートの打音検査に関する研究(4)~(8)が数多く提案されている．鋼球をコンクリートに落下させる基礎実験やFEMによる解析を用いた研究(5)~(7)では打音の基本特性を調べているが，温度や湿度などの変化により打音が変化するため，様々な環境で不可視部情報を正確に推定することは困難である．実際の検査においては，欠陥の可能性がある部分，つまり打音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，実験時の環境に応じて，打音の違いを定量的に分類することが重要となる．

打音検査以外には，超音波を用いて可視部のひび割れ深さを検出する研究(9)~(13)も行われている．しかし，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検査を行う必要がある．従って，打音検査と比較すると，広範囲にわたり作業

* 原稿受付 2005年6月23日.
*1 正員，静岡大学工学部(〒432-8561 浜松市城北3-5-1).
*2 三菱電機(株)三田製作所(〒669-1513 三田市三輪2-3-33).
*3 静岡大学工学部.
E-mail: yamashita@ieee.org

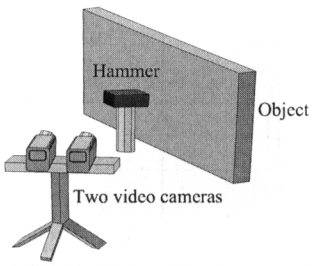


Fig. 1　Overview of hammering test.

を行う場合の手間が非常に大きい．

また，構造物の接合部に損傷が存在すると剛性が変化したわみが生じるため，画像処理によってたわみ角を求めることで損傷検知を行う研究[14]も行われているが，たわみが発生しない場所での検査は困難である．

一方，トンネルなど覆工コンクリートの検査では，打音検査に加えて目視検査を行う必要がある[8]．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，検査の効率化のための1つの問題点となる．そこで画像処理を用いて外部形状や打音位置を計測することができれば，目視検査も自動的に行うことができると同時に，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可能となる．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図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．

本研究では，取得した信号を用い，画像処理と音響処理を融合した打音検査を行うことで，可視部情報と不可視部情報を同時に計測することを目的とする．具体的には，画像処理と音響処理の融合により，音響だけを用いた従来の打音検査では検出不可能であった空間情報を含めた材質などの相違を識別することが可能となる．また，複数台のカメラを用いて計測を行う場合には一般的にカメラ間の同期を取る必要があるが，本研究では打音の瞬間を音響処理により検出することで，同期装置を用いずにカメラ間の画像・音響信号の同期を取ることが可能である．更に，例えば画像では見えない部分の形状情報を音響により識別するなど，音響信号により画像信号の不足分を補うことなどが可能となる．

具体的な処理としては，任意の環境において打音の違いを定量的に分類するために，その環境で実際に検査の前に対象を叩いて事前処理を行い，その結果を用いることとする．また，打音位置は2台のカメラを用いたステレオ計測により求める．

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っ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際に用いる．

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

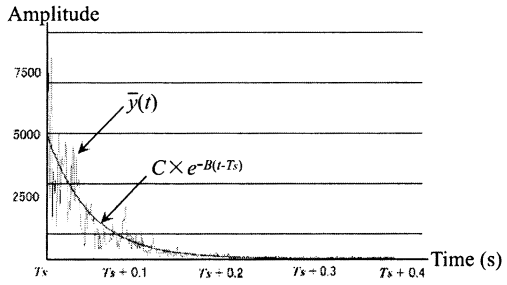


Fig. 2 An example of raw sound wave and its approximation curve.

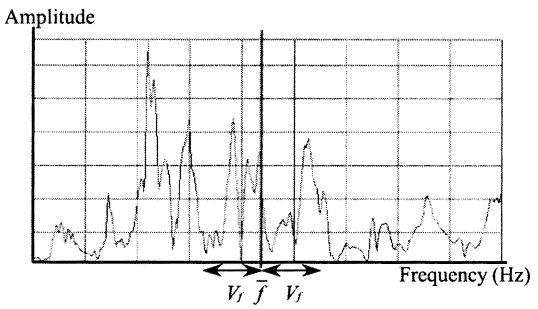


Fig. 3 An example of frequency spectrum with FFT.

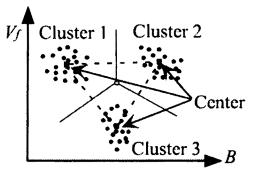


Fig. 4 Example of clustering in B-V_f diagram.

義し，以下の条件を満たす時間 t を T_s と見なす．

$$|y(t+\Delta t)|-|y(t)|>L_1, \tag{1}$$

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

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数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．

$$\bar{y}(t)=C\times e^{-B(t-T_s)}, \tag{3}$$

ただし，$t>T_s$ である．

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（図 2）．

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 を以下の式により求める（図 3）．

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

ただし，

$$\bar{f}=\sum_{i=1}^{N}\frac{f_iA_i^2}{A_s^2}, \tag{5}$$

$$A_s^2=\sum_{i=1}^{N}A_i^2, \tag{6}$$

であり，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．

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，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，打音検査を行う前にはグループ数は分からないことが想定される．そこで，クラスタ数が可変であるという特徴を持つ ISODATA 法[15]と呼ばれるクラスタリング手法を用いてグループ分けを行う．本研究では，自動クラスタリング用に従来手法を変更した ISODATA 法[16]をベースにして，筆者らが改良し文献[17]で用いた ISODATA 法を使用した．

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（図 4）．

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

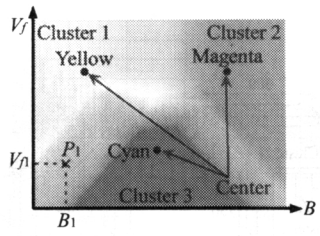
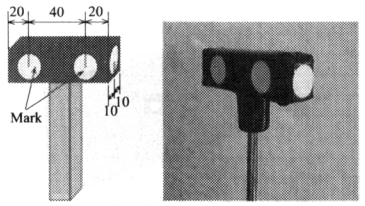


Fig. 5　Example of discrimination map.



(a) Schematic.　(b) Photo.

Fig. 6　Overview of the hammer.

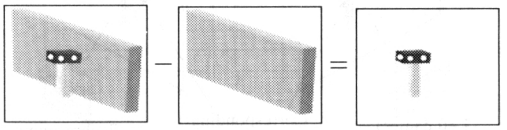


Fig. 7　Extraction of the hammer from images.



(a) Acquired image.　(b) Enlarged image of hammer.

Fig. 8　Extraction of hammer's marks.

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，各クラスタ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（図 5）．

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．

具体的な処理の手順は，以下の通りである．まず，検査対象物を叩いた様子を撮影した動画（画像と音響の合成信号）のうち音響信号を利用し，それぞれのカメラで撮影した動画での打音の瞬間を検出する．音響処理については，打音の瞬間から音が減衰するまでの信号を用いて特徴量を計算する．画像処理については，打音の瞬間において 2 台のカメラから得られるステレオ画像を用いて，ハンマーの位置の 3 次元計測を行い，その結果を利用して検査対象物の表面の 3 次元座標を求める．一方，音響処理によって求めた特徴量に応じた色を判別マップから求め，得られた 3 次元座標に色の情報を付加する．

同様の処理を各打音の瞬間毎に行い，最終的にすべての結果を統合して，色が付いた 3 次元形状表示により検査対象物の可視部情報と不可視部情報を提示する．

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（図 6）．また，検査対象物にハンマーが接触した瞬間には，対象物表面に対してハンマーが垂直となるように叩くこととする．従って，打音の瞬間のハンマーの姿勢と打点での対象物表面の法線ベクトルは等しいものとする．

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像から抽出する．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（図 7）．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（図 8）．

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

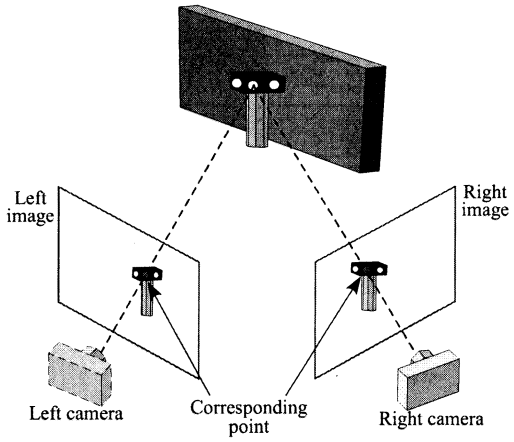


Fig. 9 Stereo measurement.

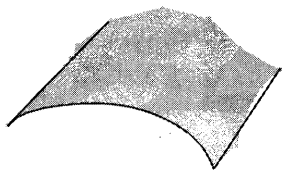


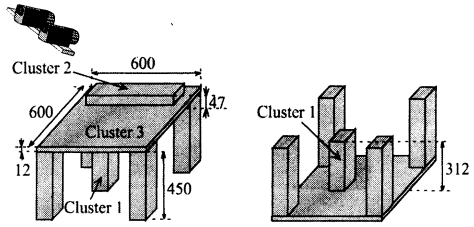
Fig. 10 Object with curved surfaces.

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，3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（図9）．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．表面が曲面の物体を計測し，表現した結果の例を図10に示す．

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打音点の厚さや材質など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4角形において，それぞれ縦横 M 分割し $M2$ 個の4角形を生成する．この $M2$ 個の4角形を平面上の点とみなして線形補間法をあてはめる．

最終的に，形状計測結果（形）と厚薄や材質判別結果（色）を融合した検査結果表示を行う．OpenGLを用いて結果の描画を行うことにより，裏側からを除く任意方向からの検査結果の表示することが可能である．



(a) Top side. (b) Back side.

Fig. 11 Object I.

5. 実 験

音響信号と画像信号を容易に抽出できるよう，ディ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 × 480pixel，フレーム数 30frame/s，音響信号はサンプリング周波数 44.1kHz，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．

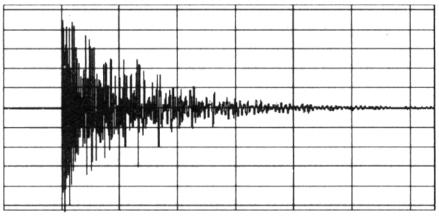
5·1 厚薄判別 図11に示す木板の上部から撮影を行い，物体の厚薄判定の検証を行った．木板の厚さは3段階で構成されており，不可視部領域における厚い部分（クラスタ1）を312mm，可視部領域における厚い部分（クラスタ2）を47mm，薄い部分（クラスタ3）を12mmとした．

それぞれの厚さにおける打音波形の例を図12に，FFTによる周波数スペクトルの例を図13に示す．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100Hzから1KHz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．具体的には，木板の厚さが薄い箇所ほど音波の減衰が早いなどの相違により，3段階の厚さを分類可能であった．

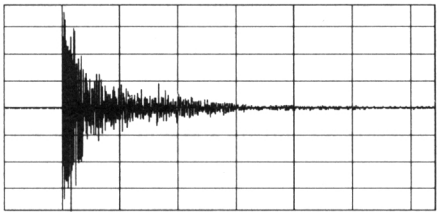
また，クラスタリング処理により生成された判別マップを図14に示す．ここで，クラスタ1はイエロー，クラスタ2はシアン，クラスタ3はマゼンダとした．

各打音点における木板の厚薄を調べた結果を図15に示す．木板のうち4隅の支柱で囲まれた4角形の内部を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．また，可視部情報である打点の3次元位置は，画像処理によって抽出されたハンマーの位置をもとにステレオ計測により求めた．

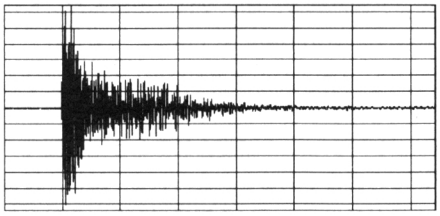
打音点以外の検査対象物表面の3次元位置および色を示した結果を図16に示す．図16(a)は線形補間により表面を形成した結果，図16(b)は実際の検査対象物



(a) Cluster 1.

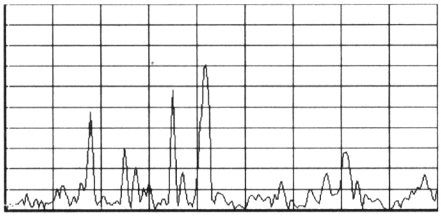


(b) Cluster 2.

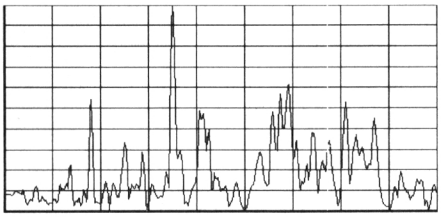


(c) Cluster 3.

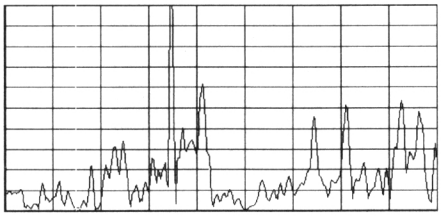
Fig. 12　Examples of raw sound wave (vertical axis: amplitude, horizontal axis: time).



(a) Cluster 1.



(b) Cluster 2.



(c) Cluster 3.

Fig. 13　Examples of frequency spectrum with FFT (vertical axis: amplitude, horizontal axis: frequency).

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．

5·2　材質判別　　材質判別に用いた実験対象を図 17 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．また材質の違いについては，外観検査などを組み合わせて検査する場合を想定すると，画像によって色から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．なお，音響処理に影響を与えないように，非常に薄い紙を用いて対象物を覆った．更に，白い紙で覆う際に正確に上面の高さを一致させて固定し，4 種類の物体の境界面で高さのずれや隙間がないようにした．

厚薄判別の場合と同様，4 種類の材質を事前に叩いた結果を用いて作成した判別マップを図 18 に示す．ここで，木をクラスタ 1（マゼンダ），発泡スチロールをクラスタ 2（イエロー），プラスチックをクラスタ 3（シアン），コルクをクラスタ 4（ブルー）とした．こ

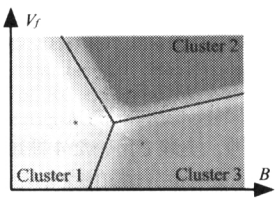
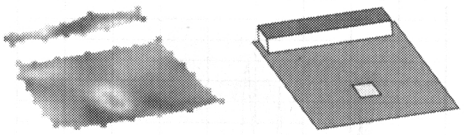


Fig. 14　Discrimination map I.

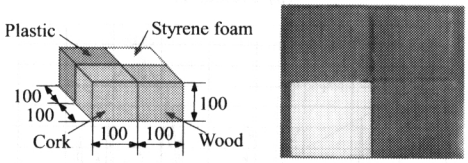


Fig. 15　3-D positions and colors of each hammering point I.



(a) Experimental result. (b) Actual one.

Fig. 16 Result of hammering test for object I.



(a) Schematic. (b) Photo.

Fig. 17 Object II.

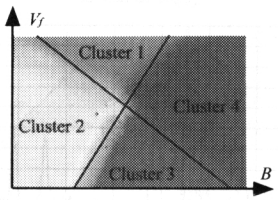


Fig. 18 Discrimination map II.

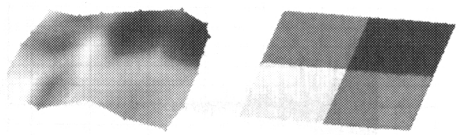


Fig. 19 3-D positions and colors of each hammering point II.

の判別マップより，実験で用いた4種類の材質は特徴量 B および V_f によって分類可能であることが分かる．

次に，検査対象物を6×6点ハンマーで叩き，画像処理を用いて打点の3次元座標値を求めた後，それぞれの打点の不可視部情報である材質（色）の相違を音響処理によって判別した結果を図19に示す．また，補間を用いて検査対象物全体の形状と材質を求めた結果を図20に示す．

本来は平らであるはずの検査対象物の表面形状が，画像処理の誤差により多少凹凸した形状に計測されたことや，材質の境界付近でイエローとブルーが交じり合ってグリーンに見えてしまうなど多少の誤差はあるものの，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と考えられる．



(a) Experimental result. (b) Actual one.

Fig. 20 Result of hammering test for object II.

5·3 考察 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．

3次元計測の精度に関しては，実験を行った状況では1画素あたりの分解能が1.06mmであったことに対して最大2〜4画素分の誤差が発生したが，ほぼ正確に形状計測を行うことができた．誤差の原因については，キャリブレーションの精度とステレオ画像間のマッチング精度の影響であると考えられる．特に，打音の瞬間の画像が多少ぶれている場合があり，このぶれが最大の誤差を生む主な要因であったと考えられる．また，各打音点の3次元座標から線形補間して形状を決定しているため，各打音点間の間隔や対象物の形状によっては，4画素分以上の形状計測誤差が発生する可能性もある．

音響処理による判定（クラスタリング）結果に関しては，全打点のうち約96%の打点において正しいクラスタに属すると判別できた．なお，判定を間違った箇所は厚さや材質が変化する場所付近であった．これらの打点については，判別マップ上では2種類のクラスタの境界付近にプロットされており，色で表現した場合には大幅に異なった色となることはなかった．

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段階の叩き方で同じ厚さ・材質の場所を叩いて実験を行った．その結果，雑音のレベルが打音と比較して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（表1）．これは，例えば(3)式における C は音の強さに応じて変化することに対して，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．

Table 1　Hammering power and parameter B, V_f.

	Strong	Medium	Weak	Faint
B	42.8	39.3	42.3	34.5
V_f	183	169	167	159

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ついて提案した．画像処理では，ハンマーの3次元形状を計測することで可視部情報である物体の形状計測を行った．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や材質などの不可視部情報を推定した．また，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．

本研究で提案した手法の利点をまとめると以下の通りである．

1. 音響処理による不可視部情報の計測に加え，画像処理を用いることにより従来の打音検査では計測することができなかった物体形状と位置を把握可能
2. 一般的なビデオカメラ2台以外には，特別な機器を新たに導入する必要なし
3. 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なし
4. 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
5. 打音検査結果を定量的かつ簡便に保存可能
6. 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．

なお，本研究では画像処理と音響処理を融合することの有効性は検証できたが，画像処理および音響処理自体については今後更に改善の余地があると思われる．具体的には，音響処理で用いる特徴量を増やす，クラスタリングに適した特徴量を統計的手法などにより自動的に求める，FFTの代わりにWavelet変換を用いるなどして音響処理の精度を向上させることや，ステレオ計測の精度を向上させることが必要である．また，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なども今度の課題として挙げられる．更に，色表示の結果に閾値処理を施すことによって自動的に欠陥部分のみを検出した結果を出すことなども今後の展望として考えられる．

文　献

(1) 山下 淳, 原 隆浩, 金子 透, 三浦 憲二郎: “打音検査における画像処理と音響処理の融合”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 *'04* 講演論文集, 2A1-L2-11, pp.1–4, (2004)

(2) M. J. Sansalon and W. B. Streett: *Impact-Echo*, Bullbrier Press, Ithaca, New York (1997)

(3) 岩瀬 昭雄: “コンクリート構造物の欠陥の非破壊検知診断法”, 日本音響学会誌, **57**-10, pp.668–674 (2001)

(4) C. Cheng and M. Sansalone: “The Impact-Echo Response of Concrete Plates Containg De-Laminations: Numerial, Experiential and Field Studies”, *Materials and Structures*, **26**, pp.274–285 (1993)

(5) 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, **35**-564, pp.169–176 (1997)

(6) 淺野 雅則, 鎌田 敏郎, 国枝 稔, 六郷 恵哲: “コンクリート内部欠陥の寸法および深さと打音特定値の定量的関係”, コンクリート工学年次論文集, **23**-1, pp.589–594 (2001)

(7) 鎌田 敏郎, 浅野 雅則, 国枝 稔, 六郷 恵哲: “コンクリート表層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, **55**-704, pp.65–79 (2002)

(8) 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)

(9) O. R. Gericke: “Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing”, *Journal of Acoustic Society of America*, **35**, pp.364–368 (1963)

(10) 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, **47**-9, pp.636–641 (1998)

(11) 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)

(12) 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*, **7**-2, pp.138–146 (2001)

(13) 吉田 秀典, 高橋 恵介, 堺 孝司, 山下 英俊: “コンクリートの超音波伝播に関する数値解析的研究”, コンクリート工学年次論文集, **24**-1, pp.1461–1466, (2002)

(14) 川合 忠雄, 伊藤 正称, 池田 直人: “画像処理を用いた構造物の損傷検知”, 日本機械学会論文集（*C* 編）, **67**-653, pp.17–22 (2001)

(15) G. H. Ball and D. J. Hall: *ISODATA - Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*, Stanford Research Institute (1965)

(16) 高橋 圭子, 阿部 圭一: “ISODATA クラスタリング法を用いたカラー画像の領域分割”, 電子情報通信学会論文誌 *D-II*, **J82-D-II**-4, pp.751–762 (1999)

(17) 加藤 進, 山下 淳, 金子 透: “ステレオカメラを用いた気泡ノイズにロバストな水中環境観測”, 情報処理学会 *CVIM* 研究会資料, **2004**-40, pp.117–124 (2004)