

強制振動実験自動解析システムについて

齋藤 二郎
後藤 洋三

Automatic Analysis System for Forced Vibration Test

Jiro Saito
Yozo Goto

Abstract

An automatic analysis system, of which the main elements are an input data controller, an A-D converter, a digital computer and a computer-aided graphic display system, has been developed to automate the data analyzing procedure for forced vibration tests which use an oscillator or a shaking table. The system is capable of reading frequencies, amplitudes and phases from vibration records input through on-line or off-line process, and of plotting resonance curves. A correlation technique used in the analyzing procedure ensures accuracy and reliability. Automaticities including the adjustment of vibration-meter amplifications almost completely eliminate monotonous work. Further, it is possible for resonance curves or data waves to be modified or erased by the graphic display system which relies on a high level of human judgment. This system has already been applied to analyze several vibration tests contributing to a reduction in manpower and enhancement of accuracies, and this progress in data processing techniques is proving helpful in widening the range of analysis possible through forced vibration tests.

概要

起振器あるいは振動台を用いた強制振動実験の解析作業を自動化するため、入力信号制御装置、AD変換器、デジタル計算機、および計算機と直結した映像表示装置を基幹の構成要素とする自動解析システムを開発した。システムの解析機能はオンラインあるいはオフラインで入力される振動波形から振動数、振幅、位相を読みとり、共振曲線を作成するものである。波形の読み取りにはフーリエ解析を採用しており、精度と信頼性が確保されている。また、振動計増幅器の倍率校正計算まで自動化したため、人力による単純作業はほとんどなくなった。さらに、共振曲線や入力波形をブラウン管に映像表示して修正、削除等の作業を可能にしたため、人間の高度な判断力が活用できる。本システムは既に数例の振動実験の解析に適用され、省力化と精度の向上に寄与してきたが、このようなデータ処理技術の向上は実験による解析範囲の拡大にも役立っている。

1. 序

構造物の振動特性を調べるために、起振器あるいは振動台を用いた強制振動実験がしばしば行なわれている。この種の実験の計測は電気的な計器を使って行なわれるが、記録された波形の読み取りとプロットは従来から人力で行なわれることが多く、莫大な労力が必要とされてきた。また、波形が乱れている場合には、読み取りが不可能となるか精度の低下が生じていた。

このような問題を解決するための一方法として、実時間アナログ相関計を利用する解析システム¹⁾が既に発表されており、デジタル化²⁾や相関解析の適用拡大³⁾に関する研究も行なわれている。一方、本論で紹介する解析システムは解析の自動化と省力化、解析精度の

向上、および人間の高度な判断力の活用を目的として開発されたもので、マルチチャンネルAD変換器、デジタル計算機、および映像表示装置(Graphic Display装置)を基幹構成要素としたものである。

2. システムの機能と特徴

本システムが解析の対象とする実験は起振器あるいは振動台を用いた正弦波入力の強制振動実験で、解析データはオンライン入力あるいはデータレコーダを使ったオフライン入力のアナログ信号である。解析機能としては振動波形の振幅と振動数および位相の読み取りとそれ等を総合した共振曲線の作成があげられる。

本システムの特徴は次の通りである。

(1) フーリエ解析の採用

起振器の回転に同調した正弦波、あるいは振動台の制御装置から発生する正弦波の振動数を基準としたフーリエ解析を行なうため、波形の読み取り精度が高く安定している。ノイズが混入して乱れた波形でも積分間隔を大きく取ることによって精度よく解析できる。

(2) 自動化

デジタル計算機を中心とした自動化システムであるため、人力による単純な解析作業はほとんどない。特に、振動計増幅器の倍率変更を自動記録させ倍率効正計算を自動化したので、煩雑な計算とそれに伴うミスが根絶されている。

(3) Man-Machine Communication システム

人間の高度な図形認識能力と判断力を解析に活用するため、計算機に直結した映像表示装置を利用して Man-Machine Communication システムを構成している。すなわち、入力波形あるいは作成された共振曲線を映像表示し、人間の判断に従って修正、削除等が行なわれる。

(4) 大量データの高速処理能力

16チャンネル分のデータが最小1mmsecで同時にAD変換された、AD変換後のデジタルデータはオンラインで磁気テープに書き込まれる。データ量の制限は事実上ない。

3. システムの概要

解析システムの全体構成とフローを図-7に示している。システムは以下に述べる4個のブロックに大別される。

(1) 実験データの記録

振動実験のデータは通常データレコーダに記録されオフラインで解析される。その場合、振動計増幅器の出力は入力信号制御装置を通してデータレコーダに入力される。同装置は入力信号が適正なレベルにあるかどうかを監視するとともに、AD変換のゲート開閉信号と増幅器の倍率信号の発生を行なう。AD変換のゲート信号はデータレコーダのリモートスタートと連動

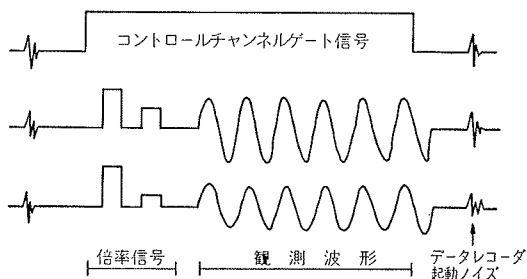


図-1 データの記録例

して発生し、データレコーダの1チャンネルに記録される。倍率信号は増幅器の倍率スイッチ位置に対応してパルス状に発生し、一回の測定毎に各チャンネルのデータの最初の部分に記録される。(写真-1参照)

相關解析を行なうためには基準の正弦波が必要となるが、電気的にコントロールされる振動台の場合は発振器の出力が利用され、機械的な起振器の場合は偏心

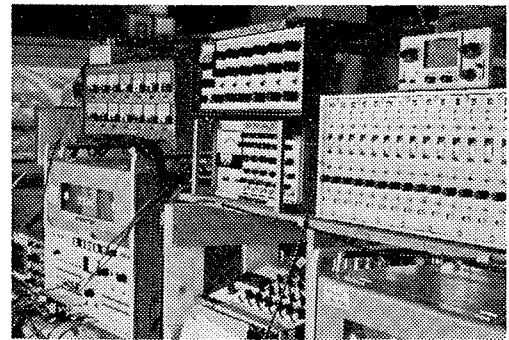


写真-1 実験データの記録

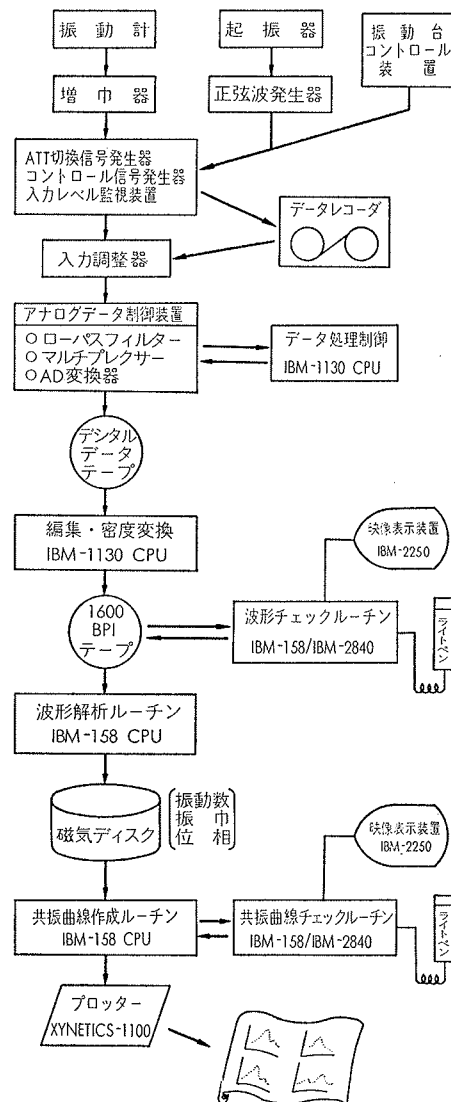
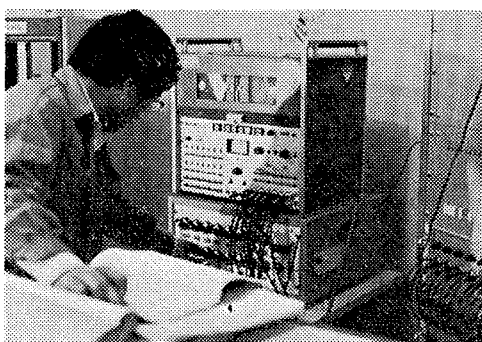


図-2 全体構成とフロー

マスの回転シャフトに取り付けられたパルスギヤと同期する正弦波発生器が使用される。

(2) AD 変換

AD変換器は IBM-1130CPU にロードされたプログラムによって制御されており⁴⁾、1チャンネルのゲート信号に従ってAD変換されたデータがオンラインでデジタルテープに書き込まれる。1個のデジタル値は入力信号の電圧に比例した～2048-2048の整数値(12ビット)で、変換速度は16チャンネル/1mmsecである。一連の変換作業終了時にデジタルテープは 1130CPU によって再編集され、大型計算機 IBM370-158システムと互換性のある 1600BPIテープに密度変換される。



写真—2 AD変換作業

(3) 波形解析

このブロックでは IBM-158 にロードされたプログラムにしたがって、1600BPI テープのデータが解析される。解析の内容は増幅器の倍率、測定波形の振幅、振動数、位相で、その結果はディスクまたはカードに記録される。

倍率の読み取りは各チャンネルのデータの最初の部分に記録されたパルスの高さを判定することによって行なわれる。振動数については、まずその概略値を基準正弦波から零クロス法で求め、さらに基準正弦波と求められた振動数をもつ正弦波との相互相関をとって相関値が極大になるよう振動数の微修正を行ない、高い精度の値を求めている。各チャンネルの観測波形については基準正弦波から求められた振動数によってフーリエ解析が行なわれ(4. 参照)振幅と位相が求められる。

(4) 共振曲線の作成と映像表示装置による修正

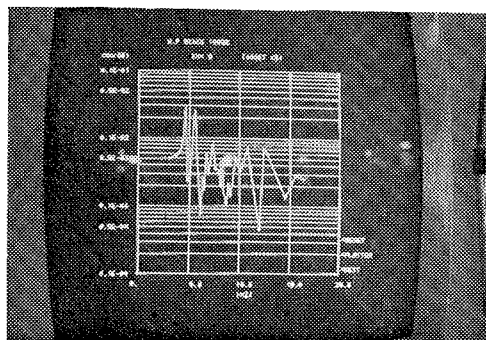
(3)で求められた振幅に対し倍率効正計算を行なって実振幅が求められる。この実振幅をもとに基準化計算(応答倍率の計算等)を行ない、共振曲線におけるプロット点の縦軸が決定される。横軸は振動数であり、縦軸横軸共対数表示が可能である。

プロット点を構成することによって共振曲線が作成されるが、測定時の電氣的障害や倍率計算の誤りによ

って若干のプロット点がバラツクことがある。そのため、映像表示装置上に共振曲線図が出力され、解析担当者はライトペンとキーボードを操作してプロット点の修正と削除を行なうことができる。映像表示装置上での修正作業が完了するとライトペンからの修正完了信号によってプロッターテープが作成され、続いて高速プロッターによる図化が行なわれる。



写真—3 映像表示装置



写真—4 映像表示された共振曲線

4. フーリエ解析による波形解析

4.1. 解析理論

基準正弦波の角振動数を ω 、観測波形を $Y(t)$ とすると、 $Y(t)$ に含まれる再振動数 ω の成分の振幅と位相はよく知られたフーリエ解析の原理に従って次式から求められる。

$$A = \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) \sin \omega t dt \quad (1)$$

$$B = \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) \cos \omega t dt \quad (2)$$

$$T = \frac{2n\pi}{\omega} \quad \text{ただし、} n \text{ は整数である。} \quad (3)$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad ; \text{ 振幅} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{B}{A} \quad ; \text{ 位相角} \quad (5)$$

しかし、4.2. で述べるように、式(5)から求められる位相角の精度はよくないため、位相曲線を作成する場合は次式の相関解析から位相角を求める必要がある。

$$A(\tau) = \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) \sin \omega(t-\tau) dt \quad (6)$$

すなわち、式(6)において遅延時間 τ を暫変させて繰返し計算を行ない、相関値 $A(\tau)$ が極値 $(|A(\tau)|_{\max} = C)$ となる時の $\omega\tau$ をもって位相角とする。

4.2. 読み取りの誤差

式(1)~式(5)から明らかなように、フーリエ解析の読み取りにおいて $T \rightarrow \infty$ であれば解析上の誤差は生じない。しかし、 T が有限であって観測波形に振動数が ω と異なる成分も含まれていると誤差が生じてくる。今、 $\omega^* = \omega + \Delta\omega = \alpha\omega$ とし、観測波形 $Y(t)$ が次式で表わされるものとする。

$$Y(t) = \frac{Y_{\omega^*}}{2} e^{i\omega^*t} + \frac{\bar{Y}_{\omega^*}}{2} e^{-i\omega^*t} \quad (7)$$

ただし、 \bar{Y} は Y の共役複素数である。

式(7)に対して有限フーリエ変換を行なうと次式を得る。

$$C(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T (Y_{\omega^*} e^{i\omega^*t} + \bar{Y}_{\omega^*} e^{-i\omega^*t}) e^{-i\omega t} dt$$

$$= \frac{Y_{\omega^*} (e^{i(\omega^*-\omega)T} - 1)}{i(\omega^*-\omega)T} - \frac{\bar{Y}_{\omega^*} (e^{-i(\omega^*+\omega)T} - 1)}{i(\omega^*+\omega)T} \quad (8)$$

ここで、 $\omega^* + \omega = (\alpha - 1)\omega$ 、 $T = \frac{2n\pi}{\omega}$

$$\omega^* - \omega = (\alpha + 1)\omega,$$

とすると式(8)は次のように書きかえられる。

$$R = \frac{C(\omega)}{Y_{\omega^*}} = \frac{e^{in\pi\alpha} - 1}{2n\pi(\alpha - 1)i} - \frac{\bar{Y}_{\omega^*}}{Y_{\omega^*}} \frac{e^{-2n\pi\alpha} - 1}{2n\pi(\alpha + 1)i} \quad (9)$$

式(9)は観測波形の複素振幅と解析波形の複素振幅の比を示したものである。 $n=5, 10, 20$ の各場合について、 α の変化に対する振幅比 $|R|$ を求めたものが図-3である。 $\alpha=1$ の時は $|R|=1$ であるが $\alpha \neq 1$ では急速に減小していることがわかる。すなわち、有限フーリエ変換は中心振動数を ω とする狭帯域のフィルターと同等の機能を有し、 n が大きくなる程、すなわ

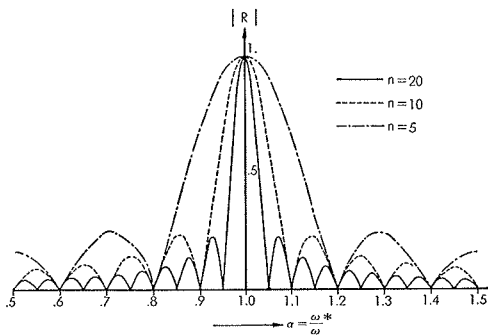


図-3 振幅比 $|R|$

ち T が大きくなる程帯域幅が狭くなる。 $n=10$ の場合について、 α の変化に対する R の位相角 $\theta = \tan^{-1}(\text{Imag}(R)/\text{Real}(R))$ を求めたものが図-4である。 $\alpha=1$ の時 $\theta=0$ であり、 ω^* と ω が一致していれば正確な位相角が求まるが、 $\alpha \neq 1$ では θ は急速に変化しているため、有限フーリエ変換による位相角読み取りは誤差が生じやすいことになる。したがって、位相曲線を求めるためには4.1. で述べた相関解析が必要である。

5. むすび

以上に述べてきた自動解析システムはすでに多くの振動実験に適用されており、測点の多い複雑な実験の場合においてもシステムの概要を把握した1人の技術者でデータ解析が可能であるため、省力化と解析速度および精度の向上に貢献してきた。また、解析プログラムがFORTRANで作成されているため、プログラムを一部修正して波形の合成による特殊な共振曲線の作成(ねじ、ロッキング等)も容易であり、ノイズレベルの高い観測波形についても解析が可能であるので、振動実験による解析範囲の拡大にも貢献している。

本システムのハードウェアは振動解析専用設備されたものでないため機能上の制約が残るが、振動実験装置に付帯して解析システムを設備する場合の一基本型を提供するものであろう。

6. 謝辞

本システムの開発は(株)エスコ前田昌信氏の尽力に負うところが多い。また、当技研木村主研からも多大な助力を受けてきた。ここに深謝の意を表するしだいである。

参考文献

- 1) 武藤清他3名：相関技術を利用した振動実験法、第3回日本地震工学会講概集(1971) pp. 541~548
- 2) 久保慶三郎他2名：相関計を用いた振動計測について、第29回土木学会講概集I(1973) pp. 466~467
- 3) 表佑太郎他3名：実存煙突の振動実験、大林組技術研究所報 No. 11(1975) pp. 13~15
- 4) 斎藤二郎他3名：土質研究室における自動解析システムについて、大林組技術研究所報 No. 11(1975) pp. 190~194

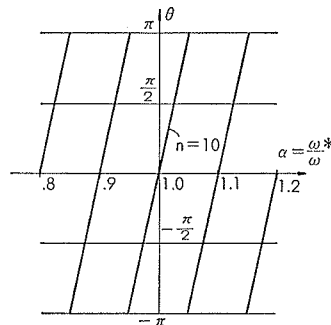


図-4 位相角 θ