

汎用ロードシミュレータの開発

Development of Multi-Use Road Simulator

原 島 正 吉*
Shokichi Harashima

四 宮 一 雄*
Kazuo Shinomiya

高 橋 弘*
Hiroshi Takahashi

門 田 正 和*
Masakazu Kadota

保 田 和 豊*
Kazutoyo Yasuda

要 旨

複数の油圧加振機をコンピュータでコントロールして、モーターサイクルやバギー車の実走行路面負荷を台上で再現する装置(汎用ロードシミュレータ)を開発した。

本装置のコントロールは、廉価なパーソナルコンピュータと自社開発のソフト、インターフェイスで実現されており、実走行におけるサスペンションのボトミングやテレスコピックタイプフロントフォークの運動など、線形近似手法では困難とされていた現象も再現できることが特徴である。

ABSTRACT

A general purpose road simulator has been developed which can reproduce in the laboratory the loads of motorcycles and buggies on various road surfaces by computer-controlling a number of hydraulic actuators.

This device is controlled with a low-priced personal computer and the original software and interface. Its unique feature is that it is capable of simulating such phenomena as the bottoming of the suspension and the movement of the telescopic-type front forks during actual driving. This has so far been difficult with linear approximation.

1. ま え が き

ロードシミュレータは、完成車の実走行路面負荷を、テストベンチで忠実に再現できることから、自動車開発における有効な装置として、性能評価、耐久テスト等に幅広く利用されている。

しかし、モーターサイクルやバギー車に適用された例は少なく、国内では前例がない。これには種々の理由が考えられるが、筆者等がモーターサイクル、バギー車の強度耐久性テストを目的として、ロードシミュレータの導入を検討した際に課題となった次の二項目が、その代表的なものと考えられる。

- (1) 装置が高額である。なかでもミニコンピュータを主体とするコントロールシステムは価格に占める割合が高い。
- (2) サスペンションのボトミング現象や、テレスコピックタイプフロントフォーク(以下フロン

トフォーク)のアクスル部における、前後、上下、二方向の運動を台上再現するための手法が確立されていない。

この論文では、コンピュータによるシミュレーションアルゴリズムの概要と上記課題の解決について述べる。なお、事例紹介には、上記課題が全て含まれているモーターサイクル加振を採用した。

2. アルゴリズムの概要

2.1. 単軸加振システム

まず簡単な例として、加振機1本、トランスデューサ1個からなる単軸加振システムを取り上げ、基本理論とシミュレーションのプロセスを紹介する。

2.1.1. 基本理論

図1のように、モーターサイクルのリヤアクス

* 朝霞研究所

ル上部に加速度検出器を取り付けて実走行し、この時の検出器出力 $y(t)$ を台上で再現する場合を考える。

この問題は、目標出力信号 $y(t)$ を得るための加振機への入力信号 $x(t)$ を求めることに帰着する。

今、この加振計を線形とみなせば、入出力間の関係はたたみ込み積分の式を用いて、

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau \quad (1)$$

$y(t)$: 目標出力信号

$x(t)$: 加振機への入力信号

$g(t)$: この系のインパルス応答

と表すことができる。従って、何らかの方法で系のインパルス応答を求めておけば、 $x(t)$ はデコンボリューションを行うことにより求められる。

$$x(t) = \int_0^t y(\tau) g^{-1}(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

$g^{-1}(t)$: $g(t)$ の逆関数



図1 (a) 実走行負荷の計測

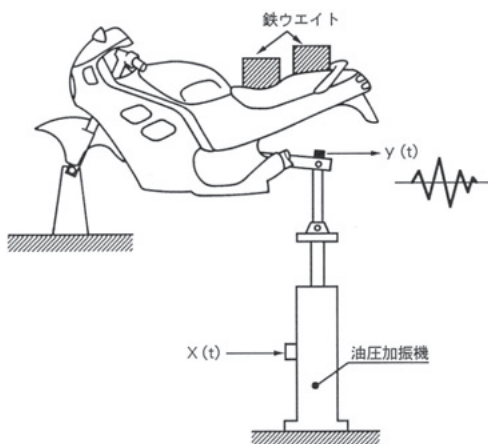


図1 (b) リヤアクスル部加速度の再現

以上は時間領域の扱いであるが、周波数領域では(1)式、(2)式はそれぞれ(3)式、(4)式と等価である。

$$Y(f) = G(f) \cdot X(f) \quad (3)$$

$$X(f) = Y(f) \cdot G^{-1}(f) \quad (4)$$

$Y(f)$: $y(t)$ のフーリエ変換

$G(f)$: $g(t)$ のフーリエ変換

$X(f)$: $x(t)$ のフーリエ変換

$G^{-1}(f)$: $G(f)$ の逆関数

$G(f)$ は伝達関数、 $G^{-1}(f)$ は逆伝達関数と呼ばれている。

コンピュータを使ってデコンボリューションを行う場合、フーリエ変換やフーリエ逆変換の演算にFFT (Fast Fourier Transform: 高速フーリエ変換) アルゴリズムやアレイプロセッサ (FFT等の特殊な演算を高速で行う装置) を利用すれば、高速処理が可能である。そのうえ、周波数領域で $X(f)$ を求める処理が簡素化され、複素数の四則演算だけですませられる等、利点が多い。従って、ロードシミュレータのコントロールプログラム (DE: Dynamic Equalizer) は、周波数領域での解法を主体に作成し、アレイプロセッサを利用することにした。

以後、コンピュータ解析を前提として、時間領域の関数は離散的な時系列信号であり、これに対してFFT演算を施したものを、周波数領域の関数として扱う。すなわち $x(t)$ と $X(f)$ の関係は、次式となる。

$$FFT[x(t)] = X(f) \quad (5)$$

$$IFFT[X(f)] = x(t) \quad (6)$$

IFFT: FFTの逆演算 (高速フーリエ逆変換)
 $g(t)$ と $G(f)$ 、 $y(t)$ と $Y(f)$ の関係も同様に表わすことができる。

2.1.2. シミュレーションのプロセス

最初の仮定のごとく図1(b)の系が線形であれば、(4)式と(6)式によって $x(t)$ を求め、これを入力信号として加振することにより、台上で $y(t)$ を再現できるはずである。しかし、実際には図1の加振系でも、モーターサイクルのサスペンション特性あるいは油圧サーボ弁の出力流量特性等、非線形要素が含まれているため、これだけでは $y(t)$ の忠実な再現は望めない。実際のシミュ

レーションでは系の非線形性に対する補償が主体となり、そのプロセスは次の二段階からなる。

(1) 伝達関数の計測と信頼性評価

D E 処理系では、 $G(f)$ はランダムノイズを用いたテスト加振により線形近似伝達関数として求められる。従って、(4) 式を適用してデコンボリューションを行うためには、前もって $G(f)$ の信頼性（線形近似の精度）を評価する必要がある。この目的にはコヒーレンス関数が有効であり、(7) 式で定義される。

$$\gamma^2(f) = \frac{|\overline{P_{XY}(f)}|^2}{P_{XX}(f) \cdot P_{YY}(f)} \quad (7)$$

$P_{XY}(f)$: 入出力間のクロスパワースペクトル

$P_{XX}(f)$: 入力のアートパワースペクトル

$P_{YY}(f)$: 出力のアートパワースペクトル

記号 $\overline{\quad}$ は相加平均を示す

これは、系の入力 $x(t)$ 、出力 $y(t)$ のフーリエ成分の相互相関係数で、0 から 1 の間の数値をとる。入出力間に完全な因果性がある場合、コヒーレンス関数は 1（最大値）となる。

伝達関数と、その信頼性を評価するコヒーレンス関数を、一対の情報として得るためには、テスト加振を数回（通常 5 から 10 回）繰り返して行い、各々の加振結果の相加平均をとる必要がある。(7) 式に対応する伝達関数の式は(8)となる。

$$G(f) = \left\{ \frac{Y(f)}{X(f)} \right\} \quad (8)$$

図 2 は、図 1 の加振系の伝達関数及びコヒーレンス関数を、色別して重ね描きしたものである。

コヒーレンス関数を参照して伝達関数を評価する際、次の経験則が適用できるものとする。

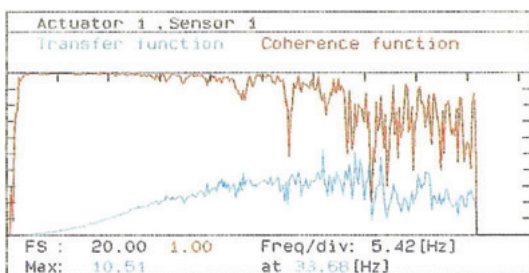


図 2 伝達関数とコヒーレンス関数

「コヒーレンス関数の値が 0.6 以上の周波数成分は、台上で忠実に再現できる可能性がある。」テスト加振の結果、再現すべき周波数範囲で良好なコヒーレンス関数が得られない場合は、テスト車取付状態の改善、トランスデューサの種類あるいは取り付け位置の再検討等を行う必要がある。

図 3 は周波数領域のデコンボリューションによって、加振信号 $x(t)$ を求める手順である。

(2) 反復修正

図 3 の手順に続いて、再現度を改善するために反復修正を行う。図 4 が反復修正の 1 サイクルであり、誤差（目標信号 $y(t)$ と、 $x(t)$ で加振した結果の差）が許容範囲内に収束するまでこれを繰り返すことになる。

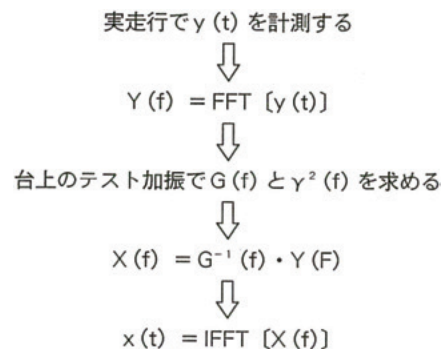


図 3 周波数領域におけるデコンボリューション

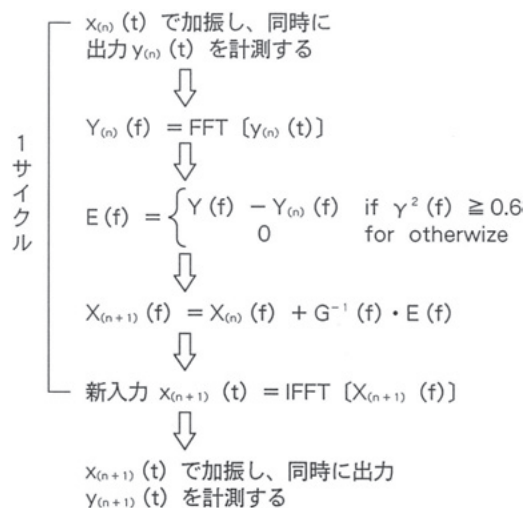


図 4 反復修正ルーチン

図4で、 $x_{(n)}(t)$ の表記にある添字 n は反復修正の回数を示す。

反復修正は、前記経験則を満足する周波数成分についてのみ適用する。これはコヒーレンスの低い周波数成分にまで反復修正を適用すると、かえって誤差を増大させてしまう恐れがあるためである。

2.2. 多軸加振システム

次に、図5のようなモーターサイクルの実走行シミュレーションを例に、多軸加振システムのコントロールを紹介する。便宜上、加振機とトランスデューサには、表1のごとく番号付けがなされている。

多軸加振システムでは、チャンネル間のクロストーク（相互干渉）を見込む必要があるが、クロストークに対しても線形性を想定する。

まず、加振機1を単独で数回テスト加振し、各トランスデューサ1、2、3の出力を計測することにより、伝達関数 $G_{11}(f)$ 、 $G_{12}(f)$ 、 $G_{13}(f)$ 及び、コヒーレンス関数 $\gamma^2_{11}(f)$ 、 $\gamma^2_{12}(f)$ 、 $\gamma^2_{13}(f)$ を得る。 $G_{mn}(f)$ 、 $\gamma^2_{mn}(f)$ 等の表記に

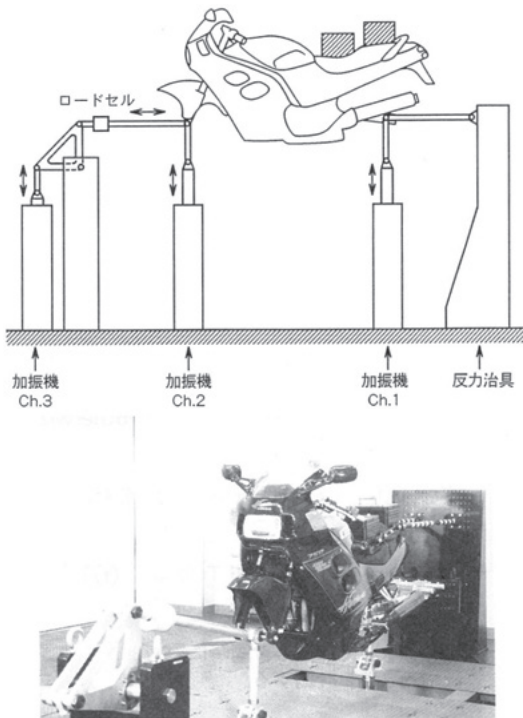


図5 モーターサイクルの3軸加振システム

表1 加振機とトランスデューサの番号付け

Ch.	加振機	トランスデューサ (感度)
1	リヤアクスル 上下加振	リヤアクスル上下加速度 (100% = 50G)
2	フロントアクスル 上下加振	フロントアクスル上下加速度 (100% = 50G)
3	フロントアクスル 前後加振	フロントフォークに貼付した 歪ゲージの出力 (100% = 2000 μ S)

において、 m は加振機の番号、 n はトランスデューサの番号である。

次に、加振機2と3に対しても、加振機1の場合と同様の処理を行い、結果として、 3×3 の伝達関数マトリクス $[G]$ 、及びコヒーレンス関数マトリクス $[\gamma^2]$ を得る。

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{21} & G_{31} \\ G_{12} & G_{22} & G_{32} \\ G_{13} & G_{23} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[\gamma^2] = \begin{bmatrix} \gamma^2_{11} & \gamma^2_{21} & \gamma^2_{31} \\ \gamma^2_{12} & \gamma^2_{22} & \gamma^2_{32} \\ \gamma^2_{13} & \gamma^2_{23} & \gamma^2_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

周波数関数であることを示す (f) は省略した。

伝達関数マトリクスを用いると、単軸加振の(3)に相当する式は、 $[Y] = [G][X]$ すなわち、

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{21} & G_{31} \\ G_{12} & G_{22} & G_{32} \\ G_{13} & G_{23} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

と表すことができる。(11)式によれば、例えばトランスデューサ1の出力 Y_1 は、次式となる。

$$Y_1 = G_{11}X_1 + G_{21}X_2 + G_{31}X_3 \quad (12)$$

(12)式は、3本の加振機を同時に加振させた時の出力が、各々の加振機を単独加振させた場合の出力の総和と等しいものと扱っている。この系の線形性を想定したことを受けて、重ねの理を適用したわけである。

また、(4)に相当する式は、 $[G]$ の逆マトリクス $[G]^{-1}$ を用いて、 $[X] = [G]^{-1}[Y]$ すなわち、

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{21} & G_{31} \\ G_{12} & G_{22} & G_{32} \\ G_{13} & G_{23} & G_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix}$$

となる。 $[G]^{-1}$ は一般に逆伝達関数マトリクスと呼ばれている。

(13)が3軸システムのデコンボリューションを表す式であり、これを基に反復修正を行って、誤差を許容範囲内に収束させるわけである。

「第 n 次 $h(n=1, 2, \dots)$ のトランスデューサ出力に対応するコヒーレンス関数マトリクスの対角要素 γ^2_{nn} の値が 0.6 以上の周波数成分は、台上で忠実に再現できる可能性がある」となる。

3. 課題の解決

3.1. コントロールシステム

従来、ロードシミュレータのコントロールには、リアルタイム・マルチタスクの処理機能を持ったミニコンピュータに、専用の周辺装置を接続したシステムが必要とされていた。一般に、このようなシステムは高額であり、このことがロードシミュレータの普及を妨げる一因であったといえる。

筆者等が廉価なコントロールシステムを実現するためにパーソナルコンピュータの可能性を検討したところ、次のような結果であった。

- (1) アレイプロセッサを使える機種を選定すれば、必要な計算速度が得られる。
- (2) データエリアをプロテクトモードメモリ上に設定すれば、メモリ不足の問題は解決し 10 分以上の連続加振が可能となる。
- (3) コンピュータと油圧加振機制御装置を接続するために、インターフェイスを自作する。

3.1.1. コンピュータシステム

パーソナルコンピュータの標準 OS である MS-DOS には、使用可能なメモリのサイズが 640KB 以内という制限がきまとう。通常は、この範囲内でプログラムエリアとデータエリアの両方を確保しなければならず、データエリアに不足が生じて、連続加振時間が制限されてしまう。

この問題を解決するために、プロテクトモードメモリを利用してデータエリアの拡大を図った。DMA 転送機能付きの A/D コンバータ（トランスデューサ出力のモニター用）、D/A コンバータ（加振機の駆動用）を採用すれば、コンバータとプロテクトモードメモリとの間で、直接、連続した長いデータの送受が可能となることに注目した

ものである。以下はその手順である。

- (1) パーソナルコンピュータ側にフリーの DMA チャンネルが無い場合、A/D にはフロッピーディスク用の DMA チャンネル、D/A にはハードディスク用の DMA チャンネルを、それぞれ割り当てた。

プログラム作成上のルールで、A/D、D/A の動作中は、フロッピーディスク、ハードディスクへのアクセスを避ける。

- (2) A/D コンバータと D/A コンバータに、一部追加配線を施して、両者が同一ペーサクロックのもとで同期運転できるようにした。

上記のように、メーカーが提供している標準機能を超えた使用法によって、約 25 分の連続加振が可能（4 軸加振システムで、50Hz まで再現する場合）となった。図 6 にハードウェアの構成をしめす。

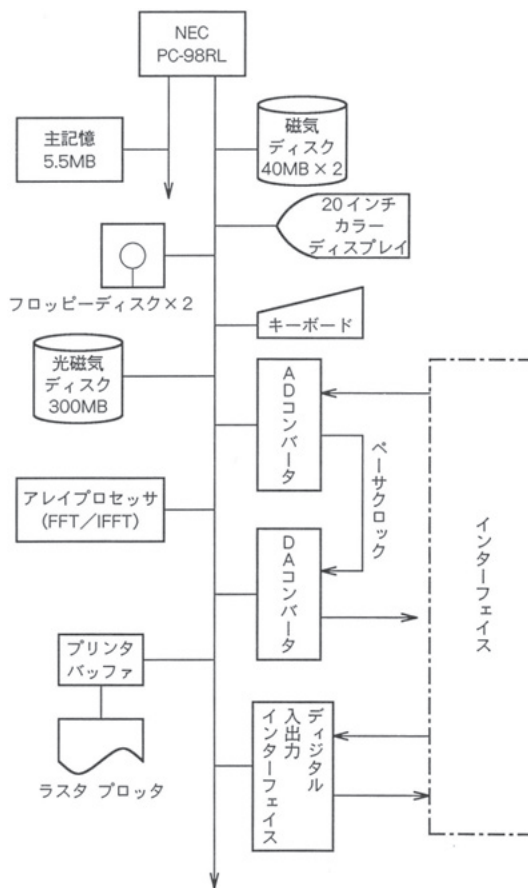


図6 コンピュータ ハードウェアの構成

3.1.2. インターフェイスの作成

インターフェイスには以下の機能が要求される。

- ①割り込み発生：加振中に、システムの電源ダウンや加振機の異常停止が起こった場合、コンピュータに割り込みをかけ、必要な緊急処置をさせる。
 - ②加振機の暴走防止：コンピュータの電源がオフの間、あるいは電源が投入されてから、DEが稼働開始するまでの間、加振機への油圧供給を禁止して、暴走を防ぐ。
 - ③フィルタ：A/Dコンバータの入力側にアンチ・エリアシングフィルタ、D/Aコンバータの出力側にスムージングフィルタが必要である。図7に加振機1軸分のインターフェイス回路を示す。この回路の特徴は以下の2点である。
- (1) 割り込み発生回路と加振機の暴走防止回路は、ノイズによる誤動作を防ぐため、光結合方式とした。
 - (2) アンチ・エリアシングフィルタとスムージングフィルタは、6次連立チェビシェフ関数の

ローパスフィルタで、 -80dB/oct と急峻な遮断特性を持っている。従って、エリアシング現象を防ぎ、データエリアも節約できるという効果がある。

3.2. ボトミング負荷の再現

バギー車のオフロード走行や、モーターサイクルの濃縮耐久路走行では、サスペンションのボトミングが起こり、最大負荷もこの時発生する。強度、耐久性テストにとって、実走行における最大負荷を忠実に再現できるか否かは重要な問題であるが、一方、DEのアルゴリズムは線形近似伝達関数の成立を前提としており、サスペンションのボトミングのような、非線形性の強い現象は苦手である。計測されたコヒーレンス関数が良好な値を示しても、反復修正によってボトミング負荷を再現しようとする、かえって誤差が増大してしまう場合が多い。

ボトミング負荷の再現度を向上する対策として、実走行時と同程度のボトミングを発生させて伝達

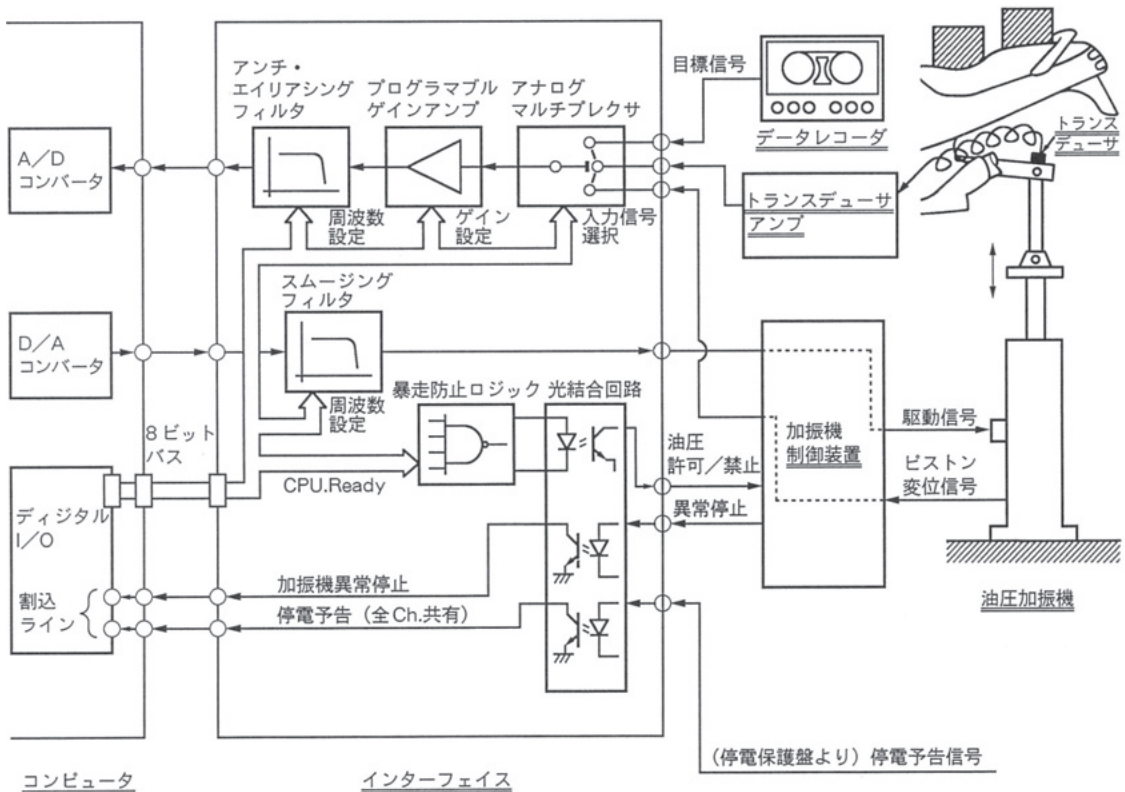


図7 システムのインターフェイス

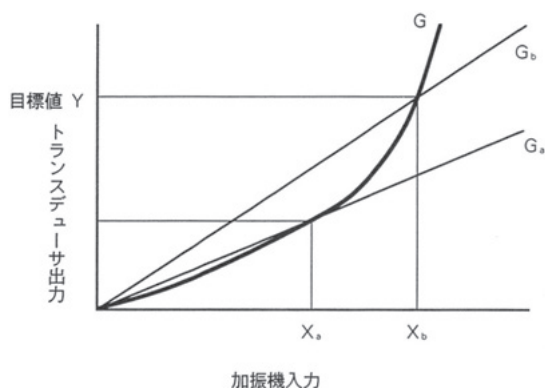


図8 非線型伝達関数の線形近似

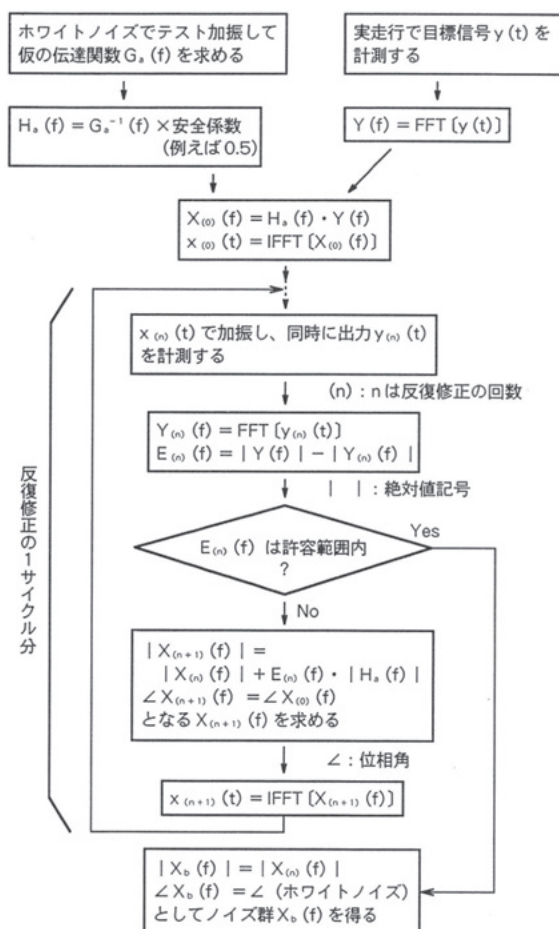


図9 伝達関数計測用ノイズを求めるルーチン

関数を計測することが効果的である。図8の例では、目標信号Yを再現するためには、テスト信号 X_a で計測された伝達関数 G_a よりも X_b で計測された G_b の方が、優れた近似度を持つからである。このような条件を満たす X_b は、

「目標信号Yのフーリエスペクトル絶対値の分布を、台上で再現し得るテスト信号」と定義される。図9は X_b を求める手順である。手順にあるように安全係数を設定すると、過大負荷を防ぎ|Y|の再現度を向上するという効果がある。

図9の手順による|Y|の再現は、Yそのものを再現するよりも容易である。その理由は、下記二点である。

- (1) 加振機は単独加振でよく、他の加振機の影響を考慮する必要がない。
- (2) Yの位相は再現する必要がない。すなわち、時間関数 $y(t)$ としての波形まで似せる必要はない。

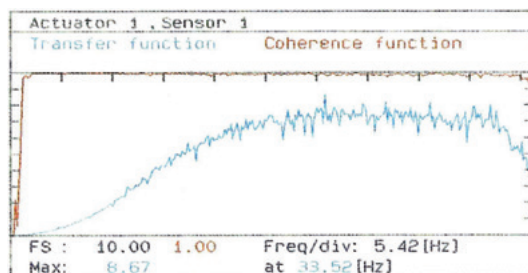
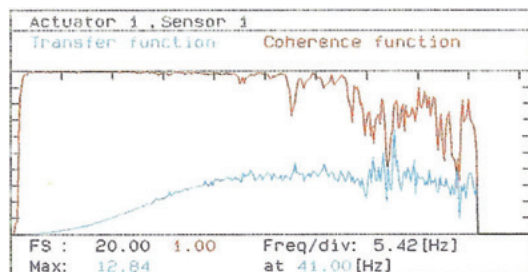
図10(a) 入力 X_a で計測された伝達関数・コヒーレンス関数図10(b) 入力 X_b で計測された伝達関数・コヒーレンス関数

図 10 は、図 5 の加振系における、リアアクスル廻りの伝達関数である。(a) は X_a で計測されたものの、(b) は X_b で計測されたもの（最適の近似伝達関数）である。(b) のコヒーレンス関数には、ボトムリング時の非線形特性が反映済みであり、ボトムリング負荷を再現する上で有効な情報といえる。

3.3. フロントフォークの運動の再現

図 5 の加振方式には、次のような背景がある。

- (1) ホイール付きで加振すると、タイヤと振動台の間の跳ねを抑えきれず、良好なコヒーレンスが得られない。タイヤ下加振は、比較的平坦な路面の再現しかできない加振手法であるといえる。
- (2) 加振機 3 を除去した 2 軸加振システムでは、モーターサイクル前廻りの負荷が実走行時と比べて不足する。

これらを解決するために前廻りを 2 方向加振とし、全ての加振ロッドをアクスル部直結としたわけである。

3.3.1. リンク機構撓動差の補償

図 11 から明らかなように、加振機 3 を静止させた状態で加振機 1 と 2 を立ち上げると、リンク機構の撓動差により、車体に対して前後から圧縮荷重がかかってしまう。加振機 3 を荷重フィードバックで運転すれば、自動的に荷重をゼロに保つよ

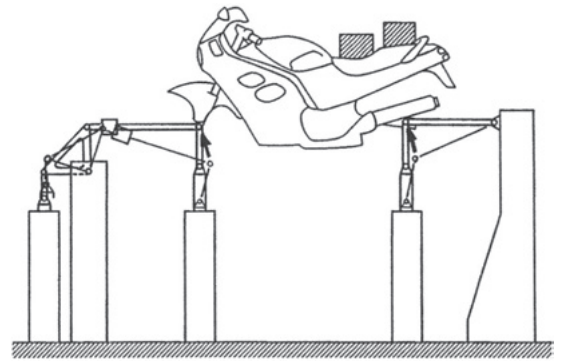


図 11 リンク機構の動作

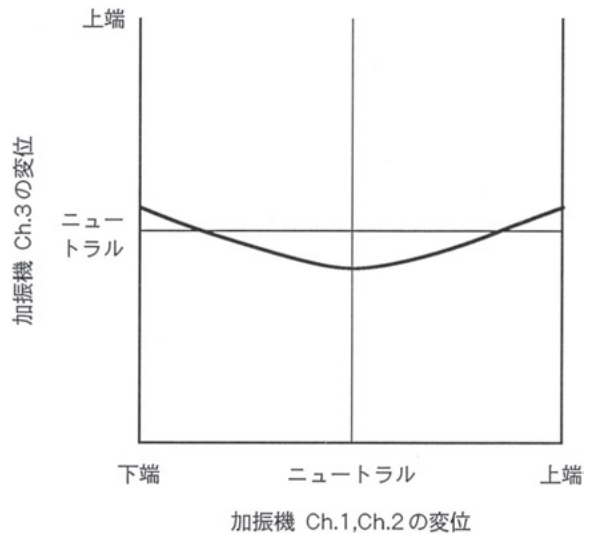


図 12 リンク機構の撓動差を補償する変位軌跡

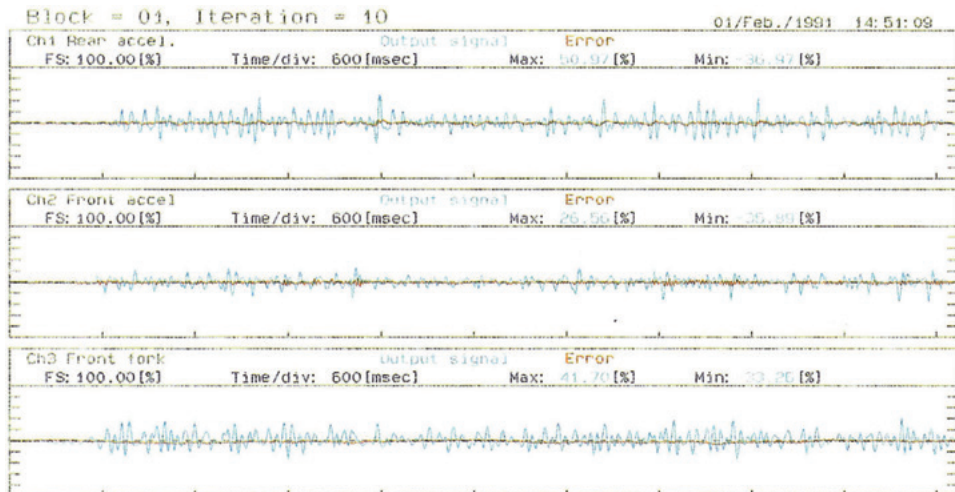


図 13 実走行負荷の台上再現結果

うな補償動作をしてくれるが、この場合、加振機 3 は路面負荷の再現に必要な応答速度が得られないことになる。

立ち上げ時の圧縮荷重を防止し、加振機応答速度も確保する目的で、習い制御のプログラムを開発し DE に組み込んだ。以下は習い制御の手順である。

- (1) 加振機 3 を荷重フィードバックで運転し、荷重をゼロに保つよう、命令信号を与えておく。
- (2) 加振機 1 と 2 を連動させながら、下から上まで移動させる。移動速度は、加振機 3 が荷重ゼロを保ちながら追従できる程度に設定する。
- (3) この時の加振機 3 の変位軌跡を、加振機 1 と 2 の変位軌跡と関連づけて記憶し、図 12 のような 2 次元マップを得る。
- (4) これ以後、加振機 3 も変位フィードバックで運転する。立ち上げ、立ち下げ時には、各加振機は上記マップで定められた軌跡をたどればよい。

上記軌跡は一度学習しておけばよく、以後は何回でも安定して、立ち上げ、立ち下げができるようになる。

リンク機構摺動差の問題をコンピュータ側で解決したことにより、加振治具の簡素化、軽量化が可能となり、高周波数帯域におけるコヒーレンスが改善した。

3.3.2. 前後方向負荷の再現

これまで述べてきたような改善策を講じて、フロントフォーク前後方向応力 (トランスデューサ 3) の再現に関しては、満足のいく結果が得られなかった。

トランスデューサ 3 の出力を表す式、

$$Y_3 = G_{13}X_1 + G_{23}X_2 + G_{33}X_3 \quad (14)$$

において、右辺第一項 (加振機 1 の影響) と第二項 (加振機 2 の影響) が大きく、しかも、単独加振で得た伝達関数 G_{13} と G_{23} は、3 本の加振機を同時に動かした場合のクロストークを、精度良く近似していないことが原因と考えられる。

対策立案にあたって、次の事実に着目した。

- (1) トランスデューサ 1 (リヤアクスル上下加速度) 及び、トランスデューサ 2 (フロントアク

スル上下加速度) の出力は、反復修正 3 回程度で満足のいく誤差レベルとなる。

- (2) 加振機 3 (フロントアクスル前後加振) によるトランスデューサ 1、トランスデューサ 2 の出力への影響は微小である。

そこで、反復修正 3 回程度で加振機 1 と 2 の駆動信号を固定し、以後、加振機 3 の駆動信号に対してのみ反復修正を適用したところ、トランスデューサ 3 に関する誤差も、反復修正 10 回程度で収束し、初めて良好な再現結果を得た。

図 5 の加振システムによる、濃縮耐久路面負荷の再現結果を、図 13 に示す。

図 13 において、Output signal は台上で再現した信号であり、Error は実走行信号と台上再現信号の差 (誤差) である。

4. まとめ

ロードシミュレータのコントロールは、線形近似伝達関数を用いたデコンボリューション処理である。モーターサイクルの実走行負荷を再現する場合、加振系の非線形性を補償する手段として、下記が有効であった。

- (1) 実走行時と同程度のボトムングを発生させて、伝達関数とコヒーレンス関数を計測する。
- (2) コヒーレンス関数を用いて伝達関数を評価し、その結果を基に、反復修正を適用する周波数範囲を決定する。
- (3) 前後方向負荷の再現を容易にするため、2 本の上下方向加振機のコントロールは、誤差が許容範囲に入った時点で反復修正を打ち切る。

また、コントロール部を自作したことは、工数を要した反面、以下のような利点があった。

- (1) ボトムング負荷や、フロントアクスル部の運動の再現など、未体験の課題に対して、対策案を自らプログラム化し、トライすることで解決できた。
- (2) 日本語による対話方式を採用し、また、安全機能やテスト車保護機能を最大限自動化したことで、使いやすいシステムになった。
- (3) コンピュータ関連費用を、約 1/10 とすることができた。

参考文献

- (1) 南、白木他; L A とデータ処理の自動化
P147～175、P433-451、総合技術セン
ター(1983)
- (2) 松田; デジタル信号処理入門
P113～199、日刊工業新聞社(1986)

■著 者■



原 島 正 吉



四 宮 一 雄



高 橋 弘



門 田 正 和



保 田 和 豊