

B1 ラボラトリ・シミュレーション・システム

竹腰 重徳 (日本アイ・ビー・エム)

1. はじめに

近年、コンピュータの応用分野は、種々の分野まで行き渡り、あらゆる面で利用されている。研究室、実験室においても、コンピュータを使ったラボラトリ・オートメーションの試みが数々なされている。¹⁾²⁾

現状のラボラトリ・オートメーションでは、実験対象から計測器を通じて、データを読み込み、それを処理して結果を記録したり、アウトプットしたりする、いわゆる、データ収集処理が数多くみられる。

実験というものを考えてみると、ある目的をもって設計したものが、与えられた環境の中で予期したように動作するかどうかを実際に試すものであるが、経済上、時間上、安全上などの問題から、実験室、研究室などで実際の場面をいろいろな形で模擬を行う一種のシミュレーションである。

さて、データ収集システムでは、実験データの情報処理に中心のテーマがあるが、これに加えて、コンピュータに判断と人間の手足の機能を与え、コンピュータ自身が、実際にシミュレートして実験を行うようなシステムの作成は、入手の削減と早い実験結果の把握の点から大変意義あることと思える。

このようなシステムを、「ラボラトリ・シミュレーション・システム」³⁾という。

ラボラトリ・シミュレーション・システムではコンピュータがすべてをコントロールして実験を行うので、研究者、実験者は完全につまらない雑務から解放され、人間本来の思考と創造性開発に十分効果を果すものと思われる。この論文ではラボラトリ・オートメーションの一環として、ラボラトリ・シミュレーション・システムの一般的な概説を行い、次にその応用例として、自動車工業におけるエンジンテストの自動試験システムについて記述する。

2. ラボラトリ・シミュレーション・システムの概説

2-1 概 念

実験そのものは、設計したものが、予期したように動作するかどうかを、実際に試してみるものであるが、これを容易に行うために、実験室などで実際の場合をいろいろ想定しそれを模擬して行う一種のシミュレーションである。しかし、今まではこのシミュレーションが複雑な場合には、実験者、研究者が実際に実験の操作を行うことが多かった。その一つの例は、自動車エンジンのエンジンテストにみられる。実験室でのエンジン・テスト・ベンチで行なえる実験は、簡単な加減速、一定の高速運転とかだけで、実車走行の場合のように、加速、減速、定

速、停止等が複雑に組み合わせたような実験では、実際に街地を走行してみるとか、テストコースを走るとか、エンジン・テスト・ベンチで人間が運転してみるとかで、そのオペレーションの複雑さのため、自動化が非常にむづかしく、人間の手足に頼らざるを得なかった。これでは人間はオペレーションの時間に大半を費し、人間本来の思考と創造性発揮はなかなかむづかしい。

そこでコンピュータを使って、実際の場合をいろいろ想定し記憶させておき、コンピュータが、時々刻々、実験対象の状況を判断しながら、自動的にデータ収集とコントロールができるようなシステムにしてあげれば、人間は完全にオペレーションから解放され、人間本来の思考と創造性開発に十分目が向けられるようになる。また、実験結果の判断は、研究者、実験者が行うのであるが、これを絶えずコンピュータに教えていくようなシステムにしてあげれば、人間はより高次の判断だけすればよいことになり、ますます、人間は人間だけしかできないより高度の仕事に専念できるようになる。

このように、コンピュータを用いて、実験のデータ収集だけでなく、実験のコントロールまでを行うようなシステムを、「ラボラトリ・シミュレーション・システム」³⁾という。

特に、実験室、研究室という環境は、人間の創造力をますます要求しており、このシステムが有力な道具として十分に役立つものと思われる。

2-2 構成

システムの構成図は、Fig. 1 に示されているが、構成要素を大別すると実験対象の現象を測定するための計測器、実験対象を実際に駆動する操作器、全体のデータ収集と制御を司るコンピュータ、それにコンピュータと操作器、計測器を結合するインターフェイスからなる。

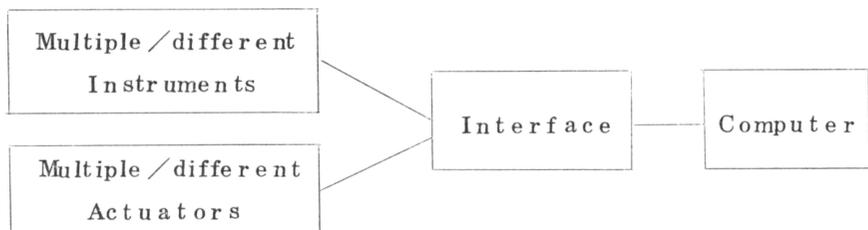


Fig. 1 Laboratory Simulation System

コンピュータには、予め実験方法、比較判断のための規準値を記憶させておく。実験が開始されると、コンピュータは実験方法に従って操作器に対して信号を送り、実際に実験装置を操作する。コンピュータから送られる信号は電気的信号であるが、操作器ではこの信号に応じた力とか変位に変換し、実験装置を駆動しコントロールする。操作器にはパルスで動作するステップモータ、アナログ信号で動く油圧、空気圧系、電気などのサーボモータがある。

一方、実験対象の状況を把握するために、例えば、温度、ガス濃度、トルク、回転数とかいったものが計測器により計測され、電気信号としてコンピュータにデータが送られる。種々の

計測器があるが、これらはパルス信号、アナログ信号として、コンピュータに送られ処理される。

コンピュータは、こうして送られてきた情報があるものは記憶したり、あるものは表示したり、あるものはシミュレーションのコントロールのために使用する。インターフェイスは、計測器、操作器がコンピュータとうまく結合できるようにするもので、A/D変換器、D/A変換器、フィルタ、増巾器、ケーブルなどであるが、センサ・ベース・コンピュータは、それらのインターフェイスの機能をほとんど有しており、計測器、操作器などが簡単に接続できるようになっている。

2-3 コンピュータ

2-3-1 コンピュータの役割

このシステムにおけるコンピュータの役割は、今まで人間が行って来たことを代りにやらなければならないので非常に重要である。システムが成功するか否かは、全くコンピュータに頼っているといて過言ではない。さて、コンピュータが行なわねばならないことは、大きく別けて二つある。

一つは、データ収集解析ともう一つはコントロール機能である。

データ収集解析では、まず、計測器から送られてくるデータが有効なデータかどうかのチェック、雑音除去のためのデジタル・フィルタリング、解析の前のスケールリングなどのデータハンドリングを行い、物理的に意味のある情報にするために、補正計算、統計計算などのデータ解析を行う。この中で表示するのに必要なデータは、プリンタ、プロッタ、ディスプレイなどに表示されたり、記憶しておく必要のあるものは、記憶され、コントロールや情報検索などに使用される。

コントロールの機能では、今、処理された情報を使って予め設定されている規準値と比較し、システムが目標どおりに動くように補償計算を行い、それを電気的信号に変換して操作器にコントロール信号を送る。このようなシステムは、Fig. 2 に示されるようにオンライン閉ループを形成している。

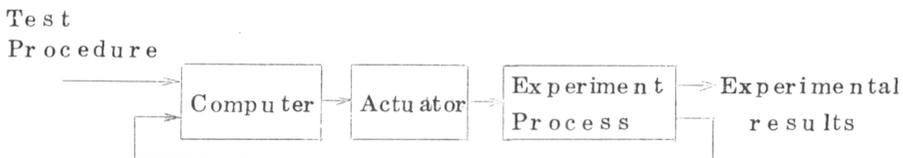


Fig. 2 On-line Closed Loop Computer Control System

2-3-2 コンピュータの選択

ラボラトリ・シミュレーション・システムにおけるコンピュータの選択を考える場合、次の二点について考察する。

- (1) アナログ・コンピュータか、デジタル・コンピュータか
- (2) 専用システムか、汎用システムか

まず(1)について考察する。

このシステムでのコンピュータの役割は、すでに述べたように、データ収集解析とコントロール機能である。ラボラトリでの環境は、変化に富み、流動的であるので、システムにかなりの融通性を要求している。

アナログ・コンピュータの利点は、非常に速い応答速度を持ち、デジタル方式に比べ、安価であるという点であるが、融通性に乏しく精度が悪いという欠点がある。

一方、デジタル・コンピュータは速度がアナログ方式に比べ遅いという欠点はあるが、処理速度というものは、システムの要求に応じれるものであれば、別に絶対的に速くないといけないものでない。デジタル・コンピュータの利点は、プログラムにより容易にシステムを変更できる点——融通性のあるシステムの作成可能——と、大量のデータ処理能力を持ち精度が良いという点である。ラボラトリ・シミュレーション・システムでは、人間に代ってコンピュータが実験をコントロールしていかなければならないので、人間の持つ融通性を考えると、融通性は特に要求されること、かつ、ラボラトリ・オートメーションの目的の一つである精度のよいデータを得ることなどから、デジタル・コンピュータがこのシステムに好ましいことは、明らかである。

次に(2)について考察する。

すでに述べたように、ラボラトリでの環境は技術革新を競うものであり、実験方法なども絶えず変わっており非常に動的な要素が多い。一つの専用システムにすると安価になるという利点はあるが、すぐに使用不可能になることもあり非常に危険である。結局高価なものになる可能性を秘めている。このように、融通性、拡張性の面から、コンピュータはできるだけ汎用システムに向けたものを選ぶ方が好ましい。

2-6 システムの効果

ラボラトリ・シミュレーション・システムの最大のねらいは、人間の持っている能力を最大限発揮させ、研究開発に十分な効果をもたらすことである。

最近では、技術革新の波は非常に厳しく、創造性のある研究開発をより速くより精度よく要求している。

さて、このシステムを導入した場合、一般に次の効果が期待されるであろう。

- ・ 研究者に思考と創造性開発の時間をより多く与える。
- ・ 迅速な結果の把握
- ・ 安価で容易な実験
- ・ 人手の削減
- ・ 実験能力の増大
- ・ タイミングのよい実験

- ・ 精度のよい結果
- ・ 標準化された実験
- ・ 実験データの管理の容易化
- ・ 実験装置，機器の有効利用
- ・ 実験システムの変更の容易化

3. 適用例一自動車エンジン自動試験システム

3-1 はじめに

開発中の自動車エンジンテストには，大別して性能試験，耐久試験がある。⁴⁾

性能試験は，過渡的なエンジンの現象を捕えることが多く，燃費，気化器，振動，ノイズなどのエンジン性能評価のために行なわれる。一方，耐久試験では，実際に道路を走行した場合に生ずる条件を各種の機器を用いて発生させ，長時間エンジンを運転した場合，どういふ影響があるか，実用上問題はないかなどのエンジン耐久評価のために行なわれる。前者の場合には，エンジン・テスト・ベンチにエンジンを取りつけて実験が行なわれ，後者の場合には，エンジン・テスト・ベンチ，実車走行（実際に車に積んで走行する）の方法で行なわれる。エンジン・テスト・ベンチで行なわれる耐久試験は，簡単な試験だけで，実際に走行する時の走行条件を作り出して実車走行の場合と同じようなテストをすることはかなりむずかしく，このような場合は実車走行をすることが多い。また，たとえベンチでエンジンを動かすとしても，運転は人間がやる場合が多く，労力はかなり運転することにとられる。

そこで，2に述べたようなラボラトリ・シミュレーション・システムの考えをこのエンジン・テスト・システムに導入し，完全に無人テストが行なわれるようなシステムにすれば，かなりの効果が生まれるものと考えられる。国内でのエンジンテストのラボラトリ・オートメーション・システムとしてはデータ収集解析が中心であるが，⁵⁾国外では，ベンチ上でエンジンを自動運転し，実際の走行状態をシミュレートしてエンジン・テストを行う試みは，数年前より行なわれ，かなり実績をあげている。³⁾⁶⁾⁷⁾

ここでは，ラボラトリ・シミュレーション・システムとして最も効果を発揮できるものと思われる耐久テストについて記述する。

3-2 エンジン・テスト・ベンチ⁴⁾

エンジン・テスト・ベンチはFig. 3に示されるように動力計，エンジンを載せる台，その他回転計，燃費計，温度計などの種々の計測器からなる。

エンジンは台上に固定して取り付けられ，エンジン出力は動力計に直結されている。動力計は直流電流でトルクをコントロールできるようになっており，エンジン出力トルクを吸収する。車が実際に走行中は，出力トルクの他に，風，道路，車体重量，補機を動かすためのもの等の数々の抵抗トルクがエンジンに働くが，この抵抗トルクを動力計でコントロールするのである。定速で走行しているということは，エンジンの出力トルクと抵抗トルクがつり合い，出力トル

クが高ければ加速，低ければ減速となる。

抵抗トルクは車速の関数となり，外部からの指定で電流を自由に変えられるので，実車走行状態をコンピュータのコントロールによりシミュレートすることができる。

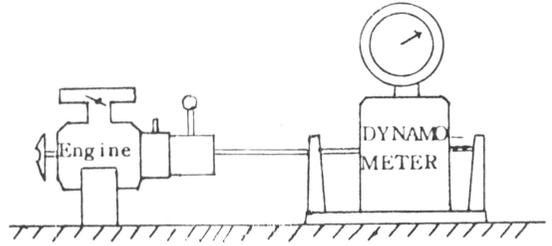


Fig. 3 Engine Test Bench

エンジン自動試験システムは，あるテストコードを予めコンピュータに記憶させておき，そのコードに従って試験エンジンが忠実に運転されるように時々刻々エンジンの状態を把握しながら，制御信号を出して制御を行ういわゆる閉ループコントロールシステムである。途中エンジンテストに関する情報は指定に従ってプリントアウトしたり，記憶したりしている。このシステム・ブロック図がFig. 4に示される。

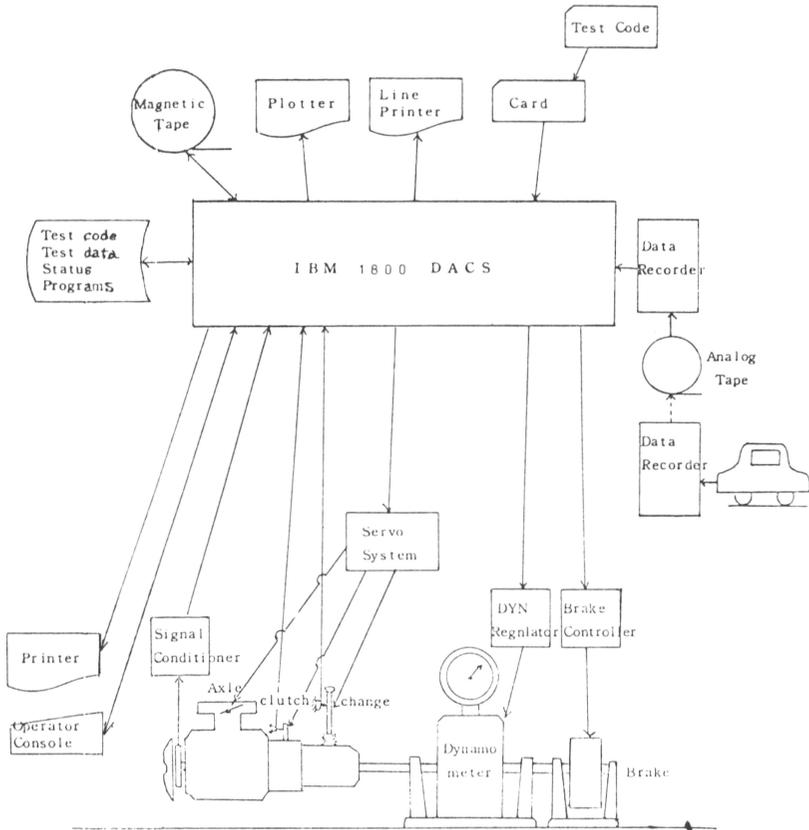


Fig. 4 Automatic Engine Test Control System

テストコードは、時間の関数として車速、変速位置、ブレーキ、規準値などをカードで与えることも出来るし、実車走行のデータとしてデータレコーダからも与えることもでき、それらはディスクに記憶させておく。そして、試験エンジン台上に載せ、種々の実験機器をチェックして、このシステムのために特に設計された操作卓からテストのための情報（テストされる走行モード、エンジンコード、データ収集の方法など）をコンピュータに入れ、テスト開始をコンピュータに知らせる。この時点で人間は完全に解放される。コンピュータはテストコードに従って、エンジン回転数、トルクなどの情報を時々刻々検知しながら、車のアクセル開度、クラッチ、変速器、ブレーキ、動力計のコントロールを行い、データ収集に必要なデータも時々刻々処理している。このシステムの大きな特徴は、無人運転を行っているので、時々刻々のデータは規準値と比較され、試供エンジンが暴走したり、破壊されたりしないようなチェック機構が十分に施されている。また自動運転の時むずかしい変速についても、半クラッチの状態を作り出せるようになっており、スムーズな運転が可能である。

Fig. 4 において IBM 1800 DACS は種々のデータプロセッシング入出力装置を持っているが、これらの機能は

- ・カード テストコードやプログラムをコンピュータに入力する
- ・プリンタ 結果の印刷
- ・プロッタ 結果の作図
- ・ディスク TSX, テストコード, 結果の記録, プログラムの記憶
- ・テープ 実車走行データの一時記憶, 連続高速データの収集

である。プロセス入出力は、コンタクト入出力、アナログ入出力、パルス入力などが、データ収集やコントロールに使用されている。

このシステムには TSX を使い、コンピュータの利用率をあげるためにオフラインの技術計算も同時に行なえるようなシステムになっている。

3-4 システム設計

3-4-1 設計方針

・このシステムでは、無人で長時間実車走行をシミュレートするのであるから、最も考慮しなければならないことは、絶対にシステムを故障から守ることと、万一故障しても早急にテストが再開できるようにチェックとリスタート機能を十分に考える。

・対象がラボラトリーである以上、環境変化は動的に変化するため、これに十分対処できるように融通性、拡張性のあるシステムにすることを考慮する。

3-4-2 制御系モデルの解析とシンセシス⁸⁾

ここで対象となる制御系モデルは、加速、定速時に問題となるコンピュータ操作器—エンジンアクセル系と、減速時に問題となるコンピュータ—動力計系であるが、減速系ではシミュレートする抵抗トルクを車速に応じて閉ループで動力計に指示すればよく、ここでは閉ループになる定速、加速系について述べる。

加速、定速系では、エンジン速度を時々刻々コンピュータに読み込み、テストコードの設定車速と比較して、その偏差がなくなるようにコンピュータで計算し、信号を操作器に送りそれによりアクセル開度を適当に変化させてエンジンを運転する系で、Fig. 5 に示される。

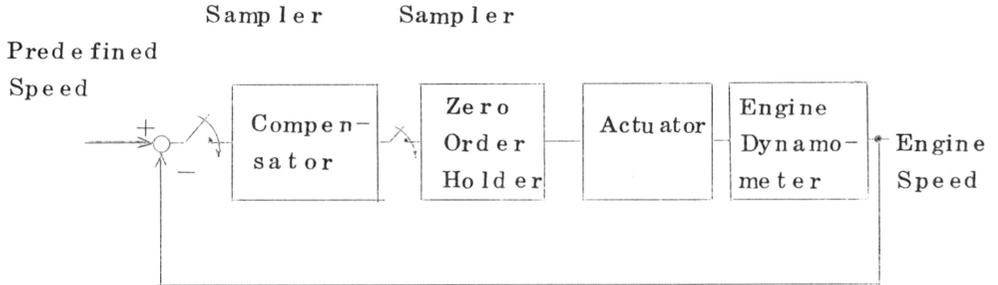


Fig. 5 Engine Control System

・制御系モデルの解析

制御系モデルの伝達関数はラプラス変換式で示される。Fig. 5 の零次保持回路 $H(S)$ とすると

$$H(S) = \frac{1 - \exp(-TS)}{S} \quad (1)$$

ここで、 T はサンプリング間隔

操作器、エンジン系の伝達関数を実験的な方法と解析的な方法で求めることができるが、この系を実験的な方法つまり過渡応答で求めるとその伝達関数 $G(S)$ は一次系になり、次の式に示される。

$$G(S) = \frac{A}{1 + PS} \quad (2)$$

A : ゲイン, P : 時定数

これらの A , P は実験結果から求める。

・モデルのシンセシス

Fig. 5 の伝達関数が求まったので、(1), (2) 式を使ってコンピュータで行なわせる補償要素をどんな式にすべきかを求める。Fig. 5 はサンプル値制御系となるので、 S 領域の現象を Z 領域で解析を行う。

一般的に伝達関数 $K(S)$ を Z 変換するには

$$K^*(Z) = \frac{1}{2\pi j} \oint K(P) \frac{1}{1 - Z^{-1} \exp(PT)} dP \quad (3)$$

但し $Z = \text{EXP}(TS)$

を使えばよく、Fig. 5 の0次保持、操作器—エンジン系を一つの系とみなして Z 変換すると

(1)(2)(3)式から Z 領域の伝達関数が求まり、それを $F^*(Z)$ とする。

ここでコンピュータが行うデジタル補償要素を $D^*(Z)$ とし、ステップ入力に対して最短時間で整定するように $D^*(Z)$ を求めると

$$D^*(Z) = \frac{Z^{-1}}{F^*(Z)(1-Z^{-1})} \quad (4)$$

(4)は結局 Z の関数となるので、これは差分方程式となり、コンピュータのコントロール式は求められる。

こうして求めた系が実際に動作するかどうかを調べるのには、一般的にシミュレーションを行えばよく、デジタル・コンピュータでCSMPを使って、シミュレーションを行なったが計算どおりに動作した。また実際のFig. 4のシステムで、エンジンを運転した結果をプロッタを使ってプロットさせたが非常によい結果が出た。これがFig. 6に示されている。

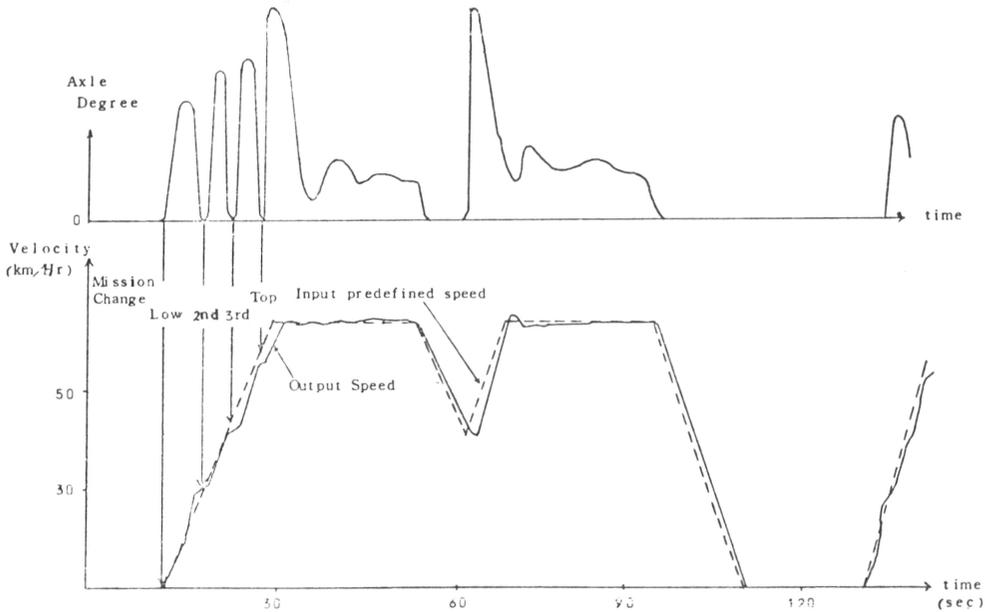


Fig. 6 A Result of Computer Control Engine Test System By Plotter

3-5 システム効果

- ・ 研究者の単純かつ危険な作業からの開放

エンジン運転の作業は、研究者にとって単純で退屈な作業である。研究者をそのような単純な作業から解放し、人間本来の思考と創造性開発の時間を与え、より研究成果を出すことができる。次にどんな場合でも人間の安全性というものは考慮されねばならない。エンジンを運転する場合、人間が行くとどうしても危険から逃れることはできない。しかし、この無人運転システムでは、人間を危険な作業から解放するので、大変意義深いことと思われる。

- ・ 開発期間の短縮

例えば、加速、減速、定速、停止を種々に組み合わせ5万マイルを走行する場合、もし人手により三交替で行うとしても、4ヶ月余りかかるが、このシステムでは、完全に1日24時間運転が可能であるので、3ヶ月位でテストは完了することになり、1ヶ月間の短縮となる。このように長時間連続運転の場合、かなりの短縮となる。

- ・ テスト費用の削減

エンジンベンチ上で実車による走行状態をシミュレートできるため、実車走行テストの回数を減らすことができる。このことはエンジンテストのためのボディの作成費用を低減することを意味している。ただ、開発期間の短縮と一回のテストで、今まで行っていなかったテストも同時にできるようになることを考慮すると、実験設備も有効に利用することができ、テスト一回当たりの費用は当然下る。

- ・ その他

精度のよい、標準化された、融通性のあるテストが可能となる。

4. む す び

コンピュータ、特にセンサ・ベース・コンピュータのラボラトリの一応用例として、ラボラトリ・シミュレーションとその適用例を記述した。ここではコンピュータがラボラトリにおいて、一種のロボットの役割を演じ、かなりの効果をあげることが判明した。

今後、ラボラトリ・シミュレーション・システムは単にエンジンテストだけでなく他の分野にも使用され、十分なる効果をあげるものと思える。

参 考 文 献

- (1) J. D. Swalen他; IBM Journal of Research and Development Vol. 13 No.1 Jan '69
- (2) 三上、竹腰; IBM コンピュータ・サイエンス・シンポジウム論文集 '68 p. A4~A20
- (3) B. F. BRENDER他; 'Laboratory Simulation, Mark-II-GT Power-train', Society of Automotive Engineering technical paper No. 670071 '67
- (4) Ake Larborn; 'Automation in Engine Laboratory', Society of Automotive Engineering Technical Paper No. 650458 '65
- (5) 深田定彦他; 'エンジン台上性能実験に応用したデジタル・コンピュータによるオンライン・リアル・タイム・システムについて' IBM Review 18
- (6) GILBERT WILLIAMS他; 'A Study of Closed Loop Control

And Data Acquisition for Engine Test Cells' Society
of Automotive Engineering Technical paper No. 680134
' 68

(7) L. S. LEONARD他; 'Dynamometer Testing under Computer
Control' Society of Automotive Engineering Technical
paper No. 680131

(8) 藤井澄二; 制御工学Ⅱ 岩波講座 基礎工学20 岩波書店 p. 107~141

本 PDF ファイルは 1972 年発行の「第 13 回プログラミング・シンポジウム報告集」をスキャンし、項目ごとに整理して、情報処理学会電子図書館「情報学広場」に掲載するものです。

この出版物は情報処理学会への著作権譲渡がなされていませんが、情報処理学会公式 Web サイトの https://www.ipsj.or.jp/topics/Past_reports.html に下記「過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について」を掲載して、権利者の検索をおこないました。そのうえで同意をいただいたもの、お申し出のなかったものを掲載しています。

過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について

情報処理学会発行の出版物著作権は平成 12 年から情報処理学会著作権規程に従い、学会に帰属することになっています。

プログラミング・シンポジウムの報告集は、情報処理学会と設立の事情が異なるため、この改訂がシンポジウム内部で徹底しておらず、情報処理学会の他の出版物が情報学広場 (=情報処理学会電子図書館) で公開されているにも拘らず、古い報告集には公開されていないものが少からずありました。

プログラミング・シンポジウムは昭和 59 年に情報処理学会の一部門になりましたが、それ以前の報告集も含め、この度学会の他の出版物と同様の扱いにしたいと考えます。過去のすべての報告集の論文について、著作権者（論文を執筆された故人の相続人）を探し出して利用許諾に関する同意を頂くことは困難ですので、一定期間の権利者搜索の努力をしたうえで、著作権者が見つからない場合も論文を情報学広場に掲載させていただきたいと思います。その後、著作権者が発見され、情報学広場への掲載の継続に同意が得られなかった場合には、当該論文については、掲載を停止致します。

この措置にご意見のある方は、プログラミング・シンポジウムの辻尚史運営委員長 (tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp) までお申し出ください。

加えて、著作権者について情報をお持ちの方は事務局まで情報をお寄せくださいますようお願い申し上げます。

期間：2020 年 12 月 18 日～2021 年 3 月 19 日

掲載日：2020 年 12 月 18 日

プログラミング・シンポジウム委員会

情報処理学会著作権規程

<https://www.ipsj.or.jp/copyright/ronbun/copyright.html>