

# 学位論文の要旨

シミュレーション駆動による問題分析手法へのアプローチ

— データ取得, デバイスマデリングおよびシミュレーションの各ステップ実践 —

An Approach for the Method of Simulation Driven Problem Analysis  
- Practices of data acquisition, device modeling and system simulation

氏名 中上 京治 印

組込みシステム開発・設計においては、モデリングツールを用いたモデルベース設計 MBD(Model Based Design)が広がりつつある。これは制御対象プラントや制御器を MATLAB/Simulink などのモデリングツール上でブロック線図によってモデル化し、段階的詳細化で設計を行うものである。制御器やプラントのモデルは、モデリングツール上でシミュレート動作させることが可能である。シミュレーションによってモデル検証を行うことで、設計検証フィードバックを早期に行うことが可能となる。代表例として、プラントとして実機が存在する場合は、RCP(Rapid Control Prototyping)という手法が知られている。プラント実機が存在しない場合は、プラントをシミュレート動作させ、評価段階の制御器実機と連動させる HILS(Hardware In the Loop Simulation)という手法も挙げられる。設計の早期段階(分析, 基本設計段階)でプラントと制御器の両方をシミュレートし設計検証を行う MILS(Model In the Loop Simulation)も知られている。この際のモデル化対象は人工物であるが、これを自然物に適用拡大し、モデリングツールを用いて対象をシミュレーションによって分析し理解を深めることが、シミュレーション駆動による問題分析のパラダイムである。そのアプローチ方法は、以下の3ステップと考える。以下、そのアプローチ方法を、以下の3ステップと考える。

- (1) プラント(キーデバイス)の特性データを得る
- (2) 得られた特性データからプラント(キーデバイス)のモデル化を行う
- (3) プラントモデルに制御モデルを加えてシミュレート分析する

さらに、これらのステップが研究の環スパイラルを構成し、これらのステップを実践することで研究の環スパイラルを登ることができると考えた。上記は、科学の進展における「武谷三段階論」を参考としたものである。三段階は現象論、実体論、本質論の段階で構成される。惑星運動で例えるなら、現象論段階はティコ・ブラーエの天体観測、実体論段階はケプラーの惑星運動の三法則発見、本質論はニュートンの万有引力の発見に例えられる。上述の第1と第2ステップは、現象論と実体論段階に相当する。第3ステップは、本質論段階に代えて、現代の発達したコンピュータとオブジェクト指向のモデリングツールを活

用し、作成したモデルを用いたシミュレーションによって対象プラントの分析を行い、本質へ迫るステップとして捉えた。異なる研究テーマではあるが、在学期間にて、考えた3ステップに該当する研究テーマを実践する幸運に恵まれた。その実践内容を述べ、上記手法へのアプローチを紹介する。

第1ステップのデータ取得は、「鉛バッテリーの内部抵抗器の開発」テーマで実践を行った。パルスを与えながら鉛バッテリーを充電することで、鉛バッテリーの延命化が図れるか、データ取得を行った。従来は、短期間の自動測定か長期間の手動測定の結果しかなく、延命効果が不明確であった。直流四端子法による内部抵抗測定回路を作成し、IoTタイプの測定器を6セット構成し、半年に渡る自動測定を行った。弱いながら、パルスによる鉛バッテリーの延命化効果が確認できた。測定継続によるデータ取得とパルス影響による内部抵抗変動を含むモデル化が次の課題である。

第2ステップのモデル化「リチウムイオンキャパシタのモデル化」テーマで実践を行った。研究室の先行研究でリチウムイオンキャパシタ充放電得エイのデータ取得と充放電回路の制御モデル作成は完了していた。しかし、基本設計に適用可能な簡素なプラントモデルは存在せず、充放電特性を再現する簡素なプラントモデルの作成が課題となっていた。充放電電流に対する容量依存性に着目し、可変容量と2つの抵抗の3素子からなる簡素なモデル作成を行った。充放電特性の精度評価を行い、相関係数0.9986以上の高い精度を確認した。このモデルを利用したEVにおけるハイブリッド・エネルギー・マネジメント・システムのシミュレーションによるモータ駆動と電力回生シミュレーション分析が次の課題である。

第3ステップのシミュレートは、「循環器シミュレータの開発」テーマで実践を行った。研究室の先行研究で心臓（左心室）モデルと単一管大動脈モデルによるシミュレータが存在していた。ここにCampbell'90の非対称T字管型の大動脈モデルを結合し、シミュレーションを行った。Murgó'80分類の血管タイプに応じたシミュレーション結果を確認した後、モデルによって求めた大動脈中心部の脈波を前進波と後退波に分解する解析を行い、これを用いて大動脈端部の血圧を求めた。この解析結果から大動脈端部から中心部間の伝達関数の再現を行った。このことから、大動脈端部の脈波から医学的に興味深い中心部の脈波を求められる理論的基盤を確認できた。また、頭部と体部間の大動脈波間の血流動態や大動脈内の進行波・後退波の動態理解が深まった。実際の端部の脈波を測定し、大動脈中心部の脈波推定ができるかが次の課題である。

上記のように、考えた3ステップを全て実践した。また、第3ステップの問題分析によって、大動脈というプラントの理解が深まり、これを契機に「ウェアラブルな容積脈波測定器を用いた中心血圧測定システム」の開発が開始された。第3ステップの結果、研究の環が一段上への環へとスパイラルアップすることを目の当たりにすることができた。

以上をもって、シミュレーション駆動による問題分析手法へアプローチしたと結論づける。

In embedded system development and design, Model Based Design are expanding. Model controlled plants and controllers are modeled with block diagrams on modeling tools such as MATLAB / Simulink and design them step by step in detail. The Controller models and the plant models can be simulated by using modeling tools. By performing model verification by simulation, design verification feedback can be performed at an early stage. As a typical example, when an actual machine exists as a plant, a technique called RCP (Rapid Control Prototyping) can be used. In the absence of the actual plant, a method called HILS (Hardware In the Loop Simulation) that simulates the plant and interlocks with the control device at the evaluation stage can also be used. MILS (Model In the Loop Simulation) that simulates both plant and controller at design early stage (analysis stage and basic design stage) and performs design verification is also known. In this case, the modeling object is an industrial product, but the pattern of Simulation Driven Problem Analysis is to extend the application to natural objects, analyze the object by simulation using a modeling tool, for proper and deepen understanding. The following three steps are considered as design approach.

- (1) Data acquisition: Obtain characteristic data of plant (key device)
- (2) Modeling: Model the plant (key device) from the obtained characteristic data
- (3) Simulation: Simulate and analyze the plant model by adding a control model

In addition, I considered these steps to build a research cycle and go upward as a spiral though updating each steps. The above is based on "Taketani's Three-stage Theory" in the progress of science. The three stages consist of the phases of phenomenology, entity theory and essential theory. If you consider this as a planetary movement, the phenomenological stage is similar to Tycho Brahe's astronomical observation, the entity theory stage is the discovery of Kepler's three Laws of planetary motion, and the essential theory is similar to the discovery of Newton's universal gravitational force. The above first and second steps correspond to the phenomenological theory and the entity theory stage. The third step is changed as essential theory stage, I introduced the step to analyze the target plant by simulation using the model created using the modern developed computer and object-oriented modeling tool, and caught it as an essential theory approach step. Although for different research themes, I was fortunate to practice the research theme that belongs to the three steps I thought at the school term. I will present the practical contents and introduce the approaches to the above method.

The first step of data acquisition was practiced under the theme of "On-line Measurement System for Internal Resistance in Lead Acid Battery" theme. By

charging the lead battery while giving pulses, data acquisition was carried out to check the possibility to extend the lead battery life. Conventionally, there were only short-term automatic measurements or long-term manual measurements, and the life extension effect was unclear. An internal resistance measurement circuit was prepared using a DC four-terminal method, six sets of IoT type measuring instruments were constructed, and automatic measurement was carried out for six months. While weak, we were able to confirm the prolongation effect of lead battery by pulse. Modeling including data acquisition by measurement continuation and internal resistance variation due to pulse influence is the next task.

The second step of modeling was practiced under the theme of "Modeling of a Lithium-Ion Capacitor in a Model-Based Design". In the previous laboratory research, data acquisition of lithium ion capacitor charge / discharge data and creation of control model of charge / discharge circuit were completed. However, there is no simple plant model that can be applied to the basic design, and the creation of a simple plant model that reproduces charge and discharge characteristics has been a problem. Focusing on the capacitance dependence on the charge / discharge current, we made a simple model consisting of three elements of one variable capacitance and two resistors. The accuracy of charge / discharge characteristics was evaluated, and high accuracy of correlation coefficient of 0.9986 or more was confirmed. The next challenge is motor drive and power regeneration simulation analysis by simulation of hybrid energy management system in EV using this model.

The third step of simulation was practiced under the theme of "Development of Cardiovascular Simulator". A simulator based on the heart (left ventricle) model and single pipe aorta model existed in the laboratory precedent study. Here, an asymmetric T-shaped aorta model of Campbell '90 was combined and simulation was performed. After confirming the simulation result according to the blood vessel type of Murgo '80 classification, we analyzed the pulse wave of the central aorta determined by the model into the forward wave and the backward wave, and used it to find the blood pressure at the end of the aorta. From this analysis result, the transfer function between the aortic end and the central part was reproduced. From this, it was possible to confirm the theoretical foundation from which the pulse wave of the central part which is medically interesting can be obtained from the pulse wave at the end of the aorta. Also, the understanding of the blood flow dynamics of the aortic wave between the head and the body was deepened. Furthermore, the understanding of the dynamics of the forward wave and the backward wave in the aorta has deepened. The next task is to measure the actual pulse wave at the aorta end and to estimate the

pulse wave at the center of the aorta. ....

... As mentioned above, I practiced all three steps I thought. In addition, through the problem analysis of the third step, the understanding of the aorta plant has deepened, and the development of the "Wearable Central Blood-Pressure Gauge" is started. By practicing the third step, we are able to go spirally upward through the research cycle..

... Based on the above, I conclude that the Simulation Driven Problem Analysis was approached. ....