概念・機能設計および訓練シミュレータへの 1DCAE の応用

—インクジェットプリンタのシミュレーションモデルの開発—

Applications of 1DCAE for Concept and Functional Design and Training Simulator — Simulation Model Development of Inkjet Printer —

○学 清水 一貴（山口大院） 正 春山 繁之（山口大）正 上西 研 （山口大） 金子 準二（山口大）

Kazuki SHIMIZU, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Shigeyuki HARUYAMA, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Ken KAMINISI, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Junji KANEKO, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Key Words: Training Simulator, Inkjet-Printer, 1DCAE, System Model,

1. 緒言

製品開発では、製品に価値を与え顧客の要求を満足するために、製品の機能を十分に考え、設計する必要があるが本研究ではこの工程を機能設計と呼ぶ。また機能設計は、開発する製品の形や大きさを決定する前の段階であるため、形状に対する制約が存在しない。つまり、設計の自由度が大きいという特徴がある。反面、詳細設計の前に要求された機能を達成できるかを徹底的に検討することが重要である。

そこで大富らによって価値や機能を定義する方法として 1DCAE⁽¹⁾が提案されている。しかし、1DCAE は製品の構造を決定し設計することができる 3DCAE に比べ実用化が遅れている。そこで筆者らは、製品を設計の上流工程から解析を駆使し事前検討を十分おこなう解析主導型設計（Analysis Led Design）の考え方をもとにこれまでシステムモデルを提案し、その有効性について検証をおこなっている⁽²⁾。

システムモデルはコミュニケーションの円滑化や開発の効率化に貢献することを目的として、「オブジェクト指向」とよばれる考え方を取り入れている。オブジェクトは関連するデータの集合と、それに対する手続きをまとめたものである。このオブジェクトはメッセージを受け取ることで、その機能を発揮する。システムモデルは、オブジェクトを部品システムに対応させ、これが有機的に結合したものとしてモデルを構築する。部品システムは機能と工学データをひとまとまりにしたものである。また、システムモデルの基本コンセプトを以下に示す。

- (1) モノを認識するために物理量をはかり、それを移動・変化させるために物理量を直接操作する
- (2) 物理量の変化に情報・信号を読み取り、その変化に情報・信号をのせる

次に機械系における物理情報は上流から下流へ一方に伝わるわけではない。例えば物理における反力や電気回路における逆起電力のように、上流から下流へ物理情報が伝わる。同時に、下流から上流へ情報が伝達される現象が多くある。そこで本研究で提案するシステムモデルでは、「二対入出力システム」を用いている。

さらに構造化プログラミングにおいては何らかの構造が

別の構造を取り囲むことをいうネスティングという概念を取り入れている。システムモデルでは何重にもわたってカプセル化した部品システムの中に、さらに部品システムを組み込むことができる。このように階層構造とすることで、機械システムを構成する部品について、それぞれの関係を正確に表すことができる。

また通常機械システムは、連続時間システム、離散時間システム、状態遷移システムの 3 つのシステムが混在しているため、システムモデルはこれらのシステムを一体とした「ハイブリッドシステム」として扱う必要がある。ハイブリッドシステムは連続・離散時間システムに状態遷移システムを組み込むことで構築され、物理量の変化に情報・信号を読み取り、その変化に情報・信号をのせるというコンセプトより、状態遷移システムでは物理量を判定し、トリガーを発生させる。これにより 1 つのシステム内の状態を切り替える汎用的なモデルの構築をおこなうことができる。

また、システムモデルはものを中心に整理することで着実なスパイラルアップを可能にするという特徴がある。さらに品質工学手法の一つであるタグチメソッドと組み合わせることで、設計上流段階で設計品質に大きく影響する設計パラメータを把握することも可能となることから、設計の効率化に貢献することができると考えられるが、システムモデルは検証例が少なく、実用化に向けてはさらに充実を図ることが必要である。

そこで本研究では流体・機械系が連成する問題を含むピエゾ式インクジェットプリンタのシステムモデル構築のための考え方の提案を試みた。

2. インクジェットプリンタヘッドの提案

2.1 システムモデル構築の検討

本研究ではピエゾ式インクジェットプリンタヘッドを対象とするがピエゾ式インクジェットプリンタヘッドでは逆圧電効果を利用しているため、圧電素子に電圧波形を入力することで吐出する液滴の制御をおこなうことができる。一例として振動板と圧電素子とのパイメタル効果を利用したものに着目すると、駆動電圧を入力することで圧電素子が伸縮し、これが圧電素子に固定された振動板のたわみ変形を引き

起こす。これによってインク室の体積が増減し、内部のインク圧力が上昇した後に液滴がノズルから吐き出される。そのためインクジェットプリンタヘッドは流体-機械系が連成した現象である。またプリンタヘッドと呼ばれる部分はインクの吐出に直接かわるため、この部分の設計は非常に重要である。

次にピエゾヘッドについて、システムモデルの構築過程を説明する。システムモデルとしてモデル化するためには、はじめに対象とする製品を図1に示すような単純化したモデルに置き換える必要がある。ここで m 、 c 、 k はそれぞれ質量、粘性係数およびばね定数である。

Fig.1 Single-degree-of-freedom Vibration System

さらに単純化したモデルから運動方程式を導出するため、先に示した1自由度振動系の場合では変位を x 、外力を f とすれば、(1)式のように表すことができる。また、これを解くためには式中の定数は既知である必要がある。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

ピエゾヘッドの場合も同様に、複数の質量、ばね要素、粘性要素からなるモデルに置き換え、その後質量、粘性係数およびばね定数をそれぞれ導出する。この場合インクがどのような運動をおこなうか知るために、質量 m はインクの質量とする。また、粘性係数 c はインクの流動抵抗より導出することができる。ばね定数 k の求め方は一通りではなく、アクチュエータの変形、ノズルに作用する毛細管力、さらにはヘルムホルツ共鳴より求められる。アクチュエータの変形によるばね定数は、アクチュエータを梁として考え、これに加わる力とインク室の体積変化量との関係より求めることができる。また毛細管力によるばね定数は、毛細管力と変位の関係式より求めることができる。さらに、ヘルムホルツ共鳴によるばね定数は、ヘルムホルツ共鳴の式より求めることができる。ピエゾヘッドに加わる外力 f は圧電素子に電圧を加えることで発生する力となる。

以上のようにピエゾヘッドの運動を表す運動方程式とその集中定数要素について求めることで、汎用の数値計算ソフトを用いたシステムモデルを構築できる。

次にシステムモデルに入力する電圧波形の模式図を図2に示す。また、システムモデルを用いたシミュレーション結果について、これを模式的に図3に示す。システムモデルを構築すると、同図のような結果が得られる。

Fig.2 Image of Input Voltage

Fig.3 Image of Simulation Result

2.2 品質工学手法適用の検討

ここでは前述のピエゾヘッドのシステムモデルについて品質工学手法を適用した設計方法について検討をおこなう。設計因子をヘッドに関する設計パラメータ、誤差因子を雰囲気温度、さらに基本機能を液滴を吐出すること、出力を液滴の吐出速度とし、制御因子に対して水準を設定し、直交表を用いてシミュレーションをおこなう。この結果より SN 比および感度の要因効果図を作成すれば、液滴の吐出速度に対して影響の大きい設計因子を把握することができる。

さらに、二段階設計をおこなう。一段階目では SN 比が最大、すなわち液滴吐出速度が最もばらつきにくい条件を決定する。その後、二段階目となるべく SN 比に影響を与えず、出力に対する影響が大きい設計因子を選び出す。この因子の値を変更することで液滴の吐出速度を目標値へとあわせる。これによって設計品質を向上させ、製造工程や市場に出た後に問題が発生しないようにするための検討をおこなうことができる。

2.3 システムモデルの応用

さらに、システムモデルは集中定数系のモデルであり、計算時間が短いことから、訓練シミュレータへの応用が期待できる。インク吐出時の様子については流体解析によってその挙動を確認できるが、計算時間が膨大なものになってしまう。また産業用のピエゾ式インクジェットプリンタは、家庭用のものと異なり、被印刷物が変更されるたびに入力波形の調整が必要である。そこで、シミュレーション結果をアニメーションとして表示できれば、波形の変更、吐出される液滴の速度や体積の確認といった作業をコンピュータ上で行うことが可能となる。ここでアニメーションの模式図を図4に示す。以上よりシステムモデルを応用すると、訓練シミュレータとして利用できる可能性があると考えられる。

Fig.4 Image of Animation

3. 結言

本研究ではピエゾプリンタヘッドのシステムモデル構築における考え方とこれに対する品質工学手法の適用、さらに訓練シミュレータへの応用の可能性について検討した結果、プリンタヘッドのシステムモデルを構築し、これを訓練シミュレータとして利用できる可能性があると考えられる。

文献

- (1) 大富浩一, 1DCAE によるものづくりの革新, 東芝レビュー, Vol.67, No.7, (2012), pp7-10
- (2) Shigeyuki Haruyama et al., Implementing ALD in Product Development: The Effect of Geometrical Dimensions on Tubular Member Deformation, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering Vol.7, No.11, (2013), pp278-282