

機能モデルによる直流モータと遊星歯車の運動解析

小村, 建人 / OMURA, Kento

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

57

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2016-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00012930>

機能モデルによる直流モータと遊星歯車の運動解析

DYNAMIC ANALYSIS OF DC MOTOR AND PLANETARY GEAR BY FUNCTIONAL MODEL

小村建人

Kento OMURA

指導教員 御法川学

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

As shortened development period has been recently requested to every companies, the simulation models of each project are usually used for this purpose. However, actual models such as automobile and aircraft require new modeling method exceeding mechanic and electric fields, which is too large to make a full modeling by the conventional method. This new method can make same modeling between mechanical and electrical systems by equally dealing with force and current as intensive quantity, velocity and voltage as extensive quantity. Moreover, the simultaneous modeling with an electrical and mechanical properties is conducted and compared with experimental data. As a result, it is found that the simulated angular velocity is nearly equal to the value obtained by the experiment, excluding transient response. The frequency of the angular velocity fluctuation of the experiment and simulation value were equal by FFT analysis. Also, a planetary gear was modeled and it was combined with a model of motor. Both input and output, the simulated angular velocity is nearly equal to the value obtained by the experiment. However, there are some problems in transient response.

Key Words: Functional Model, Modeling, Motor, Simulation

1. 諸言

近年,ものづくりにおいて設計と生産は切っても切れない関係にある。ものづくりの規模が小さく、複雑ではなかった時代には設計と生産は一体化していた。このような時代において、ものづくりの良否は技術者の能力に大きく影響していた。その後、大量生産技術の向上や設計手法である CAD/CAE の普及により、ものづくりも大きく変化し、設計の効率化、開発期間の短縮などの効果をもたらした。一方で、改良設計では CAD/CAE による構造を起点にしたものづくりが適しているが、新規で設計する場合、価値・機能を起点とし、この結果を構造に反映する必要がある。しかしながら、価値・機能を起点において設計する場合、現状の CAD/CAE を適用することができない。そこで、価値・機能を起点とした設計の枠組みを 1DCAE と呼び、開発が行われている。日本のものづくりは与えられた仕様に沿って要素製品を作ることには長けているがこれだけでは今後のものづくりには不十分である。必要なことは、デザイン思考を設計に取り込むことである。そこで、日本の特質を生かし、設計の上流から下流まで通して適用可能で、革新的なものづくりを実現するために 1DCAE が提案された。1D は一次元を意味しているわけではなく、見易くシンプルに表現することを意味している。

1DCAE の考え方を具現化してくれる一つのツールとして物理モデルシミュレーションが有力である。物理モデルシミュレーションとは、形状などは考えず、質量、ばね定数といった独立した情報だけで解析することである。ただ、現状の物理シミュレーションツールはすべての物理現象を扱うことが困難であり、改良もしくは別の全く違うコンセプトのツールが要求される⁹⁾。これらの問題および要件を解決するツールとして角田博士らによって「機能モデル」が提案された。一般に機械は、エネルギーの変換・移動により機能し使命を果たす。瞬時エネルギーは、電気系では電圧 V と電流 I の積からなる電力、機械系では速度 v と力 f の積あるいは角速度 ω とトルク T の積からなる動力の形をとる。機能モデルにおける物理機能線図では、モデルの入出力を、瞬時エネルギーを用いて標準化することにより、専門物理領域を越えてモデルを接続・分離・展開・統合・分解できる¹⁻⁶⁾。

そこで本研究は、機械システムの基幹部品である直流モータと遊星歯車を対象とし、機能モデルを作成し、運動解析を行う。さらに、実験を行い開発モデルの有効性を検証する。この手法では、エネルギー原理に従い、微分方程式と表裏のモデル化を異分野と統合して行うことができる。

2. 機能モデル

2.1 機能モデルの特徴

- ・電気・機械・流体・熱力学のエネルギー法則に従い機能表現する物理モデルを作成する.
- ・ブロック線図を模した物理機能線図を用い, 対象の機能構成を視覚的に理解し易くしている. 図 1 に記号の一例を示す.
- ・エネルギーの流れを基本とし, 機械と電気等の分野を超えてモデル化可能である.

2.2 機能モデルの例

図 2 は, 一質量減衰系の力学モデルであり強制加振力 f_2 が質量 M に作用して速度 v_2 を生じ, 支持部に強制速度 v_1 が作用して力 f_1 が生じるとする. 質量 M の変位を x_2 , 支持部の変位を x_1 とすればこの力学モデルの動きは式 (1) で表せる. これを機能モデルで表現すると図 3 となる. 図 3 と式 (1) は表裏の関係にあり, 図 3 から式 (1) が自動生成される.

3. 直流モータのモデル化

3.1 直流モータ単体

図 4 にモータの機械・電気系の変換を示す. 変換係数であるモータ定数 M を用いることで, 電流 I がトルク T , 角速度 ω が電圧 V に変換される電気系と機械系の結合モデルを作成した. 機械系と電気系それぞれの上下線の単位を乗算すると, (電圧 $\times$ 電流), (角速度 $\times$ トルク) はどちらも瞬時エネルギー $[W]$ となる.

図 5 は, 制御系を持たない永久磁石型直流モータの解析モデルである. 同図は, 左側電源部が電源電圧 E_0 , 電源内部の抵抗 R_{bat} により構成され, 中央の直流モータ部は, 電機子に巻かれたコイルによる巻線抵抗 R_m ・自己インダクタンス L , また右側動力負荷部がモータの慣性モーメント J ・モータ内部の粘性抵抗 C_m ・モータシャフトに取り付けられた負荷による外部抵抗 C_{load} でそれぞれ構成される.

図 6 は図 5 を機能モデル化したものである. また, モータの状態方程式は式 (2) となる. M はモータ定数, I_n はモータ巻線に流れる電流, ω_n はモータの角速度, v_b は端子間電圧である.

3.2 トルク変動を考慮したモータの機能モデル

モータのトルクは, ロータの回転角度により変動している. そこで, ロータの角速度からロータの回転角度を導きだし, サイン成分とコサイン成分に分け電気系に代入した. そして, トルク変動の要因であるコサイン成分を有効成分として考え, さらに 3 スロットモータなので位相 $+120^\circ$, -120° のスロットを追加しモデルを作成した.

3.3 トルク変動を再現するモータの機能モデル

3.2 のモデルでは, トルク変動自体を表現することはできたが, 実験と比較して変動振幅に大幅な相違が見られた. そこで, 実際の発生トルク値からロータの回転角度を導き, サイン成分とコサイン成分に分け電気系に代入

した. そして, トルク変動の要因であるコサイン成分を有効成分として考え, トルク変動を表現した. また, 変動振幅の大きさは磁氣的要因であることから単振動の理論とロータの回転角度を利用し値を導き, その値を磁氣的要素を持つモータ定数に乗算し, 変動振幅を表現した.

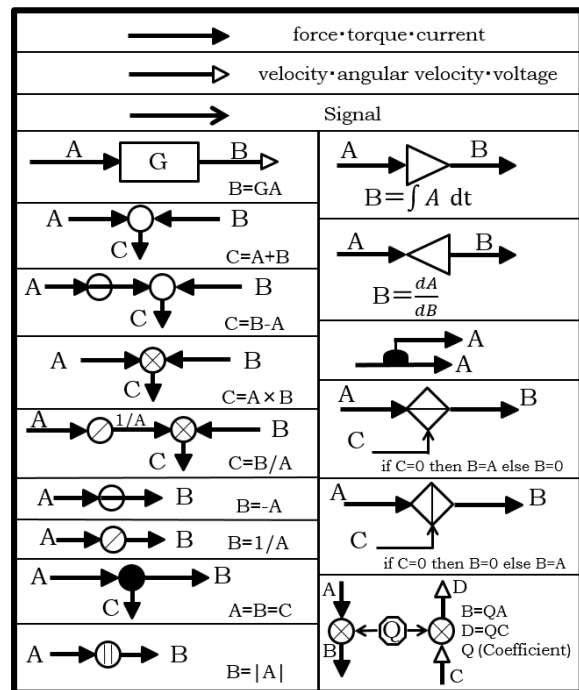


Fig.1 Main symbols for functional model

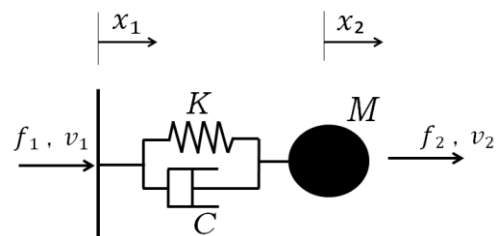


Fig.2 Single degree of freedom system

$$\begin{cases} M\ddot{x}_2 + C(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K(x_2 - x_1) = f_2 \\ v_2 = \dot{x}_2 \\ v_1 = \dot{x}_1 \\ f_1 = C(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (1)$$

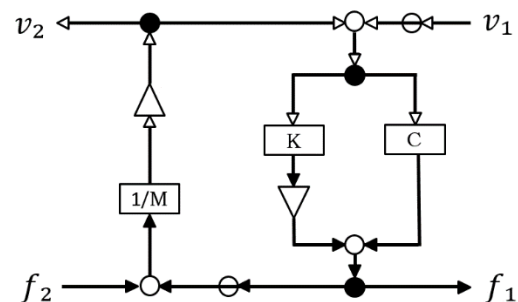


Fig.3 Single degree of freedom system by functional model

4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

4.1 実験方法とシミュレーション方法

図 7 に実験装置を示す。実験対象はマブチモータ社製の RS-540SH-6527 (2 極 3 スロットのブラシ付き直流モータ)。表 1 にモータの特性値を示す。モータと遊星歯車をアルミ製の台に固定し、カップリングを用いてロータリーエンコーダ (一周 2000 パルス) とトルクコントローラーを接続した。直流電源により電圧をモータに印加し駆動させ、ロータリーエンコーダの信号を測定装置の PXI で計測し LabVIEW を用いて処理した。

シミュレーションには、機能モデリングソフトウェアである CATEC 社の VT2000 modeler を使用した。

4.2 直流モータ単体

実機による実験値と機能モデルによる計算値を比較した。また、シミュレーションには表 2 を用いた。図 8 に角速度を示す。横軸は時間、縦軸は角速度を表す。角速度は立ち上がりを含め良く一致した。図 9 に実験値の FFT 解析のグラフを示す。横軸は周波数、縦軸は角速度振幅を表す。FFT 解析より、計算で考慮していないトルク変動が実験結果に生じていることが分かった。

4.3 トルク変動を考慮したモータの機能モデル

実機による実験値と機能モデルによるトルク変動を考慮した計算値を比較した。また、シミュレーションには表 3 を用いた。図 10(a)(b)(c)にそれぞれ負荷トルク 0 [N・m], 0.005 [N・m], 0.01 [N・m]における角速度のグラフを示す。いずれも横軸は時間、縦軸は角速度を表す。角速度は立ち上がりを含め良く一致した。また、図 10(a)(b)(c)の定常域に関して FFT 解析を行った。図 11(a)(b)にそれぞれシミュレーション値、実験値のグラフを示す。いずれも横軸は周波数、縦軸は角速度振幅を表す。FFT 解析より、実験値と計算値で角速度振幅に大幅の誤差が見られた。

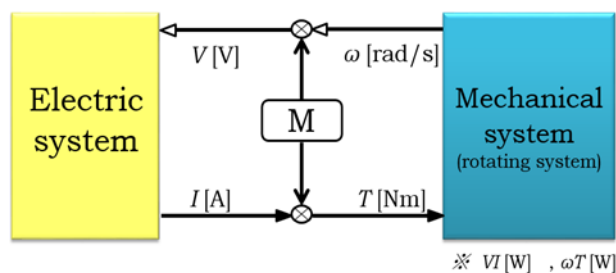


Fig.4 Conversion to mechanical system from the electrical system of the motor

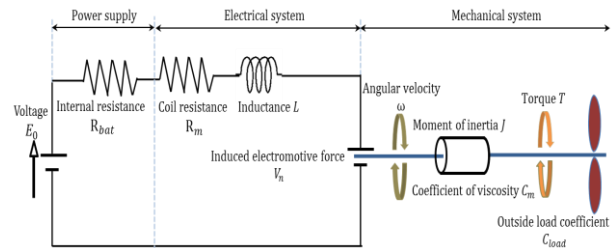


Fig.5 Analysis model of the DC motor

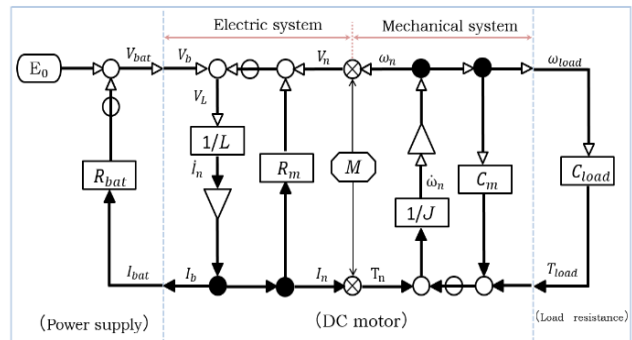


Fig.6 Function model of the DC motor

$$\begin{cases} 0 = -L \frac{dI_n}{dt} - R_m I_n - M \omega_n + V_b \\ 0 = -J \frac{d\omega_n}{dt} + M I_n - (C_m + C_{load}) \omega_n \end{cases} \quad (2)$$

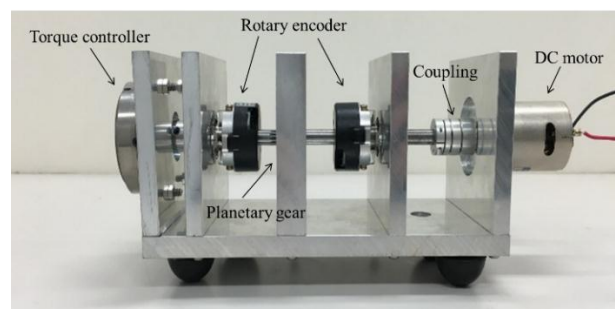


Fig.7 Experimental equipment

Table 1 Characteristic values

Symbol	Unit	Value
E_0	V	2.5
R_{bat}	Ω	0
L	H	8.97×10^{-5}
R_m	Ω	0.4
M	N・m/A	4.01×10^{-3}

Table 2 Characteristic values

Symbol	Unit	Value
J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	6.0×10^{-6}
C_m	N・m/(rad/s)	1.33×10^{-5}
C_{load}	N・m	0

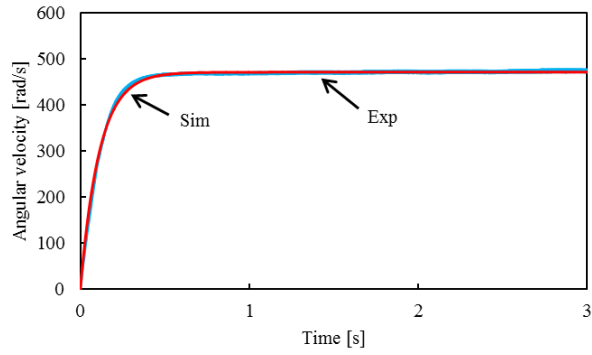


Fig.8 Angular velocity of DC motor for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves by small arrows in the figure, respectively.

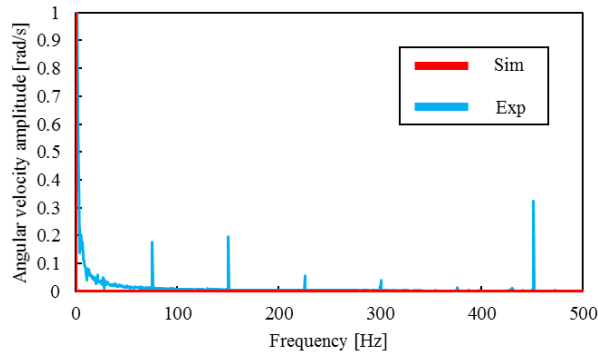
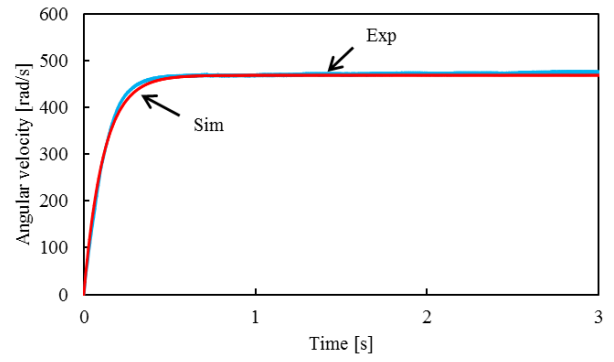


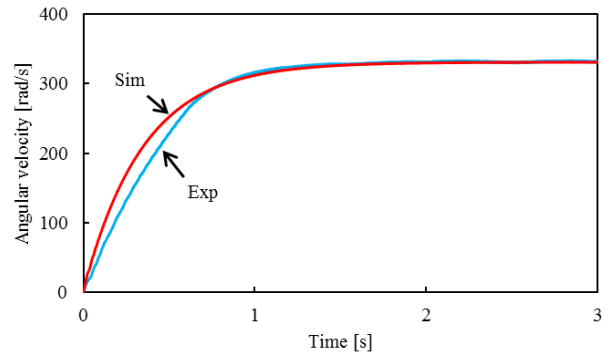
Fig.9 FFT analysis for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves in the figure, respectively.

Table 3 Characteristic values

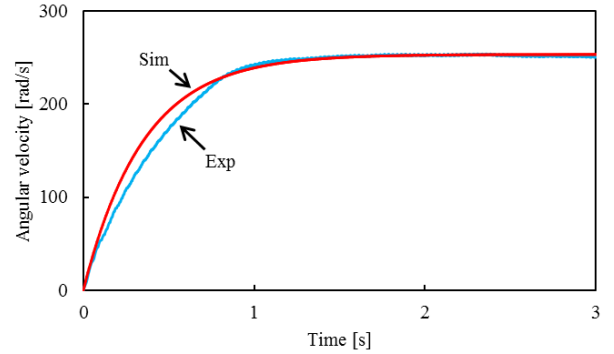
Symbol	Unit	Value
$J(\text{Load}=0 \text{ [Nm]})$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	9.3×10^{-6}
$J(\text{Load}=0.005 \text{ [Nm]})$		3.0×10^{-4}
$J(\text{Load}=0.01 \text{ [Nm]})$		3.9×10^{-4}
$C_m(\text{Load}=0 \text{ [Nm]})$	$\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad/s})$	6.1×10^{-4}
$C_m(\text{Load}=0.005 \text{ [Nm]})$		8.6×10^{-4}
$C_m(\text{Load}=0.01 \text{ [Nm]})$		1.1×10^{-3}
C_{load}	$\text{N} \cdot \text{m}$	0
		0.005
		0.01



(a) Load: 0 [N · m]

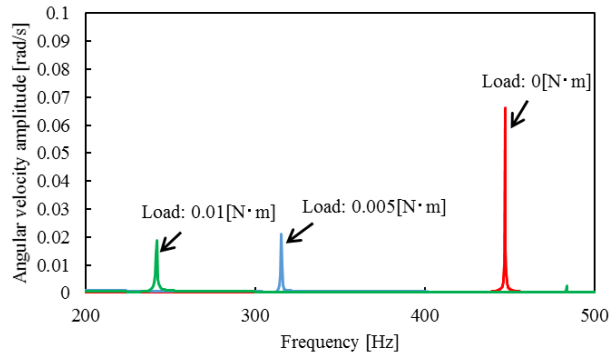


(b) Load: 0.005 [N · m]

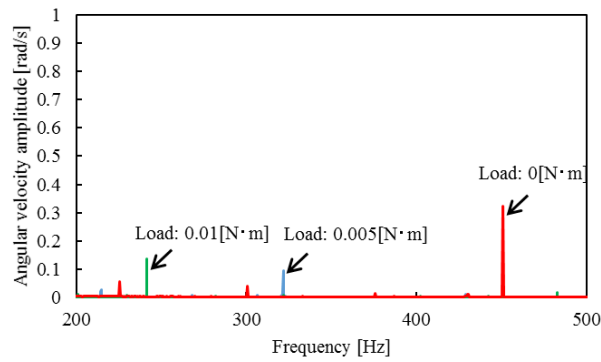


(c) Load: 0.01 [N · m]

Fig.10 Angular velocity of DC motor for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves by small arrows in the figure, respectively.



(a) Simulation



(b) Experiment

Fig.11 FFT analysis for comparing numerical simulation results with experimental results.

Table 4 Characteristic values

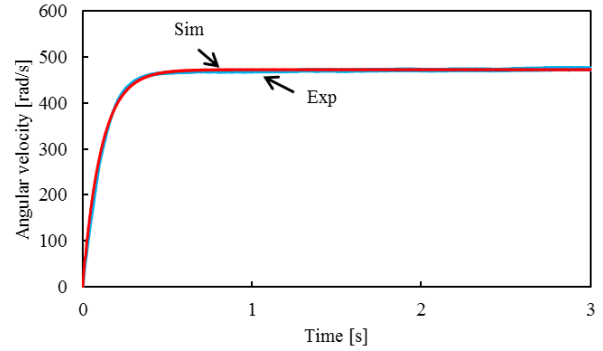
Symbol	Unit	Value
$J(\text{Load}=0 \text{ [Nm]})$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	9.3×10^{-6}
$J(\text{Load}=0.005 \text{ [Nm]})$		2.5×10^{-5}
$J(\text{Load}=0.01 \text{ [Nm]})$		2.7×10^{-5}
$C_m(\text{Load}=0 \text{ [Nm]})$	$\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad/s})$	6.0×10^{-5}
$C_m(\text{Load}=0.005 \text{ [Nm]})$		6.1×10^{-5}
$C_m(\text{Load}=0.01 \text{ [Nm]})$		6.3×10^{-5}
$PRM_{14}(\text{Load}=0 \text{ [Nm]})$		5.0×10^{-3}
$PRM_{14}(\text{Load}=0.005 \text{ [Nm]})$		5.0×10^{-3}
$PRM_{14}(\text{Load}=0.01 \text{ [Nm]})$		5.0×10^{-3}
C_{load}	$\text{N} \cdot \text{m}$	0 0.005 0.01

4.4 トルク変動を再現するモータの機能モデル

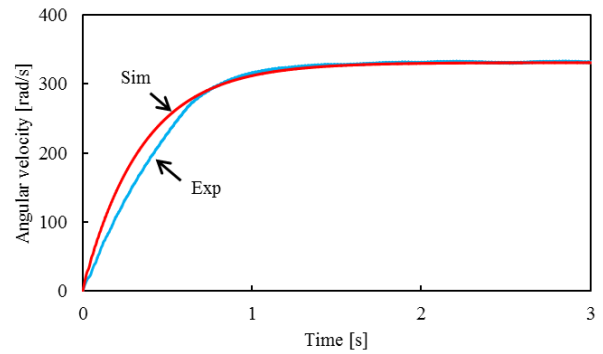
実機による実験値と機能モデルによる計算値を比較した。また、シミュレーションには表 4 を用いた。図 12(a)(b)(c) にそれぞれ負荷トルク 0 [N・m], 0.005 [N・m], 0.01 [N・m]における角速度のグラフを示す。いずれも横軸は時間、縦軸は角速度を表す。また、図 12 (a)(b)(c) の定常域に関して FFT 解析を行った。図 13 (a)(b)(c)にそれぞれ負荷トルク 0 [N・m], 0.005 [N・m], 0.01 [N・m]

における FFT 解析のグラフを示す。いずれも横軸は周波数、縦軸は角速度振幅を表す。FFT 解析より、実験値と計算値で主成分である回転 6 次の角速度振幅は良く一致した。実験で発生している回転 1~5 次成分の発生原因は定かではないが、実験装置などの幾何的要因であると推測する。

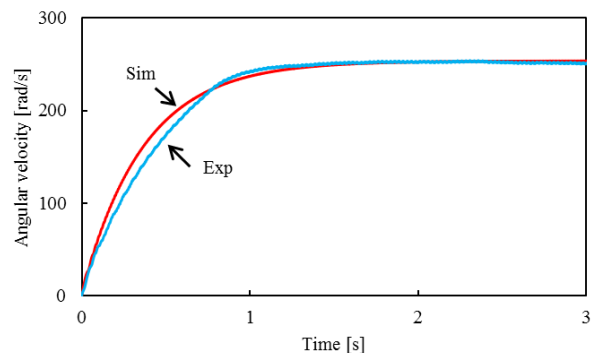
また、図 14 に角速度振幅の誤差のグラフを示す。改良前と改良後において実験値との誤差は、負荷トルク 0 [N・m]では約 18%減少、負荷トルク 0.005 [N・m]では約 12%減少、負荷トルク 0.01 [N・m]では約 8%減少した。



(a) Load: 0 [N・m]



(b) Load: 0.005 [N・m]

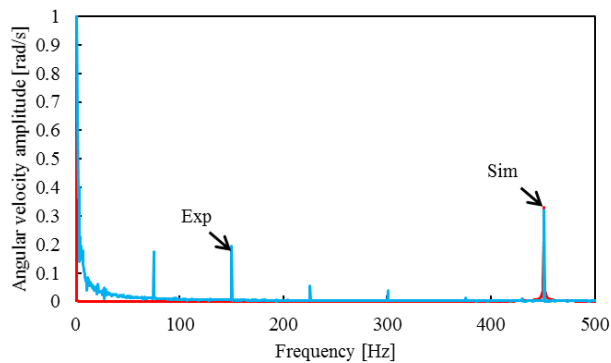


(c) Load: 0.01 [N・m]

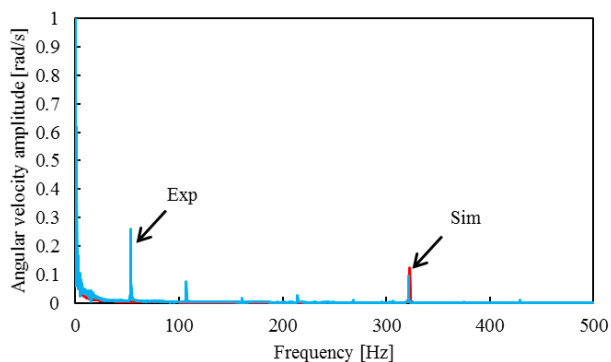
Fig.12 Angular velocity of DC motor for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves by small arrows in the figure, respectively.

5. 遊星歯車付き直流モータの機能モデル

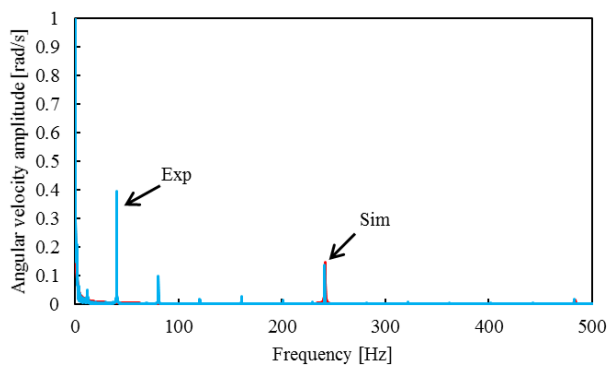
図 15 に遊星歯車の機能モデルを示す⁽⁸⁾. このモデルは、リングギア、サンギア、ピニオン、キャリアで構成されている. 本研究では、サンギアを入力、キャリアを出力、リングギアを固定とし、3.1 で作成した直流モータの機能モデルと組み合わせた.



(a) Load: 0 [N · m]



(b) Load: 0.005 [N · m]



(c) Load: 0.01 [N · m]

Fig.13 FFT analysis for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves by small arrows in the figure, respectively.

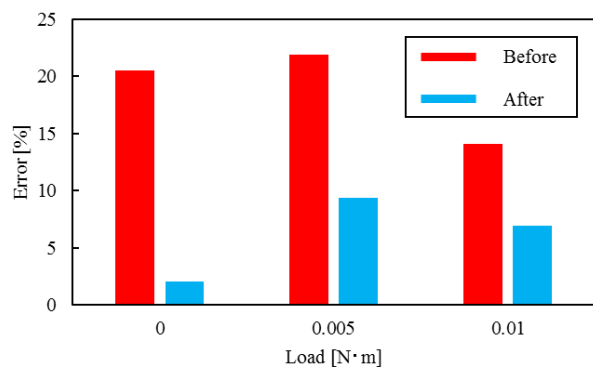


Fig.14 Error of angular velocity amplitude of numerical simulation results and experimental results for comparing the improved back with the improved front.

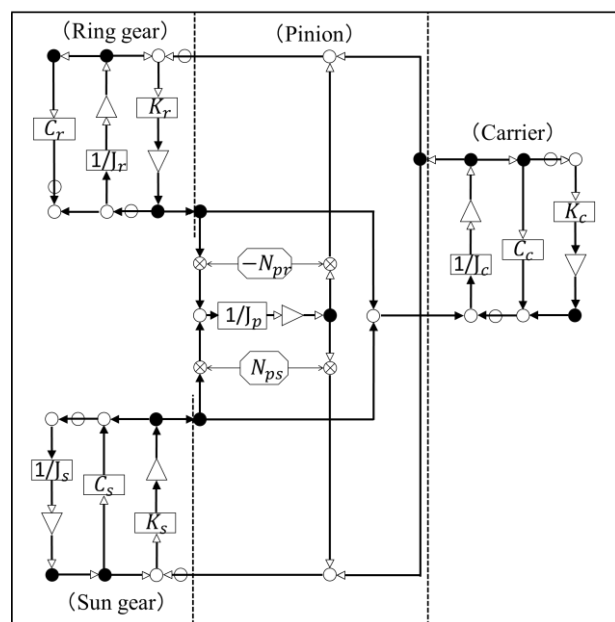


Fig.15 Functional model of a planetary gear

5.1 実験結果とシミュレーション結果の比較

実機による実験値と機能モデルによる計算値を比較した. また, シミュレーションには表 5 を用いた. 図 16(a)(b) に入力角速度, 出力角速度を示す. いずれも横軸は時間, 縦軸は角速度を表す. 角速度は立ち上がりを含め良く一致した. また, 図 16 (a)(b)の定常域に関して FFT 解析を行った. 図 17 (a)(b)に入力軸, 出力軸における FFT 解析のグラフを示す. いずれも横軸は周波数, 縦軸は角速度振幅を表す. 実験値において, トルク変動が大きく見られた. 直流モータのトルク変動と遊星歯車のトルク変動のどちらが大きく影響しているか検討する必要がある.

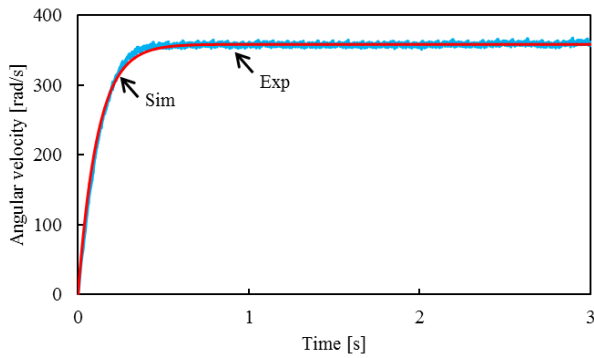
5.2 シミュレーションの例

遊星歯車付き直流モータの機能モデルを用いてパラメータを変えてシミュレーションを行った. 図 24(a)(b)に電圧を変化させたときの角速度の入出力を示す. 角速度は, 電圧上昇に伴い増加した. 図 25(a)(b)に DC モータの慣性モーメントを変化させたときの角速度の入出力を示す. DC モータの慣性モーメントを増加させたとき, 角速度の

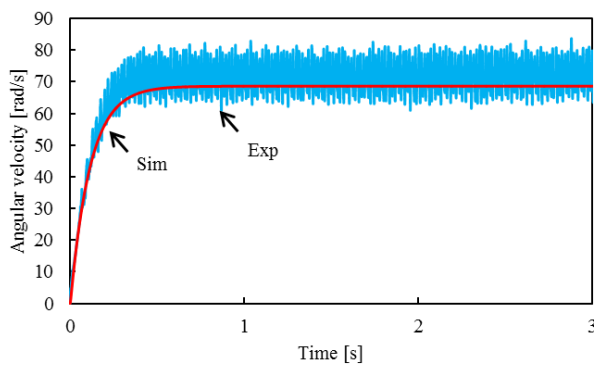
立ち上がりは遅れた． 従来の知識と一致する．

Table 5 Characteristic values

Symbol	Unit	Value
J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	6.00×10^{-6}
J_s		2.00×10^{-6}
J_p		3.00×10^{-6}
J_c		1.00×10^{-6}
J_r		0
C_m	$\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad/s})$	7.00×10^{-5}
C_s		3.10×10^{-5}
C_c		1.00×10^{-5}
C_r		1.00×10^{-5}
K_s	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$	1.00×10^5
K_c		1.00×10^5
K_r		1.00×10^5
N_{ps}		1.5
N_{pr}		0.375

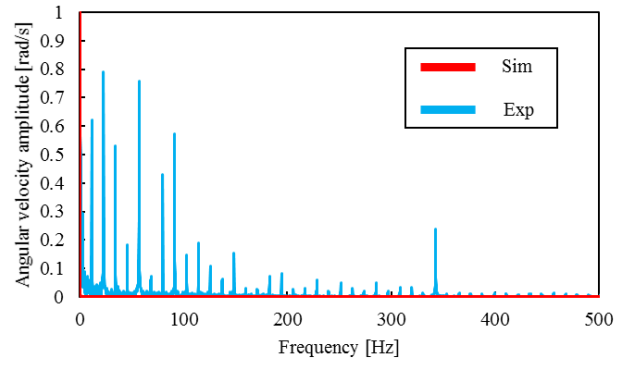


(a) Input axis

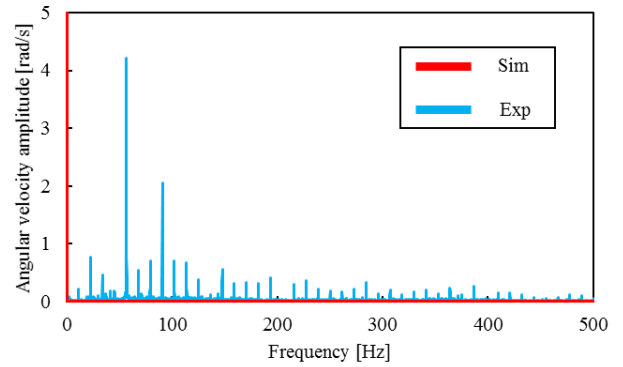


(b) Output axis

Fig.16 Angular velocity of DC motor with planetary gear for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves by small arrows in the figure, respectively.

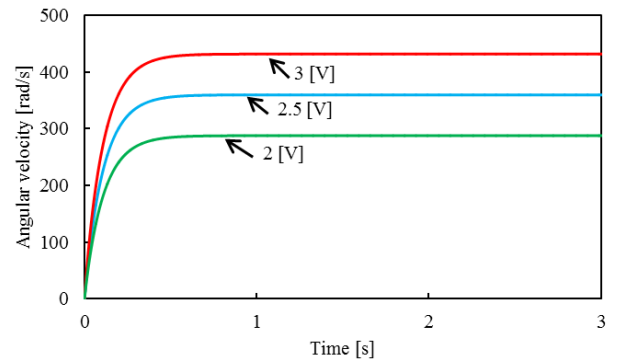


(a) Input axis



(b) Output axis

Fig.17 FFT analysis for comparing numerical simulation results with experimental results. The numerical simulation results and experimental results are solid (red) (blue) curves by small arrows in the figure, respectively.



(a) Input axis

6. 結言

本研究は、直流モータと遊星歯車の結合系を対象に、電気と機械の分野を超えた統合モデル化を行い、電力を入力、動力を出力とするシミュレーションに成功した。機能モデルを使用することにより、微分方程式と表裏の関係にある拡張性あるモデルを作成できた。実験を行い、計算結果と比較することにより有益な知見が得られた。要約すると以下の通りになる。

- 1 機械システムの基幹部品である直流モータと近年多用されている遊星歯車の結合系を機能モデルによりモデル化した。
- 2 開発モデルの有効性を検証するために、実機による実験と比較した。
- 3 直流モータ単体のモデルでは、角速度は立ち上がりを含め良く一致したが、実験でモータのトルク変動を確認した。
- 4 トルク変動を考慮したモータのモデルでは、角速度は立ち上がりを含め良く一致した。トルク変動は表現できたが変動振幅に誤差が見られた。
- 5 トルク変動を再現するモータのモデルでは角速度、変動振幅ともに良く一致した。
- 6 遊星歯車付き直流モータのモデルでは、角速度の入出力ともに良く一致した。しかし、実験値のFFT解析より過度なトルク変動が見られた。

謝辞

本論文は筆者が法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

指導教員の御法川学教授をはじめ、専任講師の相原建人先生、兼任講師の岩原光男先生、技術教育職員の内野泰伸先生、岡本民夫先生には、終始懇切丁寧にご指導頂いた。ここに深謝の意を表する。また、CATEC（株）の角田鎮男博士をはじめとする関係者の皆様には理論・実験の助言を頂き心から感謝申し上げる。

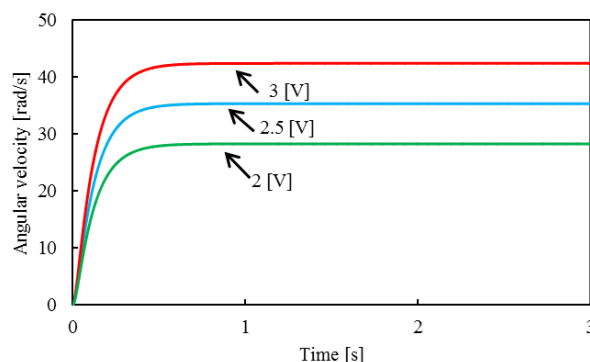
最後に、本専攻伝達機構・機械振動研究室の各位には日頃より有益なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 長松 昭男, 角田 鎮男, 長松 昌男: 製品開発のための新しいモデル化手法, 展開と統合日本機械学会論文集, C編 64(627), 4216-4223, 1998
- 2) 長松 昌男, 長松 昭男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第1報 物理学的基础, シミュレーション 32(1), 48-54, 2013
- 3) 長松 昌男, 長松 昭男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第2報 力学と電磁気学問の新しい相似則の提案, シミュレーション 32(2), 136-143, 2013
- 4) 長松 昌男, 長松 昭男, 角田 鎮男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第3報 モデルベース開発のためのモデル化(講座), シミュレーション 32(3), 221-232, 2013
- 5) 長松 昌男, 長松 昭男, 角田 鎮男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第4報 物理機能線図の応用例(講座) シミュレーション 32(4), 349-359, 2013
- 6) 長松 昭男, 長松 昌男: 複合領域シミュレーションのための電気・機械系の力学, コロナ社, 2013
- 7) 赤津 観: モータ技術のすべてがわかる本, ナツメ社, 2012
- 8) 平松 繁喜, 角田 鎮男, 長松 昌男, 長松 昭男: 回転運

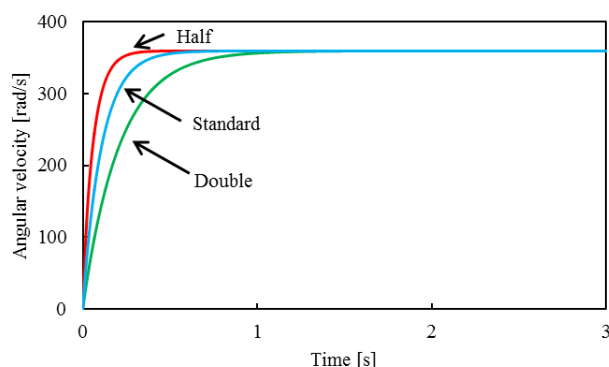
動機器の機能表現のためのモデル化 日本機械学会論文集, C編 65(638), 3926-3933, 1999

- 9) 大富 浩一: 1DCAEによるものづくり 第1部 1DCAE総論, 47-54, 2014

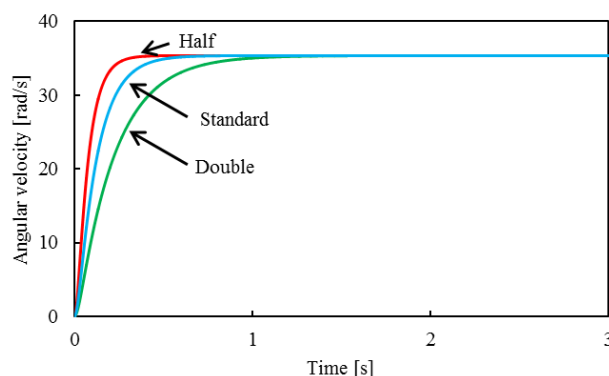


(b) Output axis

Fig.18 Simulation results of angular velocity in the case where input voltage is parameter.



(a) Input axis



(b) Output axis

Fig.19 Simulation results of angular velocity in the case where moment of inertia of DC motor is parameter.