T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	電動モータとCVT を組み合わせた駆動系のモデリングと最適駆動法に関する研究
Title	Modeling and optimum driving of Motor-CVT drive system
著者	林林, 遠藤玄, 福島E.文彦
Author	Lin LIN, Gen ENDO, Edwardo F. FUKUSHIMA
掲載誌/書名	, 2A2-D03, ,
Journal/Book name	, 2A2-D03, ,
発行日 / Issue date	2013, 5
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

電動モータと CVT を組み合わせた駆動系のモデリングと最適駆動法に関する研究

Modeling and optimum driving of Motor-CVT drive system

○ 林　林 (東工大)　正　遠藤　玄(東工大)　正　福島 E. 文彦(東工大)
Lin LIN, Tokyo Tech., lin.l.aa@.m.titech.ac.jp
Gen ENDO, Tokyo Tech., gendo@mes.titech.ac.jp
Edwardo F. FUKUSHIMA, Tokyo Tech.,fukusima@mes.titech.ac.jp

A combined electrical motor and Continuously Variable Transmission (CVT) drive system has a wide range of speed-torque characteristic, so that changing the motor's operating speed and CVT's speed ratio according to the load, it is possible to increase the overall efficiency of such a drive system. In this paper we modeled the drive system and performed experiments to derive a method for optimum operation of the drive system.

***Key Words*:** CVT, Optimum operation, crawler robot

1.　緒言

現在大多数のロボットは固定比減速機を搭載したモータによって駆動されているが、負荷の変動に対してモータが常に効率の最適な領域で稼働することは不可能である。一方、無段変速機(Continuously Variable Transmission)を電動モータと組み合わせることにより、広い運動領域をカバーでき、ロボット駆動系の効率向上が期待できる。本論文では、CVT を含めた駆動系のモデリングを行い、実験で CVT の減速比を調整することによる効率改善の効果を検証した。

2.　駆動系のモデリング

本研究ではクローラロボット HELIOS-VI[1][2]に搭載された駆動系を対象にし、モータ部と、伝達駆動部（ギヤヘッド、タイミングベルト、CVT、遊星減速機）に分けて解析する。CVT 部のモデル化と解析手法については、例えば岡村ら[3][4]による研究が知られているが、本研究では簡単のため CVT も含めた伝達駆動部を図 1 のようにモデル化する。

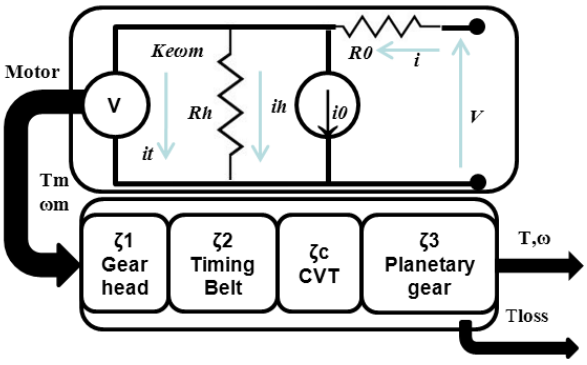

Fig.1 Model of the drive system in HELIOS-VI

モータ部のモデル化においては、印加電圧V, 入力電流i、無負荷電流i_0、損巻線抵抗R_0、損失を表す抵抗R_h、逆起電力定数K_e、起電力定数K_t、回転速度ω_mと出力トルクT_mから、モータ部の効率η_mを下式で計算する。

$$\eta_m = \frac{T_m\omega_m}{Vi}, V = iR_0 + K_e\omega_m \ ,$$

$$i = i_0 + i_t + \frac{K_e\omega_m}{R_h}, T_m = K_t i_t \qquad (1)$$

一方、伝達駆動部では出力回転速度をω、出力負荷トルクを T とし、全損失を出力軸に対しての損失トルクT_{loss}としてモデル化する。これらの関係は

$$T_m = K\zeta_c^{-1}(T + T_{loss}),\ K = \zeta_1^{-1}\zeta_2^{-1}\zeta_3^{-1} \qquad (2)$$

と表せるので、伝達駆動部の効率η_tは次式で求まる。

$$\eta_t = \frac{T\omega}{T_m\omega_m} = \frac{T}{T + T_{loss}} \qquad (3)$$

本研究では、ロボットの負荷状況T, ωに応じて全体効率$\eta = \eta_m\eta_t$を最大化するために、ω_mとζ_c^{-1}を調整する方法論を導出する。

3.　実験結果

3.1 損失トルクT_{loss}

損失トルクT_{loss}は入力回転速度ω_m、CVT 減速比ζ_c、そして負荷トルクT三つのパラメータによって変化する。その三つのパラメータと損失トルクの変化の関係を調べた。

Table.1 reduction ratio

ζ_1	4.33	ζ_2	1.93	ζ_3	9

この実験は、入力回転速度ω_mを 10.5[rad/s]から 576.0[rad/s]を 13 段階、負荷トルク T を 0 から 17.6[Nm]まで 5 段階、CVT 減速比の逆数ζ_c^{-1}を 0.0942 から 0.4748 まで 9 段階に変化するように行った。その結果は以下に述べる。

まず、負荷トルク T を 4.4[Nm]にする場合に、入力回転速度ω_mに関する変化は図 2 にまとまる。

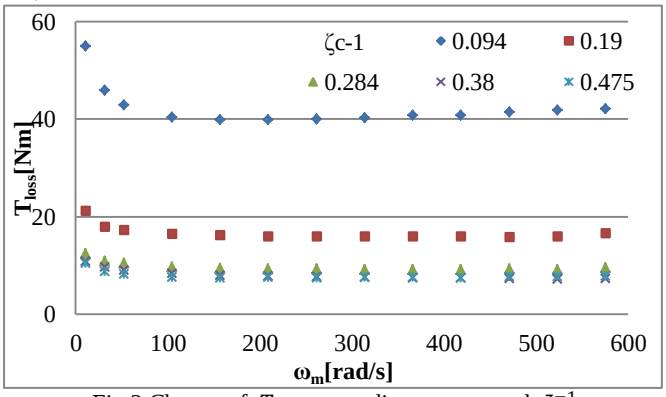

Fig.2 Change of T_{loss} according to ω_m and ζ_c^{-1}

図 2 によって、ω_mは 0～100[rad/s]の間ではω_m大きくなるほど損失トルクT_{loss}は小さくなるが、ω_mは 100[rad/s]以上では、ω_m大きくなるほど損失トルクT_{loss}は少し大きくなる。そのため

にT_{loss}変化は$(a/\omega_m + b\omega_m)$と強い関係を持つと推定できる。

また、負荷トルク T を 4.4[Nm]にする場合に、CVT 減速比ζ_cを調整することで、損失トルクT_{loss}の変化は図 3 に示す。損失トルクT_{loss}はζ_c^{-1}を変化させた場合に対して、減少することがわかった。

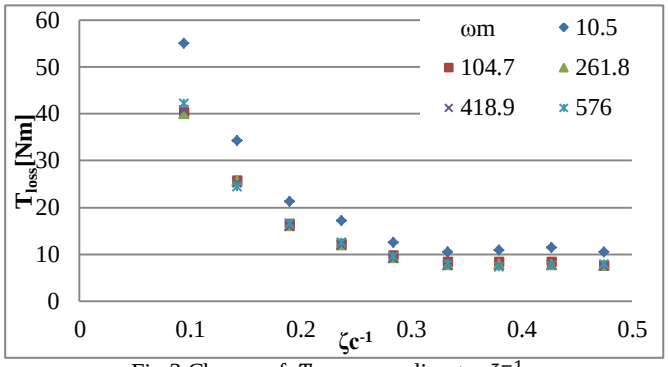

Fig.3 Change of T_{loss} according to ζ_c^{-1}

最後に入力回転速度ω_mを一定値にする場合に、図.4 に示すようにT_{loss}と負荷トルクTの関係は二次関数に近似することができる。

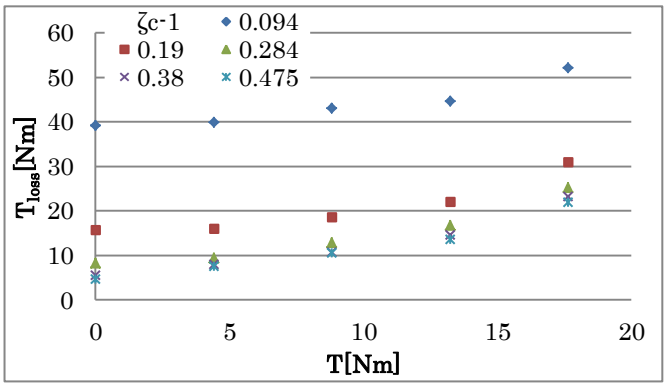

Fig4 Change of T_{loss} according to T

以上の変化傾向を基づき、さまざまな実験条件・データをまとめ、損失トルクT_{loss}のフィッティングを行い、T_{loss}と入力回転速度ω_m、CVT 減速比ζ_c、そして負荷トルクTとの関係を式(4)で表す。

$$T_{loss} = A\left(\zeta_c^{-1} + \frac{a_1}{\zeta_c^{-1}} + b_1(T^2 + a_2 T + b_2)\right)(\omega_m^{-1} + a_3\omega_m + b_3)$$

$$A = 92.6004, a_1 = 0.2296,\ \ b_1 = 0.0020$$
$$a_2 = 4.0122, b_2 = -354.4670, a_3 = 0.0001, b_3 = 0.2560 \qquad (4)$$

3.2 効率実験

式(4)と CVT 減速比の調整による最適駆動法の有効性を検証するために、効率実験を行った。8.8[Nm]と 17.6[Nm]の負荷を車輪にかけ、それぞれ出力速度を維持するように、モータの回転速度と CVT の減速比を調整した。

シミュレーションに使う各パラメータの値は 1 に示す。

Table 1 Parameters

無負荷電流i_0	0.137[A]
巻線抵抗R_0	0.317[Ω]
損失抵抗R_h	57.8[Ω]
逆起電力定数K_e	0.0302[v/rad]
出力回転ω	0.5[rad]

実験結果と式(1)(3)(4)を用い、負荷トルク T と回転速度ω_mと CVT 減速比ζ_cから推定した全体効率は図 5 に示す。

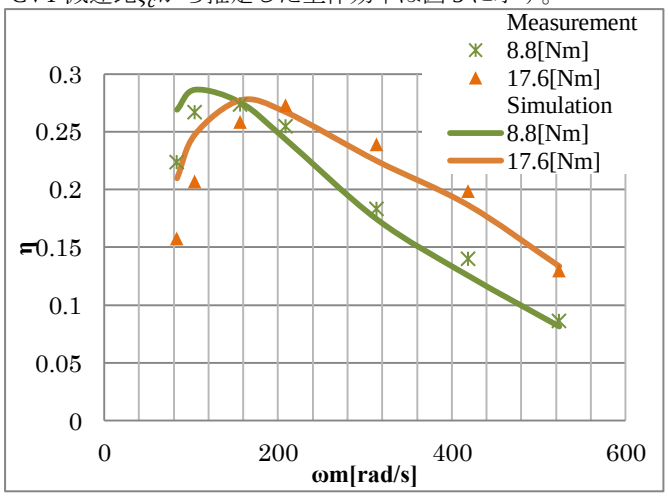

Fig.5 efficiency test

実験データにより、負荷トルク 8.8[Nm]の場合に、モータ回転速度 160[rad/s]の付近に最高効率 27%以上を達成した。一方、負荷トルク 17.6[Nm]の場合に、CVT の減速比を調整し、モータ回転速度 200[rad/s]の付近に最高効率 27%で駆動できた。負荷トルクが 8.8[Nm]の時に最高効率で運動する際に、負荷トルクが 17.6[Nm]に変化すると、CVT の減速比を調整する場合と調整しない場合に比べ、およそ 4%の効率改善を確認でき、CVT の調整することによる最適駆動の可能性を示した。

また、図 7 により、シミュレーション結果は計測値に良く近似できることがわかった。特に高回転速度の領域において、近似性が高い。そのために、このモデリングを用い、負荷トルクに対する効率の変化を推定でき、最適駆動を行える。

4. 結論

本論文では CVT を搭載した HELIOS-VI の駆動系のモデリングを行った。また、CVT の減速比を調整することにより、駆動系の効率の最適化が可能であることを検証した。

また HELIOS-VI にトルクセンサを搭載しないので、実際の走行中の最適化に必要な負荷トルクの情報を間接的に獲得する手法を検討する必要がある。今後に CVT のすべり特性を用い、トルクセンサなしでの負荷トルクの推測可能性の確認を行い、走行中でも負荷トルクの推定実験と最適なモータ回転速度と CVT 減速比を調整する実験を予定している。

文　献

[1] Edwardo F. Fukushima, Hideichi Nakamoto, Riichiro Damoto and Shigeo Hirose, “Optimal Load-Sensitive Control for Mobile Robots Equipped with Continuously Variable Transmissions,” IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 476-481, Nov. 2001.

[2] S. Hirose, E. Fukushima, R. Damoto, and H. Nakamoto, “Design of terrain adaptive versatile crawler vehicle HELIOS-VI,” IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1540-1545, Nov. 2001.

[3] 岡村　貴句男，知元　洋平，松岡　敬，平山　朋子，" 3K 形トラクションドライブ CVT のストール特性に関する研究（(機械要素,潤滑,工作,生産管理など)", 機論 C 編，vol.73-728 ，pp. 1574-1581, 2007.

[4] 中尾　圭一，田中　住和，松岡　敬，坂口　一彦，岡村　貴句男，" リング-コーン式 3K 形 CVT における動力伝達", 機論 C 編, vol.74-714 , pp. 328-335, 2006.