

ロータリエンコーダのみを用いた 移動ロボット組込みモータの逆起電力係数推定手法

渡辺 敦志 (筑波大学)、 大矢 晃久 (筑波大学)

Estimation of Back-EMF Constant for Mobile Robot Embedded Motors by Only Using a Rotary Encoder

Atsushi WATANABE (Univ. of Tsukuba), Akihisa OHYA (Univ. of Tsukuba)

Abstract— In motor control systems for mobile robots, an accurate back-EMF constant is necessary to achieve high transient response performance and accuracy by using feed-forward control. This paper proposes a back-EMF estimation method for mobile robot embedded motors by only using a rotary encoder. In this method, the back-EMF constant is estimated from the difference of deceleration characteristics between opening motor terminal and applying back-EMF compensation. An experimental result of applying proposed method is also shown.

Keywords: back-emf constant estimation, parameter design, feed-forward control

1. はじめに

移動ロボットの走行系においては、予め分かっているモータの特性やロボットのパラメータに基づくフィードフォワード制御を用いて、応答性能の高い高精度な制御が可能である [1–3]。このフィードフォワード制御系は Fig. 1 にブロック図を示すように、ロボットの慣性パラメータ、摩擦特性、モータのパラメータを用いて構築され、モータに取り付けられたロータリエンコーダのみを用いて、モータのトルク・速度制御、ロボット走行制御を実現できる。この系は制御ループにフィードフォワードトルク制御を含むため、高い応答性能と精度を得るには、モータの逆起電力係数とトルク係数を精度良く与える必要がある。

移動ロボットのフィードフォワード制御パラメータの決定方法としては、走行時の目標軌跡と実際の軌跡を比較してキネマティクスパラメータを調整する手法 [4] や、外乱オブザーバや分類器を用いたオンライン摩擦係数推定手法 [5] などが提案されている。また、モータ駆動時のトルク測定により摩擦係数を求める手法や、モータの発生しているトルクと、角加速度を測定してダイナミクスパラメータを推定する手法が一般的に用いられている。一方、本稿で扱うような、ロータリエンコーダのみを用いてフィードフォワードでモータトルク制御を行うシステムでは、モータの出力トルクを直接測定できない。したがって、フィードフォワード制御系を用いた移動ロボットの、摩擦特性およびダイナミクスパラメータの推定には、高精度なモータパラメータを用いたトルク推定が必要となる。

逆起電力係数・トルク係数はモータの個体差や経年劣化、過負荷による劣化などによりばらつきがあるため、

高精度な制御のためには、個々のモータ毎にこれらを求めておく必要がある。逆起電力係数はモータが回転しているときの回転数と端子解放電圧を同時に測定すれば求め、トルク係数はモータ電流とモータの発生するトルクを同時に測定すれば求まる。モータ電流、印加電圧、回転数からオンラインで逆起電力計数などを推定する手法 [6] が報告されているが、本稿で対象とするフィードフォワード電流制御を用いた系は、モータの端子間電圧やトルクの測定機能を持たないため、ロボットに組み込まれた状態でのパラメータ推定が困難であった。

本稿では、移動ロボットの高精度なフィードフォワードモータ制御の実現を目的として、ロボットに組み込まれたモータの逆起電力係数を、ロータリエンコーダのみを用いて推定する手法を提案し、その効果を実験により確認した結果を示す。提案する手法は、モータに逆起電力補償を適用したときの特性と、実際にモータ端子を解放したときの特性から、モータに接続されたギヤなどの摩擦や慣性モーメントの影響を除去して、逆起電力係数を推定する。

2. エンコーダのみを用いたモータ逆起電力係数の推定

Fig. 1 に、フィードフォワードの逆起電力補償、摩擦補償、ダイナミクス補償を組み込んだ移動ロボットのモータ制御系 [2] の、簡易的なブロック図を示す。モータの電流制御器では、ロータリエンコーダで測定したモータ回転数に逆起電力係数を乗じた電圧と、目標トルクにトルク係数とモータ内部抵抗を乗じた電圧の和を取り、これを PWM によりモータに印加することで、フィードフォワードの電流制御を実現する。Fig. 1 中の変数や定数を以下に示す。

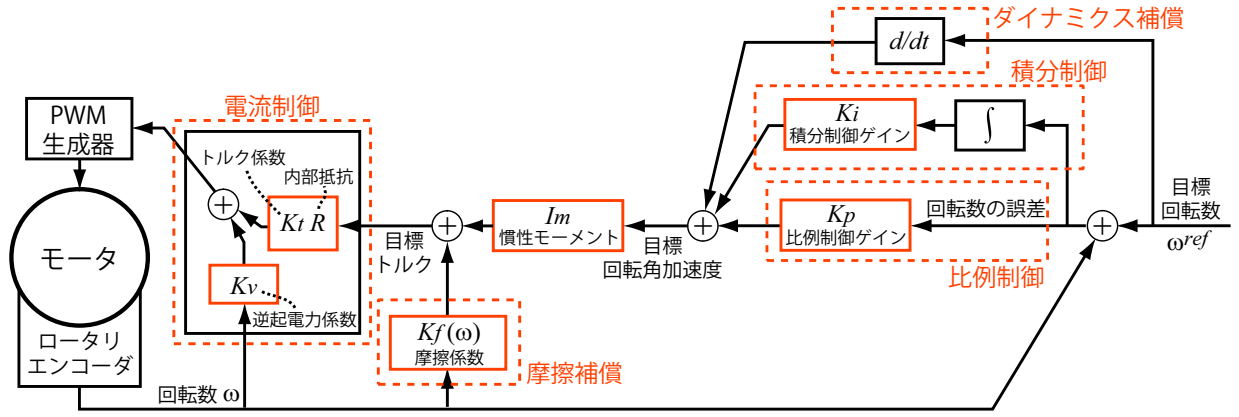


Fig. 1 Block diagram of the motor control structure for the wheeled mobile robot system.

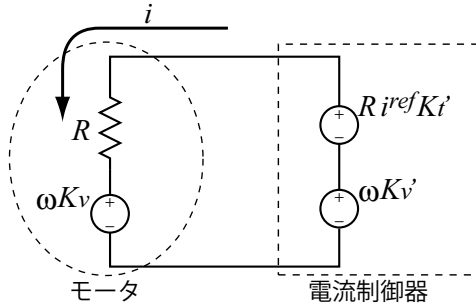


Fig. 2 Equivalent circuit of the motor and feed-forward current controller.

- I_m モータ軸から見た慣性モーメント
- K_i 積分制御ゲイン
- K_p 比例制御ゲイン
- i^{ref} 目標モータ電流
- i モータ電流
- ω モータ角速度

モータの等価回路とフィードフォワード電流制御器の等価回路を Fig. 2 に示す。モータの逆起電力係数が真値と一致していると、 $i^{ref} = 0$ のとき $i = 0$ となり、モータ端子解放時と同じ挙動を示す。一方、逆起電力係数 K'_v が真値 K_v と異なると、 $i^{ref} = 0$ のときにも、式 (1) で表されるモータ電流 i が流れる。

$$\frac{\left(\frac{\omega}{K_v} - \frac{\omega}{K'_v}\right)}{R} = i \quad (1)$$

ここで、同一の角速度における、モータ端子解放時と逆起電力補償時の、角加速度の差を α とおく。モータに接続されたギヤなどの摩擦特性が、時間に依存しないモータ角速度の式で表せる場合には、角速度が同一であれば、摩擦トルクも同一になるため、 α は摩擦の影響を受けない。 $K_v = 1/K_t$ より、モータ電流 i は式 (2) で表せる。

$$i = \frac{I_m \alpha}{K_t} = I_m \alpha K_v \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) より、真値と異なるモータの逆起電力係数 K'_v を与えて逆起電力補償を適用した場合の角加減速度とモータ端子解放時の角加減速度の差 α を測定することで、真の逆起電力係数 K_v は、式 (3) で表せる。

$$K_v = \frac{K'_v}{\frac{I_m}{\omega} R \alpha K_v'^2 + 1} \quad (3)$$

モータに接続されたギヤなどの慣性モーメント I_m の正確な測定は難しいため、未知数とする。そこで、異なる逆起電力係数 K'_{v1}, K'_{v2} を用いて、同様に α_1, α_2 を測定すると、式 (4) より、未知数 $I_m R$ が式 (5) で求まる。

$$K_v = \frac{K'_{v1}}{\frac{I_m}{\omega} R \alpha_1 K_v'^2 + 1} = \frac{K'_{v2}}{\frac{I_m}{\omega} R \alpha_2 K_v'^2 + 1} \quad (4)$$

$$I_m R = \frac{K'_{v2} - K'_{v1}}{\omega K'_{v1} K'_{v2} (\alpha_2 K'_{v2} - \alpha_1 K'_{v1})} \quad (5)$$

したがって、式 (5) と式 (3) より、真の逆起電力係数 K_v は、式 (6) で計算できる。

$$K_v = \frac{K'_{v1} K'_{v2} (\alpha_2 K'_{v2} - \alpha_1 K'_{v1})}{\alpha_2 K_v'^2 - \alpha_1 K_v'^2} \quad (6)$$

また、トルク係数 K_t は、 $K_t = 1/K_v$ で得られる。

実際のシステムへ適用する際には測定値にノイズが含まれるため推定値に誤差が発生したり、 K'_{v1} と K'_{v2} がともに真値から離れている場合には、真値に近い値が得られないため、推定値が収束するまで繰り返し同様の計算をするとよい。

3. 適用実験

提案した逆起電力係数推定手法の効果を確かめるため、筆者らの研究グループで用いている移動ロボット“山彦 LR-1”、および“Beego”に組み込まれている、左右それぞれの車輪に接続された2種類、4台のモータに本手法を適用した。それぞれのモータの仕様を Table 1 に示す。“山彦 LR-1”のモータは、既に廃盤となっており

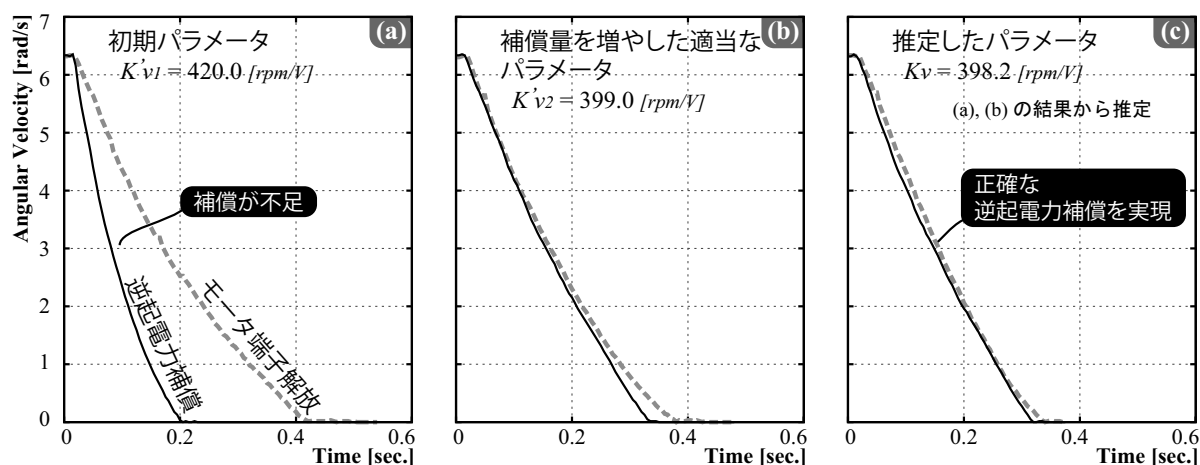


Fig. 3 Decelerate response of motor 1 of “YAMABICO LR-1” in the proposed parameter estimation procedure.

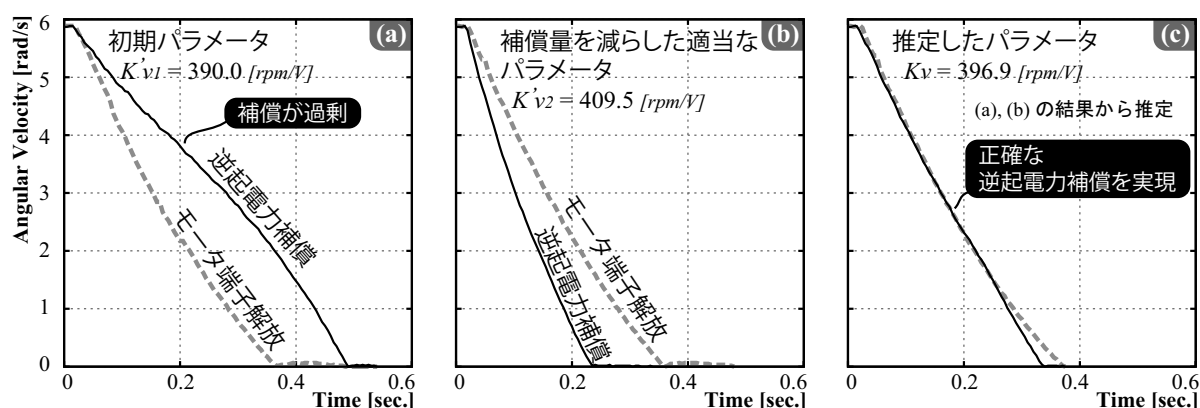


Fig. 4 Decelerate response of motor 2 of “YAMABICO LR-1” in the proposed parameter estimation procedure.

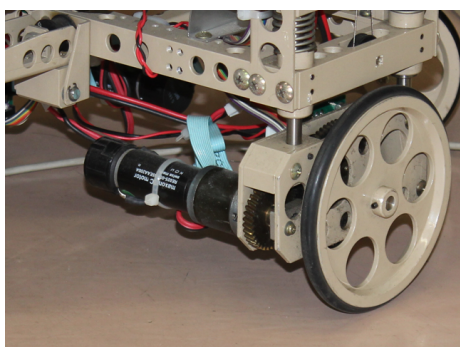


Fig. 5 Maxon RE025-055-35EBA201A embedded in the mobile robot “YAMABICO LR-1”.

す。(a), (b) の回転数の減衰特性から、提案した手法により推定した逆起電力係数 $K_v = 397.4, 397.9$ を与えた場合の回転数の減衰特性を Fig. 3(c), Fig. 4(c) に示す。提案手法によって推定された係数を用いると、モータ端子解放時と逆起電力補償時のモータ回転数の減衰特性が概ね一致することが確認できた。

同様に、移動ロボット “Beego” の左右輪それぞれのモータに、提案手法を適用した際の回転数の減衰特性を Fig. 6, Fig. 7 に示す。ギヤ比が高く摩擦や駆動時の振動が大きいため、Fig. 6(a) と Fig. 6(b) の特性から求め

正確なパラメータのカタログスペック値は不明である。なお、逆起電力係数の推定はロボットを持ち上げて車輪が地面に接していない状態で行った。

“山彦 LR-1” の左右輪それぞれのモータに、初期パラメータとして逆起電力係数 $K'_{v1} = 430.0, 390.0$ [rpm/V] を与えて逆起電力補償した場合と、モータ端子解放時の回転数の減衰特性を Fig. 3(a), Fig. 4(a) に示す。この結果から、逆起電力補償が過不足を判断して、誤差を減らす方向に適当な値を加えた、 $K'_{v2} = 397.1, 398.3$ を与えた場合の回転数の減衰特性を Fig. 3(b), Fig. 4(b) に示

Table 1 Specification of the Motors for Experiments

山彦 LR-1	
品番	Maxon RE025-055-35EBA201A
逆起電力係数	不明
ギヤ比	39 倍
Beego	
品番	Maxon RE-max 24
逆起電力係数	635 [rpm/V]
ギヤ比	54 倍

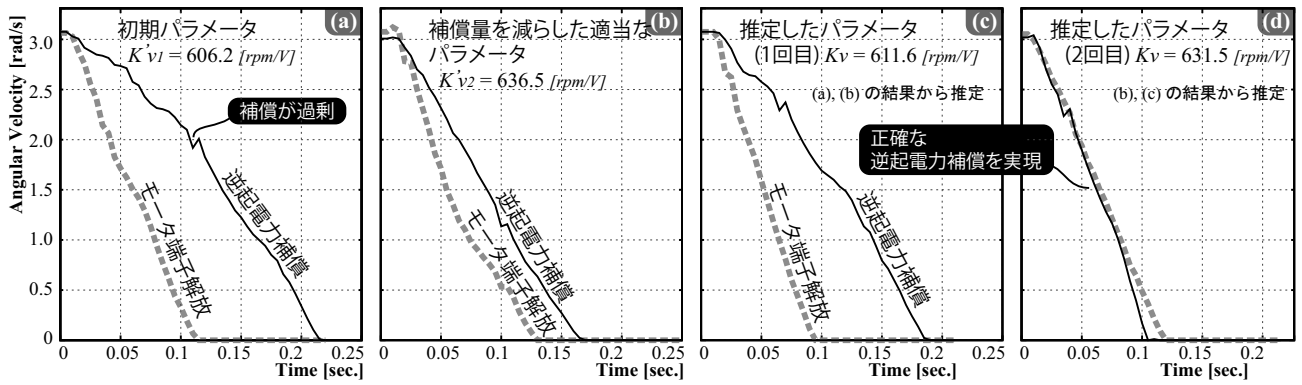


Fig. 6 Decelerate response of motor 1 of “Beego” in the proposed parameter estimation procedure.

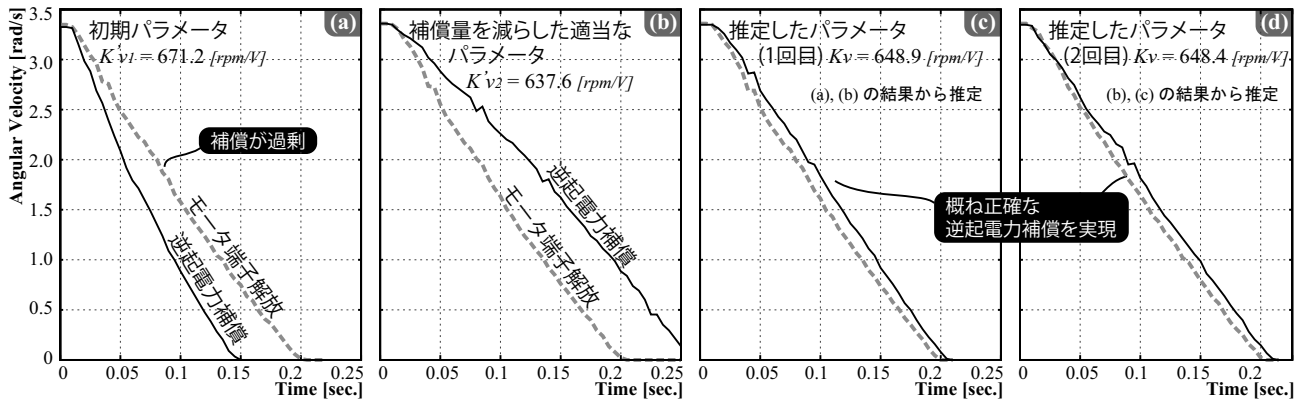


Fig. 7 Decelerate response of motor 2 of “Beego” in the proposed parameter estimation procedure.

た逆起電力係数 (Fig. 6(c)) には誤差が生じたものの、再び提案手法を適用し Fig. 6(b) と Fig. 6(c) から推定を行うことで、Fig. 6(d) に示すように、モータ回転数の減衰特性が概ね一致することが確認できた。最終的に推定された逆起電力係数 $K_v = 631.5, 648.4$ は、カタログスペック値 $635[rpm/V]$ に近い値となった。

これらの実験結果から、提案手法により有効に逆起電力係数を推定できることが確認できた。なお、初期値を大きく変えて提案手法を適用した場合にも、提案手法を数回繰り返し適用することで、同様の結果が得られることを確認している。

4. おわりに

本稿では、移動ロボット制御系で用いられるフィードフォワード制御に必要なモータの逆起電力係数を、ロータリエンコーダの情報のみを用いて推定する手法を提案した。提案手法は、モータに逆起電力補償を適用して、モータ端子を解放した状態をエミュレートしたときの特性と、モータ端子を解放したときの特性から計算により、モータの逆起電力係数を推定できる。

また本稿では、提案した逆起電力係数推定手法を、移動ロボットに組み込まれた 2 種類、4 台のモータに適用した結果を述べた。実験結果から、提案した逆起電力係

数推定手法を用いて、ロボットに組み込まれたモータのパラメータを高精度に求められることが確認できた。これにより、フィードフォワード制御系を用いた移動ロボットの、高精度なトルク制御およびトルク推定が可能になると考えられる。

今後の課題として、他のモータへの適用、推定結果の妥当性の詳細な評価が残されている。

参考文献

- [1] 飯田, 油田: “DC モータのソフトウェアサーボ系におけるフィードフォワード電流制御”, 電気学会論文誌 D, 産業応用部門誌, vol. 109, no. 4, pp. 289–296, 1989.
- [2] S. Iida and S. Yuta: “Control of vehicle with power wheeled steering using feedforward dynamics compensation”, Proc. of 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON), pp. 2264–2269, vol. 3, 1991.
- [3] S. Iida and S. Yuta: “Vehicle command system and trajectory control for autonomous mobile robots”, Proc. of 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 212–217, vol. 1, 1991.
- [4] J. Borenstein and L. Feng: “Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots”, Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 12, no. 6, pp. 869–880, 1996.
- [5] T. Watanabe and S. Katsura: “On-line recognition of driving road condition using support vector machine”, Industrial Technology (ICIT), 2011 IEEE International Conference on, pp. 405–410, 2011.
- [6] H. Takahashi, T. Kenjo and H. Takeuchi: “A real-time estimation method of brushless dc servomotor parameters”, Power Conversion Conference 1997., Proceedings of the, vol. 2, pp. 673–678, 1997.