The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	フィードフォワード・フィードバック制御の併用による機敏でロバストな移動ロボットの開発
Author(s)	鳥山, 裕人
Citation	令和元（2019）年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書. 2020
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/75994
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式６

申請先学部　工学部　採択番号　No.　8

２０１９年度大阪大学未来基金【住野勇財団】学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書

ふりがな 氏名	とりやま　ひろと 鳥山　裕人	学部 学科	工学部 応用理工学科	学年	２年
ふりがな 共同 研究者氏名	すぎもと　ゆうみん 杉本　裕明	学部 学科	基礎工学部 システム科学科	学年	３年
	おかだ　ゆみか 岡田　柚実香		工学部 応用理工学科		２年
					年
アドバイザー教員 氏名	石川　将人	所属	工学研究科 機械工学専攻		
研究課題名	フィードフォワード・フィードバック制御の併用による 機敏でロバストな移動ロボットの開発				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。（先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。）				

1. 研究目的

PID 制御を代表とするロボットのフィードバック制御は、センサによりロボットの現在の状態を測定し、その測定値に基づいて制御入力を修正することよって、未知の外乱の影響を抑制することができる。しかし、フィードバック制御のみでは、位置・速度に応じて最適なパラメータが異なることや、パラメータによっては目標値を行き過ぎたり目標値付近を振動するように動いてしまったりするため、安定性やスピードに限界がある。そこで、理想環境における出力をあらかじめ制定するフィードフォワード制御にフィードバック制御を付加した移動ロボットの安定性・効率が高い追従制御モデルの研究をしたいと考えた。

2. 設計・理論

2-1. 機構

移動ロボットには駆動輪としてウレタンゴム製のホイールを用いた図１のような独立４輪ステアリングを採用した。また、４辺それぞれの中心に位置取り用のオムニホイールを取り付けており、計８つのホイールにエンコーダを設置している。さらに駆動輪の舵角を測定するために４つのポテンショメータを設置している。フレームには主にアルミ角管を用いている。

しかし、研究期間を考慮して、今回は舵角を固定し、１次元のみ動くようにして研究を行なった。

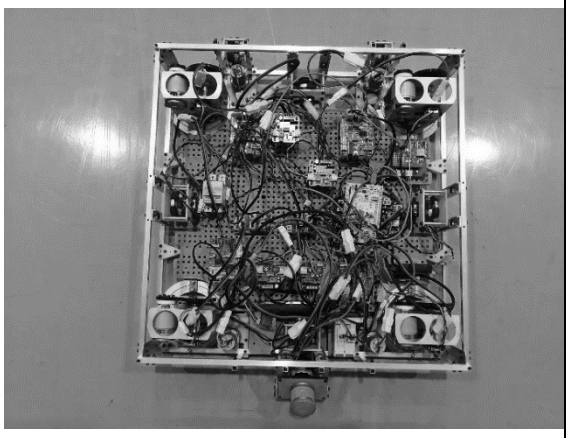

図１．機体の外観

2-2. 回路

STM32F767ZI NUCLEO マイコンボード用いてメインの軌道演算及びモータの出力計算、そしてロータリーエンコーダ,ポテンショメータの読み取りを行うメイン基板を作成した。また、STM32F303K8T6 及び ATMEGA328-P マイコンを用いてモータ 1 機毎の制御を行うモータドライバ基板を作成した。モータドライバ基板はメイン基板から CAN 通信を用いてモータの出力値を受け取り、その値に応じてモータの出力を変更する。

2-3. 制御

2-3-1. モータのモデル化

フィードフォワード制御をするにあたってモータをモデル化する必要がある。

まず、DC モータの回転原理を考える。得られるトルク T、回転半径 R、コイル巻き数 N、磁束密度 B、磁路幅 L、電流 iとすると、電磁力についての式より、

$$T = 2RF = 2RNBLi$$

R, N, B, Lはモータ固有の定数であるため、$2RNBL$を定数 K_Tとおくと、

$$T = K_T i \tag{1}$$

と表すことができる。

次に、DC モータの回路特性を考える。電源電圧 V、電機子抵抗 R、モータの逆起電力 V_c、コイルのインダクタンス L、電流 iとすると、

$$V = Ri + V_C + L\frac{di}{dt}$$

モータの逆起電力 V_C はファラデーの電磁誘導の法則からモータの回転速度ωに比例するためその比例定数を K_E とし、また、電流の時間変化は小さく無視できるものとして第三項を無視すると、

$$V = iR + K_E\omega \tag{2}$$

という式が導かれる。

最後に、モータの力学特性を考える。得られるトルク T、慣性モーメント I、粘性摩擦係数 K_D、回転速度ωとすると、運動方程式は以下の式で表される。

$$T = I\dot{\omega} + K_D\omega + K_F sgn(\omega) \tag{3}$$

(1)(2)(3)の 3 式から、トルク Tと電流 iを消去すると、

$$V = \frac{RI}{K_T}\dot{\omega} + \left(K_E + \frac{RK_D}{K_T}\right)\omega + \frac{RK_B}{K_T}sgn(\omega)$$

ωについての各係数をそれぞれ J, B, C と置きなおすと、

$$V = J\dot{\omega} + B\omega + C\mathrm{sgn}(\omega)$$

この式から、J, B, Cが定数で既知の状態である場合、モータの回転速度・加速度を与えればその際かけるべき電源電圧が一意に求まるため、この式を用いることでフィードフォワード制御が可能であると予想した。

2-3-2. フィードフォワード制御に必要な係数の導出

次に、J, B, Cをステップ応答によるモータの回転数を計測することによって求める。J, B, Cはモータを含むユニット固有の定数であるとして考える。

$$V = \begin{cases} V_0 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

のステップ入力を与えるとすると(ただし$V_0 > 0$)、式(4)は、

$$V_0 = J\dot{\omega} + B\omega + C \tag{5}$$

となり、これをωについて解くと、

$$\omega(t) = \frac{V_0 - C}{B}\left(1 - e^{-\frac{B}{J}t}\right)$$

さらに、モータの回転数を$\theta(t)$とすると、$\omega(t)$を t について積分することで、

$$\theta(t) = \frac{V_0 - C}{B}\left(t - \frac{J}{B} + \frac{J}{B}e^{-\frac{B}{J}t}\right) \tag{6}$$

と導かれる。tを十分大きくしたとき、$e^{-\frac{B}{J}t} \cong 0$となり、式(6)の漸近線は以下の直線となる。

$$\theta(t) = \frac{V_0 - C}{B}\left(t - \frac{J}{B}\right) \tag{7}$$

よって、あるモータにステップ入力を与えたときの経過時間を横軸、そのときのモータの回転数を縦軸にとったとき、その漸近線の傾きを a, 切片を bとすると、

$$\begin{cases} a = \dfrac{V_0 - C}{B} \\ b = \dfrac{J(V_0 - C)}{B^2} \end{cases} \tag{8}$$

異なるV_0においても J, B, Cの値が一定と仮定すると、最低 2 種類以上のステップ入力を行えば、3 つ以上の J, B, C の関係式が得られ、その式から J, B, Cを求めることができる。

2-3-3. フィードバック制御

今回は、フィードフォワードモデルから出力された値に補正する形で、フィードバック制御の一つである pid 制御を付与した。V_+を pid による補正値[V]、tを周期[s]、kp, ki, kdを任意の定数、pを目標の位置と実際の位置の差[m]、p_{pre}を一周期前の目標の位置と実際の位置の差[m] と おき、以下の通りに補正項を追加した。

$$V_+ = kp \cdot p + ki \cdot \frac{p + p_{pre}}{2}t + kd \cdot \frac{p - p_{pre}}{t} \tag{9}$$

3. 実験方法・実験結果

まず、機体が十分に直線運動できる空間を確保した上で機体を地面に接地してステップ入力を与え、経過時間とそのときの駆動輪の回転数をエンコーダを用いて測定した。そして、ステップ入力の振幅を変えてこの操作を 6 回行なった。

代表して図 2 にステップ入力の振幅 2.302[V]を与えたときの経過時間を横軸、駆動輪の回転数を縦軸にとった曲線を実線で、その曲線の漸近線を破線で示した。

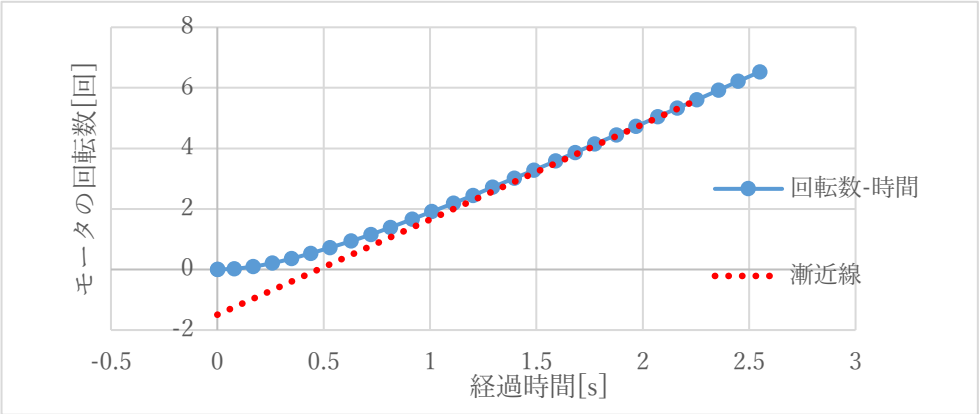

図 2. ステップ入力の振幅 2.302[V]を与えたときの経過時間のホイールの回転数の関係

ステップ入力V_0[V]を与えたときの経過時間を横軸、駆動輪の回転数を縦軸にとった曲線の漸近線の傾き a, 切片 b、そしてその値を式(8)に代入することで得られた J, B, C を表 1 に示す。ただし C の値は B の標準偏差ができるだけ小さくなるように設定した値である。

表 1. 各ステップ応答における傾き a と切片 b と係数 J, B, C

電源電圧V_0[V]	傾き a	切片 b	J	B	C
2.30	2.76	1.31	0.296	0.622	0.345
3.45	4.62	2.23	0.286	0.592	0.345
4.59	6.08	3.53	0.356	0.614	0.345
2.29	2.94	1.17	0.232	0.583	0.345
3.44	4.55	2.28	0.299	0.598	0.345
4.58	5.92	3.24	0.344	0.629	0.345

表 1 のデータを平均することによって得られた、

$$J = 0.338, \quad B = 0.678, \quad C = 0.345$$

を式(5)の係数として、フィードフォワード制御を行う。平均値と比較した B の値の誤差は 5%以内、Jの値の誤差は 30%以内に収まっており、ある程度の軌道追従は行えると予想できる。今回の場合のωは地面に接地した駆動輪の回転速度[/s]であり、Vは電源電圧[V]である。

次に上で求まったフィードフォワードモデルを用いて機体を動作させた。今回は、正転と逆転、加速と減速の動作を含む $x = 0.3\left(1 - cos\left(\frac{2\pi}{3}t\right)\right)$ $[m]$ の変位をするように、xを回転数に変換して微分して得られた回転速度と回転加速度をモデルに入力した。

フィードフォワード制御単体における、経過時間と入力した位置・実際の機体の位置の関係を図 3 に、経過時間と入力した速度・実際の機体の速度の関係を図 4 に示す。機体の位置・速度は、オムニホイールに取り付けられたエンコーダから算出した。

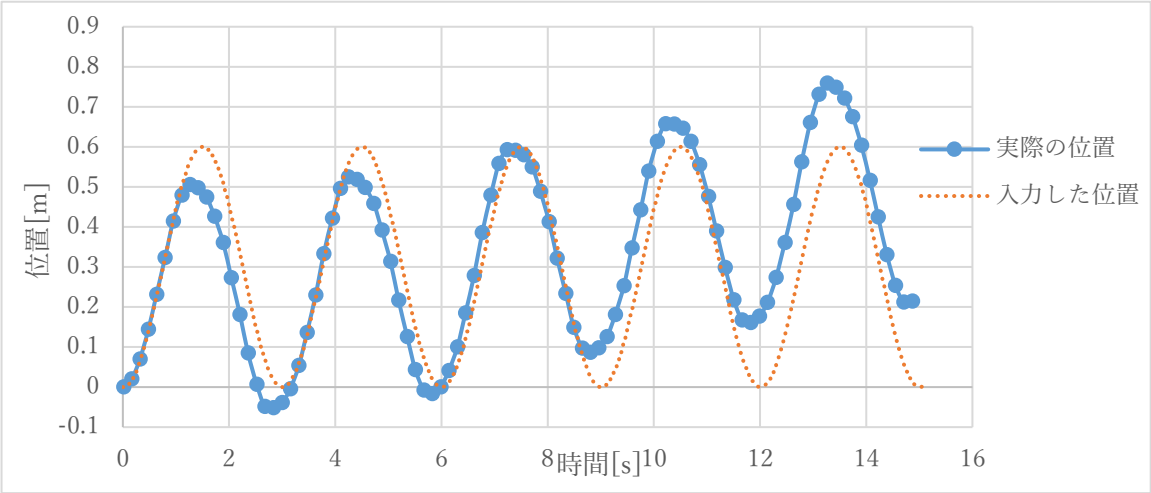

図 3.　フィードフォワード制御のみでの経過時間と位置の関係

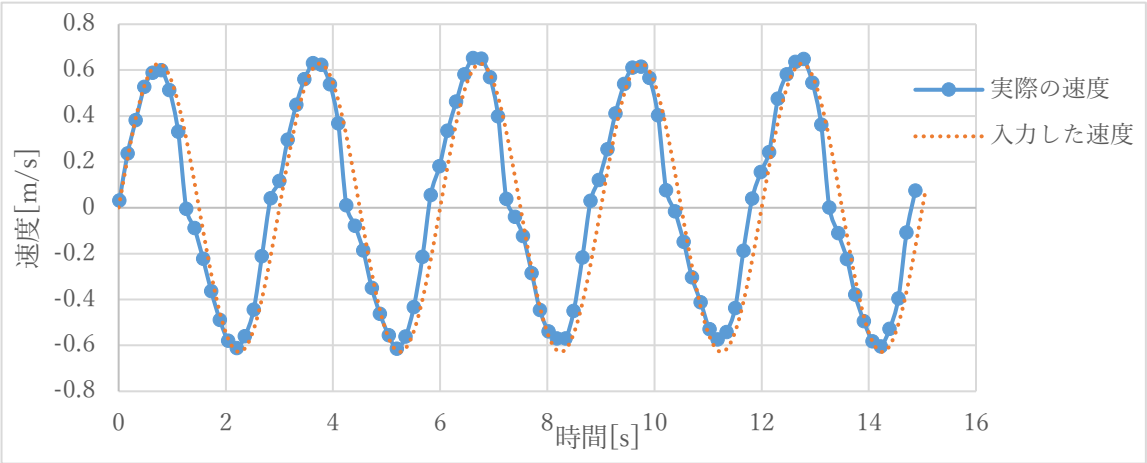

図 4.　フィードフォワード制御のみでの経過時間と速度の関係

さらに、フィードフォワードモデルから得られる電源電圧に、フィードフォワード制御の一つである pid 制御によって補正項を加えることによって、より理想に近い動きをさせることを目指した。$kp = 0.1,\ ki = 10^{-5},\ kd = 10^{-3}$としたときの経過時間と入力した位置・実際の機体の位置の関係を図５に示す。

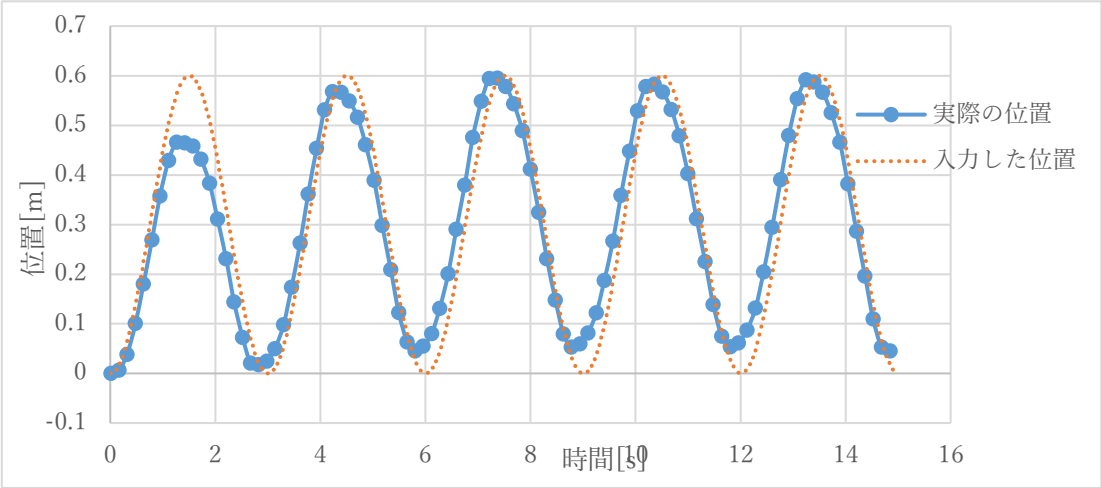

図 5.　フィードフォワード・フィードバック制御を併用したときの経過時間と位置の関係

4. 考察

まずフィードフォワード制御のみでの軌道追従を考察する。図 3 のグラフから、入力した位置から徐々にずれが生じてはいるものの、軌道の外形は似通った形になっていることが見て取れる。現に、速度においては入力した値とほぼ一致していることが図 4 からわかる。速度と比べて変位のずれが大きい主要な理由として、式(4)のからわかるように、フィードフォワードモデルに入力する値が速度と加速度のみであり、変位を直接入力していないことが挙げられる。

次にフィードフォワード・フィードバック制御を併用したときの軌道追従を考察する。フィードフォワード制御のみで行なったときの課題である変位のずれを pid 制御で変位に基づいて補正をかけることによって、数 cm 程度のずれまで抑えることができた。

5. 結論

今回の研究で、フィードフォワード・フィードバック併用制御モデルを作成し、1 次元における安定性の高い軌道追従をさせることができた。今後これを 2 次元に拡大することで 4 輪ステアリングの軌道追従モデルの完成を目標にこれからも研究を続けたい。

6. 参考文献

[1]　中田克之, コントロールモータハンドブック, 日刊工業新聞社, 2008
[2]　松尾孝美, 直流モータのモデリングと制御　閲覧日 2019/8/20
http://onsen-mula.org/wp-content/uploads/2017/05/intromech_matsuo.pdf