

汎用ガソリンエンジンの適応制御型電子ガバナシステム

Governor System for General Purpose Engine Using Adaptive Control Theory

福嶋 友樹*

Tomoki FUKUSHIMA

新 荻 義 久*

Yoshihisa SHINOBI

松田 迅人*

Hayato MATSUDA

谷口 洋一*

Yoichi TANIGUCHI

要 旨

汎用エンジンでは、一般にエンジン回転数を一定に保つことが要求されるため、ガバナ機構が装備されている。しかしながら、搭載される用途が多種多様であるうえ、運転条件によって制御対象であるエンジンの動特性が変化する。このため、従来の機械式のガバナでは、搭載される用途や運転条件ごとに、スプリングの変更やアイドル調整が必要であり、また、PID 制御による電子ガバナではゲインの調整が必要となっていた。そこで、適応機構をガバナに取り入れることで、調整の要らない適応制御型電子ガバナシステムを実現した。また、機構部に非線形ギヤ機構を採用し、スロットル全閉近傍の分解能の確保と、開閉時間の短縮という相反する要素の両立を実現した。その結果、制御システムを複雑にすることなく、アイドル領域でのエンジン回転の安定性と、エンジン負荷の急激な変動に対するレスポンスを確保できた。

ABSTRACT

General purpose engines are required to keep the engine speed constant, and are therefore equipped with governor mechanisms. However, the engines are applied to various applications, and the dynamic characteristics of the controlled engine changes according to different operating conditions. So it is necessary for a conventional mechanical governor to change the spring rate and tune the idle speed; similarly, gains must be tuned in electronic governors using PID control. To enhance robustness, an adaptive control system that uses a self-tuning regulator has been constructed. Applying elliptical gears to the mechanism for driving the throttle valve, it was possible to realize both high resolution near the closed position and a reduction in operating time of the throttle valve.

1. まえがき

自動車やオートバイでは、人がスピードメータや五感で予測をおこないスロットル(アクセル)を制御している。それに対し、小型単気筒エンジンに代表される汎用エンジンを搭載した商品(発電機、芝刈り機、耕運機、除雪機、水ポンプなど)では、人の反応速度では対応不能なエンジン負荷の急激な変動や、無人運転などの観点から、キャブレタのスロットル開度を自動的に調整し、エンジン回転数を一定に保とうとする機構が導入されている。その多くは、Fig. 1に示すようなジェームス・ワットの遠心ガバナ機構⁽¹⁾を応用した機械式のフィードバック制御を採用している。この機構はエンジンの回転数変化を錘に働く遠心力にて検出し、リンクを介してキャブレタのスロットル開度の調整をおこなう。遠心力とガバナスプリングが釣り合ったところで、ス

ロットル開度が一定になる。しかしながら、機構的にアイドル時と負荷時では、エンジン回転数に差が生じる。

近年、安価で高性能なマイクロプロセッサの登場によって、機械的なガバナ機構の代わりに、モータでスロットルバルブの軸を駆動させ、PID 制御等によってエンジン回転数を目標値に収束させる電子式のガバナ(以下、電子ガバナ)も発電機として商品化されている。しかしながら、エンジンの使用用途が多種多様であり、温度や気圧に代表される使用環境が変化し、制御対象の動特性が変化する汎用エンジン用のガバナとしては、十分にロバストとはいえず、動特性の変化に合わせてそれぞれゲイン調整が必要となる。本研究では、小型単気筒エンジンの回転数制御に、制御対象の動特性の変化に対してロバストなセルフ・チューニング・レギュレータ制御^{(2),(3)}(以下、STR 制御)を応用した適応制御型電子ガバナシステムを構築した。

*朝霞東研究所

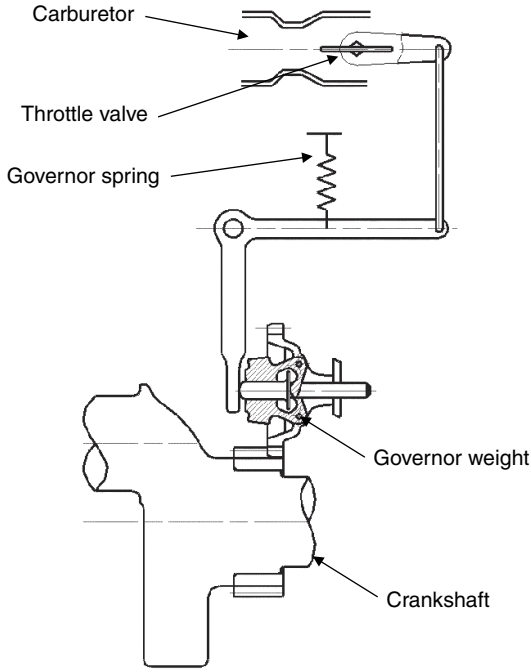


Fig. 1 Centrifugal type governor

2. STR 制御の導入

2.1. エンジンのモデリング

スロットル開度を入力とするエンジンモデルを簡略化して Fig. 2 に示す。キャブレタを用いた汎用単体エンジンを概略化して考えると、空燃比を一定とした場合、スロットル開度 θ_{th} とエンジン回転数 NE により、空気質量流量 G_a と燃料質量流量 G_f が決まる。吸入混合気の燃焼により平均有効圧力 P_{mi} が発生し、クランクの運動系を通してエンジン回転数へと変換される。汎用単体エンジンでは、このクランクの運動系に接続されるエンジン負荷特性が、エンジンの使用用途(発電機、芝刈り機、耕運機、除雪機、水ポンプなど)により大きく異なり、また同じ用途でも作業部のアタッチメントの慣性モーメントにより変化する。電子ガバナの制御をおこなうにあたり、入力をスロットル開度 θ_{th} とし、出力をエンジン回転数 NE と選び、点線で囲まれている部分を制御対象のモデルとしてひとつのブロックとして扱う。

スロットルバルブのステップ入力に対するエンジン回転数のステップ応答の一例を Fig. 3 に示す。スロットル開度

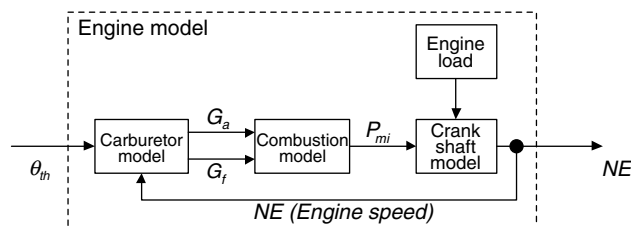


Fig. 2 Block diagram of engine model

θ_{th} を入力 u 、エンジン回転数 NE を出力 y として、最小二乗モデルである式(1)の ARX モデル⁽⁴⁾を用いて、適応制御をおこなうことを前提に、次数やむだ時間等に着目しモデリングをおこなった。

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-1}B(q^{-1})u(k) + w(k) \quad (1)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (2)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m} \quad (3)$$

$a_1 \dots a_n, b_0 \dots b_m$: モデルパラメータ

$w(k)$: 白色雑音

式(1)のモデルに対し、目標回転数を y_m とすると、出力誤差は次式ようになる。

$$e_1(k) = y_m(k) - y(k) \quad (4)$$

制御の目標は、制御対象の出力であるエンジン回転数 y が目標回転数 y_m と等しくなるように、入力であるスロットル開度 u を自動的に計算で調整することである。ここで、負荷変動が主な未知パラメータとなるが、負荷を含めたエンジンの燃焼モデルのパラメータ全体を未知パラメータとして逐次計算で求めることとなる。

2.2. コントローラの設計

Diophantine 方程式⁽⁵⁾を導入し、式(1)の入力を次式のように構成すると、出力誤差の分散を最小にすることができ、制御の目標を達成することができる。

$$u(k) = \frac{1}{b_0} \{ y_m(k+1) - \bar{\theta}^T \bar{\zeta}(k) \} \quad (5)$$

ここで、

$$\bar{\theta}^T = [b_1 \dots b_m, h_0 \dots h_{n-1}] \quad (6)$$

$$\bar{\zeta}(k) = [u(k-1) \dots u(k-m), y(k) \dots y(k-n+1)] \quad (7)$$

しかしながら、実システムにおいては、パラメータが未

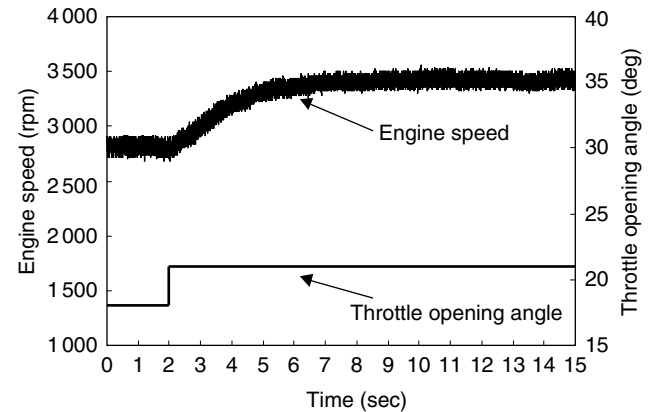


Fig. 3 Step response

知であるので、次式のパラメータ推定則を用いて逐次推定をおこなう。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) - \Pi(k-1) \zeta(k-1) \varepsilon_1(k) \quad (8)$$

$$\Pi(k) = \frac{1}{\lambda_1(k)} \Pi(k-1) - \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[\frac{\lambda_2(k) \Pi(k-1) \zeta(k-1) \zeta^T(k-1) \Pi(k-1)}{\lambda_1(k) + \lambda_2(k) \zeta^T(k-1) \Pi(k-1) \zeta(k-1)} \right] \quad (9)$$

ここで、

$$\theta^T = [b_0, \bar{\theta}^T] \quad (10)$$

$$\zeta^T(k) = [u(k), \bar{\zeta}^T(k)] \quad (11)$$

ここで、 $0 < \lambda_1(k) \leq 1$, $0 \leq \lambda_2(k) < \lambda_1(k)$, $\Pi(0) = \Pi^T(0) > 0$

未知パラメータが真値に収束すれば、式(5)で構成された入力を用いて、最小分散制御となり、これにより動特性の変化に対してロバストな汎用単体エンジン用の回転数ガバナの制御部を実現できる。

3. 機構部の特徴

今回iGX440⁽⁶⁾に搭載した本電子ガバナの機構部の概略形状を Fig. 4 に示す。

使用用途および使用環境が多様な汎用エンジンに電子ガバナを適用するにあたり、以下のことに留意した。

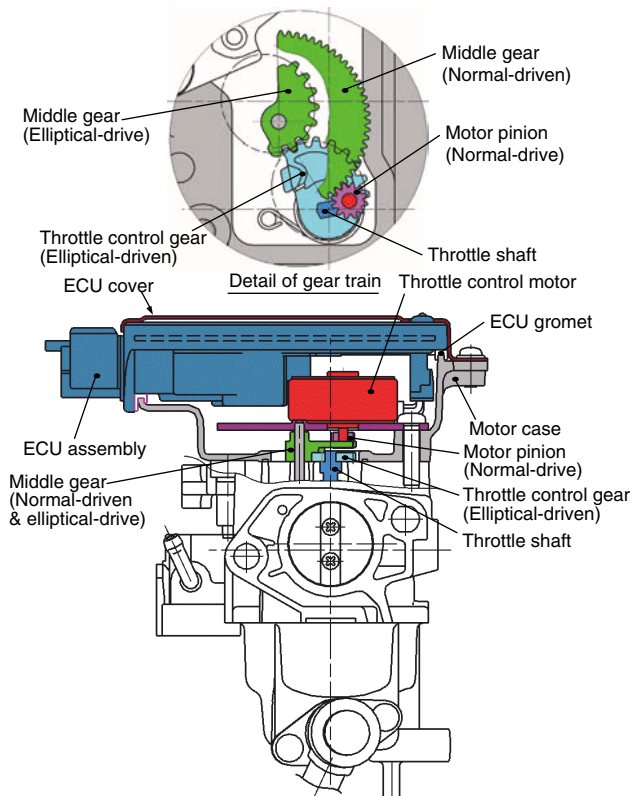


Fig. 4 Carburetor assembly

Table 1 Characteristics of actuator

	Stepping motor	DC motor	Solenoid
Control method	Open loop	Feedback	Feedback
Position control	Number of pulse	Feedback by position sensor	Feedback by position sensor
Speed control	Pulse rate	PWM control	Current control
Power supply	Constant voltage	PWM control	Current control
Life	Bearing life (long life)	Brush life (short life)	Bearing life (long life)

- ・バッテリーレスのシステムで稼動可能なこと。
- ・センサ類を最小限とし、耐久信頼性を確保すること。
- ・駆動回路が単純で、ECU をコンパクト化できること。

スロットルを駆動するアクチュエータとして、ステッピングモータ、DC モータ、ソレノイドが考えられる。Table 1 にそれぞれの特徴を示す。停止位置制御がセンサレスで可能なこと、駆動回路がシンプルにできること、長寿命であることなどから、汎用エンジンのスロットルを駆動するアクチュエータとしてステッピングモータを採用した。

しかしながら、汎用エンジンに求められるさまざまな特性からステッピングモータを単純に適用するだけでは不充分であり、以下にあげる技術手段を適用した。

- ・スロットル要求特性を満足するための非線形減速機構
- ・ECU 一体構造のためのコンパクト・レイアウト
- ・電子部品の小型化・コストミニマム化のための耐候・耐塵性の確保

以下、これらの3項目について詳細を述べる。

3.1. 非線形減速機構

バタフライ式スロットルバルブにより制御される空気質量流量 G_a とスロットル開度 θ_{th} の関係を Fig. 5 に示す。エンジン回転数によらず、 $\theta_{th} < 30\text{deg}$ の範囲では、スロットル開度に対する G_a の変化量が敏感なので、アイドル時など、低スロットル開度でのエンジン回転を安定化するためには、制御分解能を細かくする必要がある。

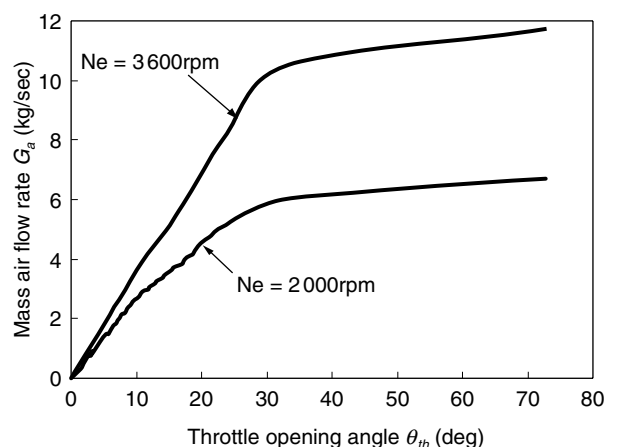


Fig. 5 Mass air flow rate

スロットルバルブを制御するアクチュエータとして、本機構では Permanent Magnet 型ステッピングモータ(以下 PM 型ステッピングモータ)を採用している。PM 型ステッピングモータの角度制御能力はロータ・マグネットとポール・ステータのピッチにより決定され、モータ本体による分解能の向上には物理的な限界がある。従って、分解能の向上は減速ギヤによってなされることが一般的である。通常のギヤで減速ギヤ列を構成する場合、低開度側での要求特性に合わせて分解能を細かくすると、ステッピングモータの特性上、スロットルの開閉スピードが低下する。

汎用エンジンでは、0%から100%負荷、または100%から0%負荷などの急激な負荷変動が与えられる。負荷変動時のエンジン回転変動の収束性を向上させるためには、スロットル開閉スピードを向上させることが必要である。

モータ動作スピードを向上させるためには、入力パルスレートを大きくすればよいが、Fig. 6に示すようにモータ発生トルクが減少し、スロットル駆動要求トルクに対する余裕度が減少し、脱調などの原因となる。逆に高開度側の要求特性に合わせて分解能を粗くすると、低開度側の分解能が不十分となり、ハンチングの原因となる。

以上の相反する要素を成立させるために、楕円ギヤ⁽⁷⁾を採用した。楕円ギヤによる連結の模式図を Fig. 7 に示す。

O_m, O_{th} をそれぞれの中心とし、長径 $2a$ 、短径 $2b$ の同一形状のギヤにおいて、その焦点をそれぞれ $F_m, F_m', F_{th}, F_{th}'$ とおく。 F_m 及び F_{th} を回転軸とし、 $|A_m F_m| = \rho_m$ 、 $|A_{th} F_{th}| = \rho_{th}$ 、回転角度を θ_m, θ_{th} とすると

$$\rho_m = \frac{r}{1 + \varepsilon \cos \theta_m} \quad (12)$$

$$\rho_{th} = \frac{r}{1 - \varepsilon \cos \theta_{th}} \quad (13)$$

$$\rho_m + \rho_{th} = 2a \quad (14)$$

ただし、 $r = \frac{b^2}{a}$ 、 $\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$

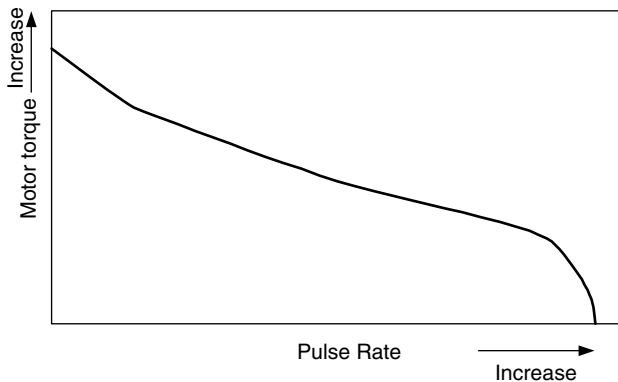


Fig. 6 Characteristics of motor torque

以上より、

$$\theta_{th} = \cos^{-1} \left\{ \frac{(1 + \varepsilon \cos \theta_m) \cdot (2a - r) - r}{[2a \cdot (1 + \varepsilon \cos \theta_m) - r] \cdot \varepsilon} \right\} \quad (15)$$

$\varepsilon = 0.25, 0.425, 0.65$ とした時の θ_m と θ_{th} の関係を Fig. 8 に示す。

楕円ギヤ O_m が微小角 $d\theta_m$ 回転すると、 θ_{th} は $d\theta_{th}$ 回転する。この時次の関係が成り立つ。

$$\rho_m \cdot d\theta_m = \rho_{th} \cdot d\theta_{th} \quad (16)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \quad \frac{d\theta_{th}}{dt} = \omega_{th} \text{ なので、式(16)を書き換えると}$$

$$\omega_{th} = \frac{\rho_m}{\rho_{th}} \omega_m \quad (17)$$

ω_m を等速で運転すると $\rho_m < \rho_{th}$ ならば、 $\omega_m > \omega_{th}$ となり、 $\rho_m > \rho_{th}$ ならば、 $\omega_m < \omega_{th}$ となることがわかる。すなわち、 O_m を駆動ギヤ、 O_{th} を被動ギヤ(スロットルドライブ)として、スロットルバルブ全閉時に Fig. 7 に示す状態でギヤをセットすれば、スロットル全閉付近では θ_m に対する θ_{th} の変化量は鈍感になり、逆にスロットル全開付近では θ_m に対する θ_{th} の

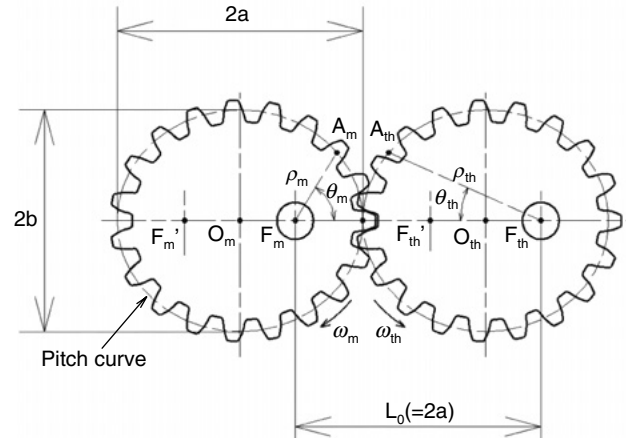


Fig. 7 Elliptical gear train

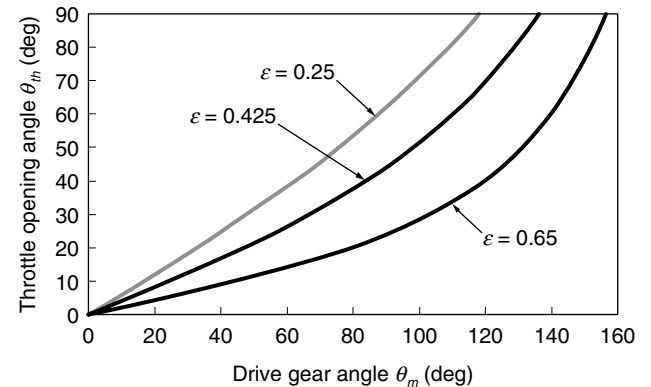


Fig. 8 Characteristics of angle with difference in elliptical gear eccentricity

変化量は敏感になる。この特性は楕円の離心率 ε により定まる。 $\varepsilon = 0.25, 0.425, 0.65$ とした時の $d\theta_{th}/d\theta_m$ の関係を Fig. 9 に示す。 ε の値を大きくすれば、低開度領域の分解能が向上することがわかる。

ε をレイアウト上許容される最大値とした時の、スロットル開度に対する分解能を算出すると、Fig. 10 となる。このような非線形分解能機構において、モータステップと空気質量流量 G_a の関係は、Fig. 11 のように線形化される。非線形な関係を機構的に補正することで、制御系での線形化処理をおこなう必要はなくなる。

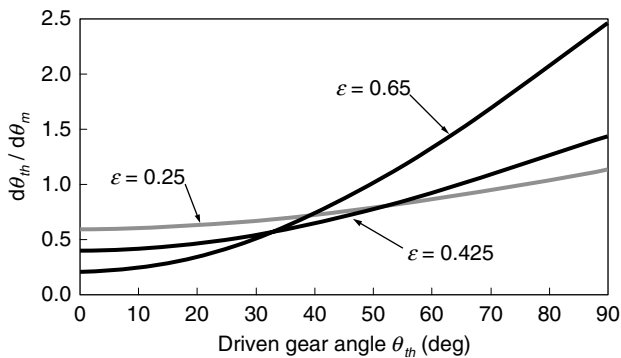


Fig. 9 Characteristics of angular velocity with difference in elliptical gear eccentricity

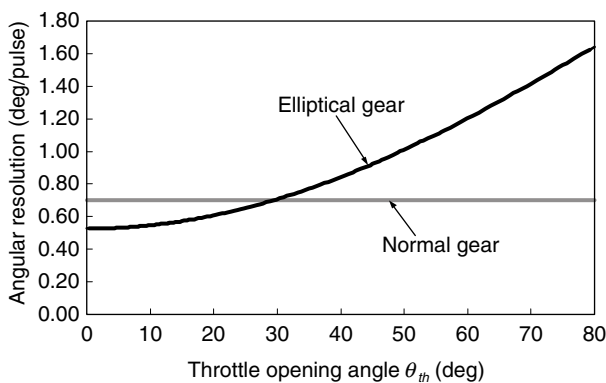


Fig. 10 Characteristics of angular resolution

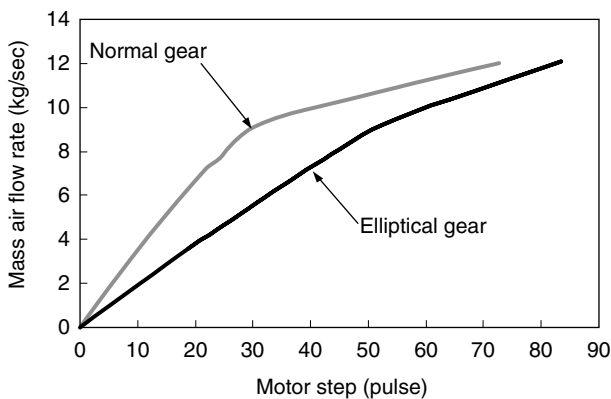


Fig. 11 Relationship between motor step and mass air flow rate (Engine speed = 3600rpm)

Fig. 10に示す分解能曲線と同等の最小分解能をもつ通常ギヤ減速とスロットル全閉から全開までの所要ステップ数の比較を Fig. 12 に示す。楕円ギヤ機構は通常ギヤ機構に対して 35%所要ステップ数を短縮できる。

楕円ギヤ機構におけるスロットル駆動要求トルクとスロットル駆動トルクとの関係を Fig. 13 に示す。スロットル駆動トルクは分解能と逆比例の関係にあるため、楕円ギヤ機構のスロットル駆動トルクは全閉領域が大きく、全開領域は小さくなる。スロットル駆動要求トルクの最大値に対して、スロットル駆動トルクをその約 1.5 倍程度となるようにした。急激な加減速時など、全開から全閉までスロットルが急激に動作する時、スロットルバルブには通常よりも大きな負圧がかかり、スロットルシャフト動作に渋りが生じる。トルク最大値が全閉時に発生する本機構ではスロットルシャフト動作の渋りタフネス向上にも寄与している。

3.2. コンパクト・レイアウト

汎用エンジンとして、ECUおよびスロットル制御機構等の電子部品を採用する上で全体寸法を大きくすることなく配置することが必要となる。キャブレタ上にギヤケースを兼ねたモータケースを配置し、その中にモータおよび減速ギヤをキャブレタのシルエット内に配置した。モータケース上ECU基板上的大型部品を集中的に配置することで、均

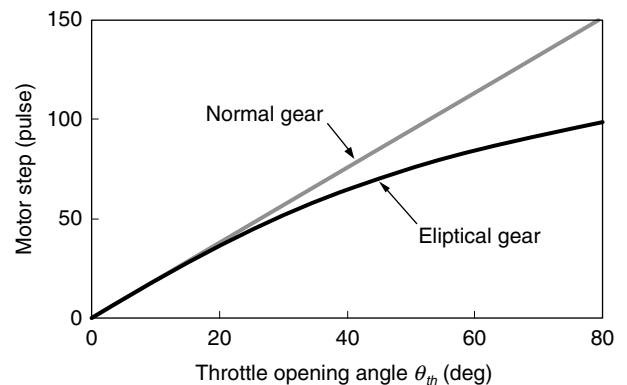


Fig. 12 Relationship between throttle opening angle and motor step

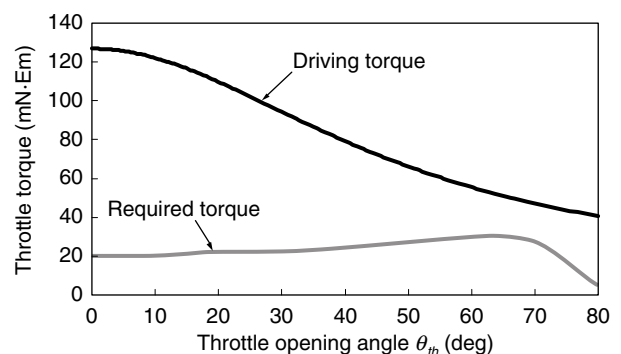


Fig. 13 Characteristics of throttle torque

一深さのケースに ECU をモールドリングする従来の製法に比べて、全体の高さを 16mm 低く抑えることができた。

また、ECUとモータをつなぐコネクタも同一のケース内に配置されるので、コネクタの小型化、配線の簡略化も可能となり、コンパクト・レイアウトに寄与している。

3.3. 耐水および耐塵性能

Fig. 4に示すように、アルミ製のモータケースとキャブレタの間はOリング、ECUとモータケースの間はグロメットによりシールし密閉空間とした。この内部に電子部品を配置することで、個々の電子部品に対する防水・耐塵機能が不要となり、部品の小型化、低コスト化も可能となった。

4. 実機搭載結果

供試エンジン GXV160 (Table 2) を搭載した芝刈り機において、従来の機械式ガバナと適応制御型電子ガバナを用いた場合のガバナ特性比較を Fig. 14 に示す。従来の機械式のガバナでは、負荷によりエンジン回転数が変化し定常偏差をもっている。それに対して、適応制御型電子ガバナを用いた場合は、負荷によらずエンジン回転数が一定となっていることがわかる。

また、供試エンジン GX160 (Table 2) を搭載した円筒型発電機に、Fig. 10で示した楕円ギヤと通常の円形ギヤを装着し、アイドルの安定性の比較をおこなった。ここで、同一の STR 制御を用い電子ガバナを構成し、電力負荷は無負荷とし、目標エンジン回転数は1400rpmとした。楕円ギヤ機構を用いた結果を Fig. 15 に、通常の円形ギヤの用いた結果を Fig. 16 に示す。楕円ギヤ機構を用いることで、通常の円形ギヤ機構を用いた場合に比べ、アイドルの安定性が向上している。

適応制御型電子ガバナシステムを採用した iGX440 を Fig. 17 に示す。本エンジンを円筒型発電機に搭載した場合の、

Table 2 Test engine specifications

Model	GX160	GXV160
Type	Air-cooled, 4-stroke, single-cylinder gasoline (OHV)	Air-cooled, 4-stroke, single-cylinder gasoline (OHV)
Displacement (cm ³)	163	163
Dimensions L × W × H (mm)	304 × 362 × 335	415 × 359 × 354
Dry weight (kg)	15	14.6
Bore × Stroke (mm)	68 × 45	68 × 45
Max. power (kW / rpm)	4.1 / 3600	4.1 / 3600

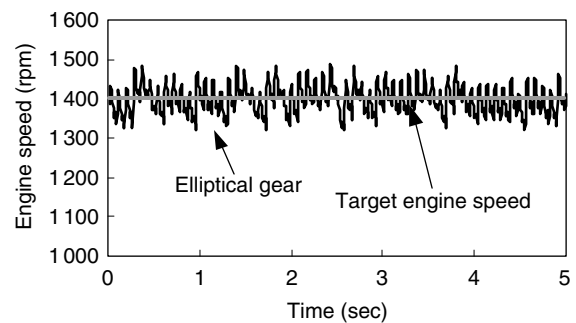


Fig. 15 Idle characteristic with elliptical gear

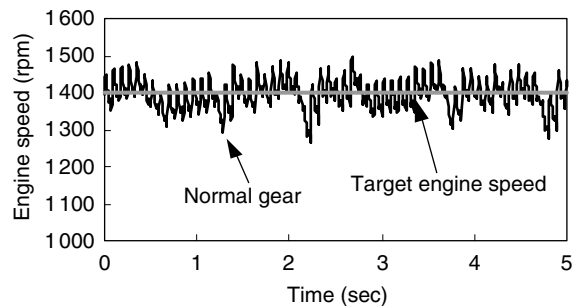


Fig. 16 Idle characteristic with normal gear

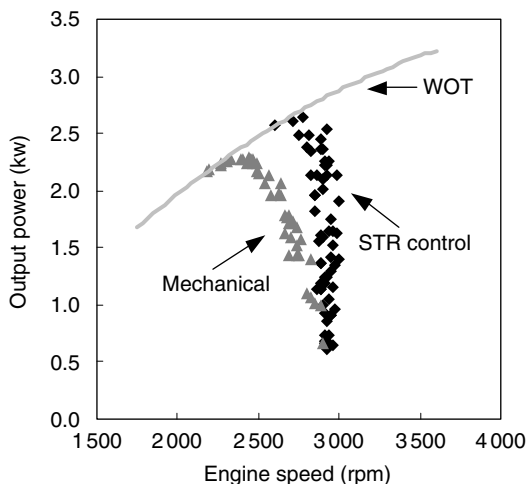


Fig. 14 Dynamic characteristic of governor



Fig. 17 External view of iGX440

回転数に対する出力特性を Fig. 18 に、定格負荷断続運転(100%から0%, 0%から100%)時の回転変動の収束性を Fig. 19 に示す。

Fig. 18に示すように、任意の回転設定におけるアイドルから全開出力までの回転変動は2%以内に収まっており、電子ガバナの特徴である高い回転安定性が得られた。更に Fig. 19に示すように、負荷断続運転時において設定回転に対する回転変動は、目標10%以下に対して8%であり良好な収束特性が得られ、無負荷時の回転安定性と負荷変動時の回転変動の収束性を両立することができた。

また、適応制御型電子ガバナシステムを用いて、完成機商品(芝刈り機、除雪機、高圧洗浄機など)で搭載確認の使い込み実用耐久をおこなった。完成機ごとにチューニングをおこなうことなく、初期から耐久後まで良好な運転特性が得られており、本システムの有効性が確認された。

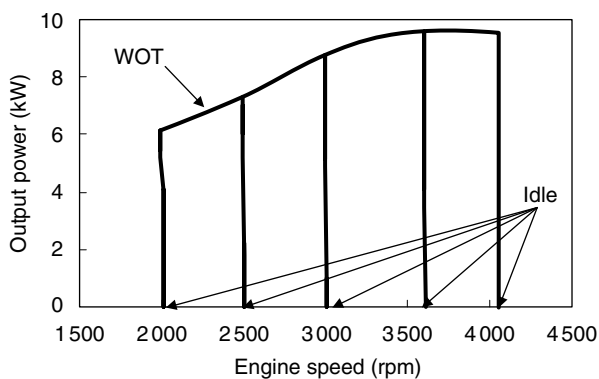


Fig. 18 Static performance of governor

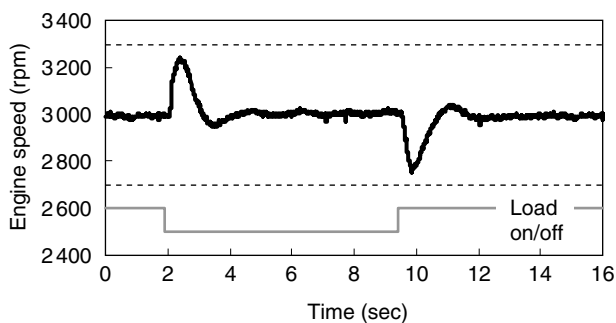


Fig. 19 Dynamic performance of governor
(Target engine speed = 3000rpm)

5. まとめ

適応制御および非線形ギヤ機構を、汎用単体エンジンのガバナに適用することにより、以下のことを実現した。

(1)用途が限定できない汎用単体エンジンに対し、制御対象であるエンジンの動特性の変化に対してロバストなガバナシステムを実現した。

- (2)スロットル全閉全開のレスポンスを維持しつつ、全開近傍の分解能を確保することで、アイドルから急激な負荷変動まで制御可能とした。
- (3)空気質量流量とモータステップの関係を線形化することにより、制御演算内での入力信号に対する線形化を不要とし、簡潔な制御システムを構築した。

参考文献

- (1) 五味努：内燃機関，p.214-215(1985)
- (2) 寺尾満，金井喜美雄：ロバスト適応制御入門，p.109-113(1993)
- (3) 大松繁，山本透：セルフチューニングコントロール，p.3-4(1996)
- (4) 足立修一：制御のためのシステム同定，p.55-64(1996)
- (5) Goodwin, G.C., Long, R.S.: Generalization of Results on Multivariable Adaptive Control, IEEE Trans., AC-24-6, p.1241-1245(1980)
- (6) 伊藤慶太，本田宗平，斉藤輝幸，倉田真秀，直江学：電子制御汎用エンジン i GX440 の開発，Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.44-51
- (7) 香取英男：非円形歯車の設計・製作と応用，p.7-34(2001)

■ 著 者 ■



福嶋 友樹



松田 迅人



新萩 義久



谷口 洋一