

小型ハイブリッド除雪機における 電気制御システムの開発

Development of Electronic Control System for Small Hybrid Snow Thrower

脇谷 勉*

Tsutomu WAKITANI

川上 俊明*

Toshiaki KAWAKAMI

山岸 善彦*

Yoshihiko YAMAGISHI

御菩薩池 勉*

Tsutomu MIZOROKE

要 旨

ABSTRACT

一般家庭向け小型除雪機の操作性向上を目標として、走行電気制御システムの開発をおこなった。除雪機には、負荷変動および路面抵抗差異に対する安定挙動が必要であり、かつオペレータの入力に対して状況に応じたレスポンスをおこなわなければならない。本開発では、左右に独立したモータを配置、これらを個別制御とし、さらに作業者の指令に対して走行条件にあわせた目標速度の補正を自動でおこない、路面や負荷の状態に限らずこの目標速度に俊敏に追従することによって、安定した走行挙動を実現、わずらわしい走行速度調整の低減とともにボタンスイッチ操作によるスムーズな旋回を可能とした。また12Vバッテリーを電源とした走行モータに対して、求められる作業時の高トルクと移動時の高回転を両立するために、ブラシレスモータを採用し進角制御を用いた。これらの制御を適用し良好な走行性能を得ると同時にデバイスの一体化により従来の中型ハイブリッド除雪機の制御デバイスに対して10%の体積削減をおこない、小型除雪機への搭載を実現した。

An electronic control system has been developed for a small snow thrower for general home use. The new system provides stable propulsion and smooth turning. Development focused on the major requirements of snow thrower stable behavior in changing conditions and responsiveness to operator input. The new system has eliminated the need for troublesome speed control, and even complicated turning maneuvers can be conducted more easily. Both high torque and high speed are required from the drive motor, which employs a 12V battery power supply. A brushless DC motor was utilized and flux-weakening control was adopted to enable these requirements to be balanced. The new control system has enabled the achievement of good performance, and integration of components has resulted in a 10% reduction in the volume of components for the former medium hybrid snow thrower.

1. まえがき

近年の技術トレンドであるハイブリッドシステムにおいて、Honda では Integrated Motor Assist (IMA) システム⁽¹⁾としてパラレルハイブリッド方式を導入し、既に自動車でも市販化がおこなわれている。一方、作業機においてもハイブリッドシステムを導入した除雪機を中型クラスで2000年に市販化⁽²⁾している。

除雪機をハイブリッド化することにより、高い取り扱い性をはじめ作業者の負担軽減が出来る。これらのメリットは小型クラスにおいても求められている。

除雪機におけるハイブリッドシステムの特徴としては、エンジン出力で作業及び発電をおこない走行部のみモータ駆動としたシリーズハイブリッド方式の採用、車載用鉛バッテリーを電源とするモータ駆動、シンプルで安価なシステムを構成するための最小限のセンサ情報、低速域での連続高トルク走行、路面状況も含めた走行負荷変動に対する安定性、作業負荷に応じた走行速度の制御、また、スムーズな旋回を実現するための左右に独立したモータを配置しての個別制御、直進用同期制御が挙げられる。

本稿では、小型ハイブリッド除雪機の開発に用いた制御手法ならびにデバイス技術を紹介する。

*朝霞東研究所

2. 開発のねらい

本開発では、従来の中型ハイブリッド除雪機の電気制御システムに対し、さらに簡単操作による操作性の向上ならびに安定したレスポンスを実現させ、かつ高効率モータドライブ、コンパクト、低コストとし、小型除雪機に搭載することを目標とした。

電気制御システムコンセプトを Fig. 1 に示す。

2.1. 小型除雪機への適用

従来の一般的なエンジン式小型除雪機は、同方式の中型除雪機に対し約60%の重量、ボディーサイズとなっており、オペレータによるとりまわし性が中型除雪機にくらべ容易である反面、作業条件をはじめとする外乱変化に対して挙動変化が顕著にあらわれる。すなわち走行時、作業時を問わず直進および旋回の安定を確保するのにオペレータによる頻繁な軌道修正操作を必要としている。

本開発ではこれらの不確定要素を定量的にとらえた上で良好なレスポンスと安定した挙動を得ることを目標とした。

2.2. イージーオペレート

旋回機能を有するハイブリッド除雪機では、左右モータの旋回(減速)制御をおこなうに当り、それぞれのモータに独立した速度指令値を与えている。その減速量を得るために、中型ハイブリッド除雪機では Fig. 2 の通りレバー入力によるアナログ指令を用いていた。作業者の操作量によって任意に旋回速度をコントロール出来るが、安定した旋回のための調整を作業者に頼る面があった。

これに対し、イージーオペレートとするために、Fig. 3の通りレバーによる減速量指示を削除し、押しボタンスイッチによるオン、オフでの旋回指令に対する自動減速および加速制御の実現を目標とした。

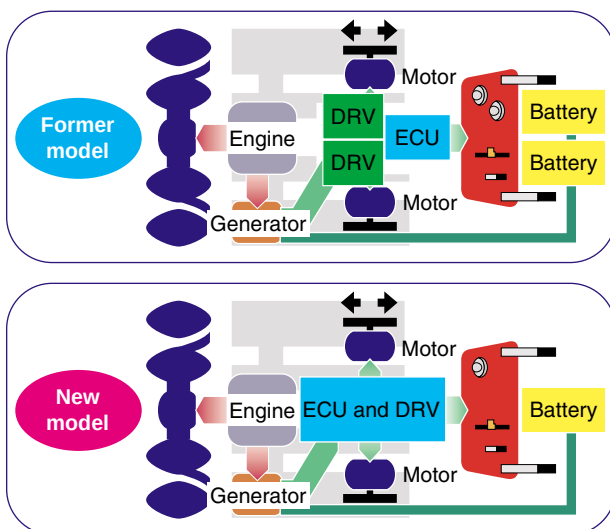


Fig. 1 Electrical system concept for hybrid snow thrower

2.3. モータドライブ

中型ハイブリッド除雪機の場合、求められる作業時の走行トルクおよび採用したブラシモータの特性から、モータドライブ電源を 24V とし、これにともないシステム電源も 24V とした。このため 12V バッテリーを二つ搭載している。小型除雪機への搭載を考慮すると、バッテリーの搭載は一つが望ましい。12V 単電源システムの実現により小型除雪機という限られたスペースへのバッテリー実装が可能となると同時に、他の電装品においても一般車載電装品が採用可能となりトータルコストメリットが得られる。

一方、モータドライブにおいては12Vという低電圧により必要モータ回転数不足およびトルク不足の懸念がある。除雪機において、低中速域での作業、高速域での移動という無段変速による停止から最高速は必須であり、作業時の必要トルクにギア比を合わせるとモータ軸回転は2500rpmが求められる。

低電圧での高効率、可変速運転を実現するために、Fig. 4に示すブラシレスモータを採用することとした。これにより高効率ドライブ、ワイドレンジ回転を実現することを目標とした。

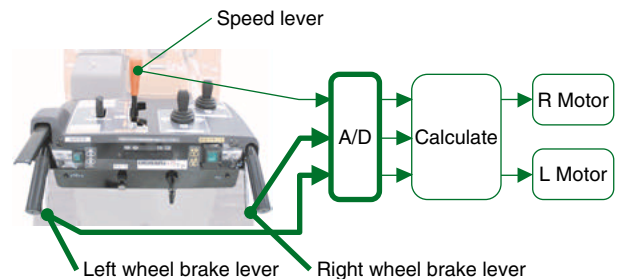


Fig. 2 Control panel of former model

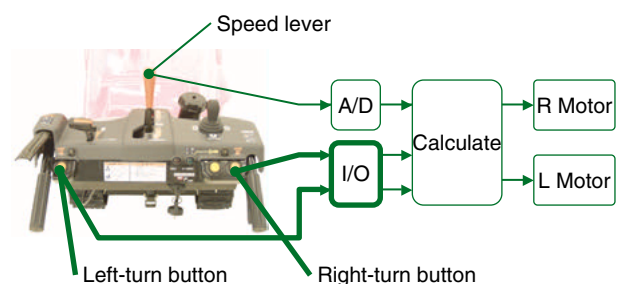


Fig. 3 Control panel for new model

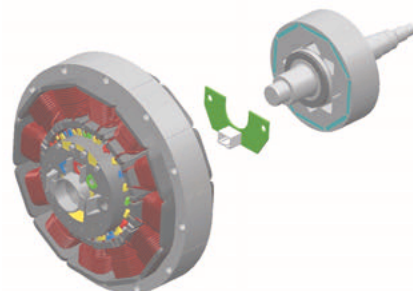


Fig. 4 Brushless DC motor

2.4. コンパクト化

左右独立モータ駆動のハイブリッドシステムを構成するためには、マンマシンインターフェイス、システムの管理、リレーをはじめとするデバイスの駆動、モータ駆動といった複数の制御デバイスが必要となるが、これらを一体化することにより既存デバイスに対する容積率10%ダウンを目標とした。またこれによりデバイス間の結線が削減可能となり、ハーネス不具合等に対しての信頼性の向上かつシステムの低コスト化が可能となる。

3. システム制御

複数デバイスを一体化させるにあたり、中型ハイブリッド除雪機に採用されていたデバイスである Electronic Control Unit(ECU)とモータ Driver(以下 DRV)に求められていた主な機能を整理すると、

- ・ ECU システム統合制御、インターフェイス
- ・ DRV 作業負荷追従モータドライブ

であり、マイコン(以下CPU)での処理方式を決定するにあたり、

- ・ 高ビット CPU 1個による集中処理
- ・ 低ビット CPU 複数による個別処理

といった選択肢がある。

本システムにおいては後者を採用し、マスタ・スレーブ方式とした。各マイコン間の信号インターフェイスはバス接続によるデジタルインターフェイスをメインとしたが、アナログインターフェイスも持たせている。この構成によりCPUの処理内容を分散化出来るためデバッグ工数の短縮がおこなえると同時に、CPUフェール発生時の信頼性を確保出来た。ブロック図は Fig. 5 の通りである。

3.1. 自動旋回制御

イージーオペレートを達成するためには、作業者の押しボタンスイッチによる旋回入力操作に対して、自動減速および加速を違和感なく良好なレスポンスでおこなわなければならない。実際の走行においては、舗装路、雪上の移動走行(特にクローラ駆動の場合、接地面積が大きいので影響を受けやすい)や除雪作業をともなった走行といった様々な状況を想定する必要がある。これらの不確定要素をパラメータ化し、目標速度 SPm 、 SPm' を式(1)および式(2)からなるモデル式とした。これらは左右の足軸それぞれに対する目標速度であり、マスタCPUにて演算をおこなっている。

車速設定レバーによりインプットされる直進速度指示量 ACC から直進目標速度を求め、二つのスレーブ CPU には同じ値の目標速度を指示し、直進走行をおこなう。

R側もしくはL側の押しボタンスイッチによって旋回指令が入力されると、減速側目標速度 SPm および反減速側目標速度 SPm' を求め、時系列による自動減速をおこなう。

$$SPm = (a1 \times DECm \times ACC) - (a2 \times DECm' \times ACC) \quad (1)$$

$$SPm' = a1 \times DECm' \times ACC \quad (2)$$

SPm : 減速側目標速度

SPm' : 反減速側目標速度

ACC : 直進速度指示量

$DECm$: 減速側減速量(パラメータ)

$DECm'$: 反減速側減速量(パラメータ)

$a1$: 減速寄与率1(パラメータ)

$a2$: 減速寄与率2(パラメータ)

$DECm$ で押しボタンスイッチ入力後の自動減速パターンに必要な時系列と減速度を決定する。このパターンの決定

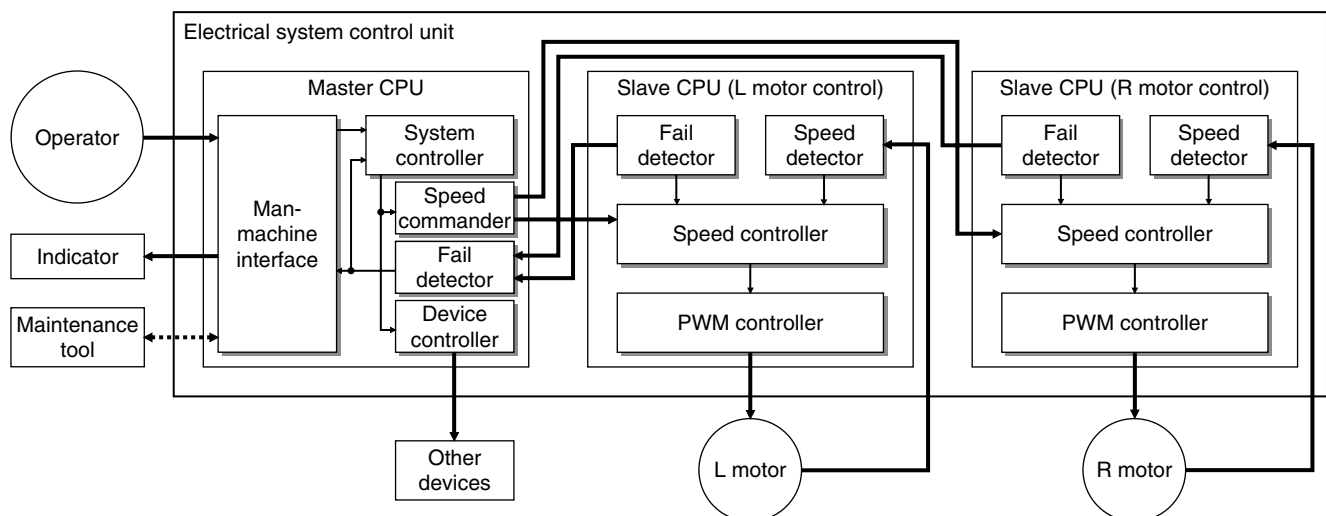


Fig. 5 System block diagram

には、車両重心位置に影響し、走行の挙動ならびに減速度の差異となつてあらわれる、

- ・押しボタンスイッチ入力時点の走行速度
- ・走行荷荷

に対して、各条件で作業者が違和感を持たない挙動変化となるよう、実車両テストから最適値を求めこれを Fig. 6 に示すマップデータとした。

$a1$, $a2$ は除雪機左右モータ駆動システムにおける独自のパラメータである。除雪機においての旋回は、片側車輪を減速停止させることによりおこなわれるが、この際に減速側のみでなく反減速側にも若干の減速をおこなわせるとスムーズな旋回感が得られる。DECm 同様にマップデータ化をおこなった。

なお、実際の除雪機における ACC 入力、直線上に配置されたアクセルレバーで操作され、この操作量全域内は、前進側可変レンジ、停止(ニュートラル)レンジ、後進側可変レンジで構成されている。これをアナログ信号化してモデル式に入力しているが、アナログポテンショメータの機械取り付け公差等により個体差が発生する。これら不確定要素に対しての量産性を持たせるため、ACC 算出もモデル式とし、か

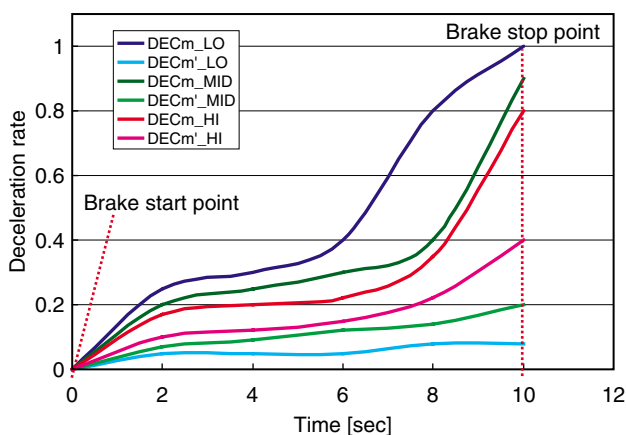


Fig. 6 DECm MAP data

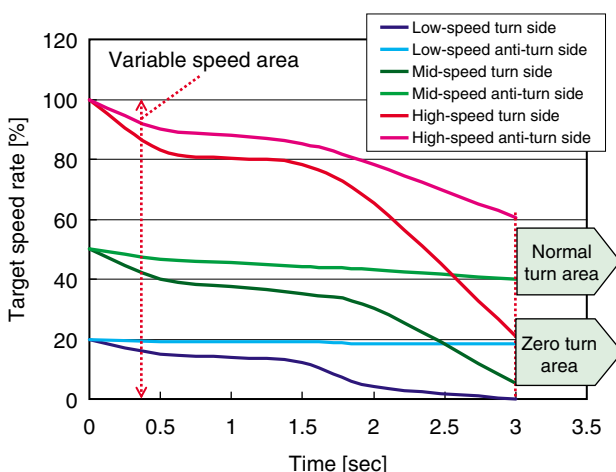


Fig. 7 Brake timing chart

つイニシャル操作による偏差吸収をおこなわせている。

各パラメータを固定とした場合の、式(1)、式(2)により求められる減速カーブを Fig. 7 に示す。これにより各走行条件にあわせたアウトプットが得られた。

これらの結果をもとにした実機での自動旋回イメージを Fig. 8 に示す。

3.2. モータドライブ制御

本小型除雪機に要求される走行モータの最大トルクは $4.5\text{N}\cdot\text{m}$ であり最高回転数は 2500rpm である。Fig. 9 に走行モータに必要とされるモータ回転数とトルクの関係を示す。イーゾオペレートに対して違和感の無いよう、マスター CPU で求めた目標速度へとすばやく追従し、かつ 12V 電源に対して低速での作業時においても安定した速度制御をおこなわなければならない。

これら課題を解決するために、

- ・モータ速度制御
- ・ハイサイド・ローサイドスイッチング制御
- ・強制転流制御
- ・起動同期キャンセル

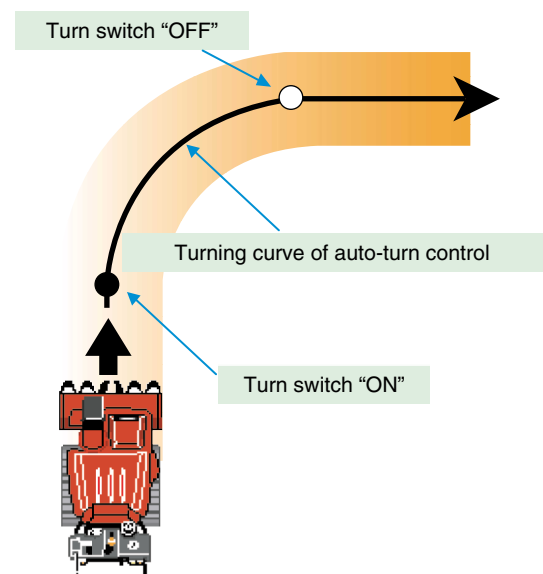


Fig. 8 Turning curve line of auto-turn control

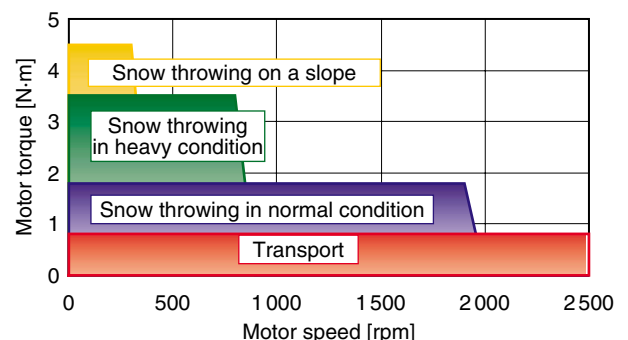


Fig. 9 T-N curve of brushless DC motor

をおこなうことにより小型除雪機に求められる要求をクリアすることが出来た。

3.2.1. モータ速度制御

本システムは先記の通り 3 CPU 構成であり、作業者の操作に対する車速に応じた目標速度算出はマスタ CPU でおこない、R、Lそれぞれに対する SPm 、 SPm' を決定する。左右モータをそれぞれ制御する二つのスレーブCPUは、この値に対し速度フィードバックをおこない、路面や作業負荷による車速変化に対して追従をおこなう。それぞれのスレーブCPUは他方に干渉せず、単独で制御をおこなっている。これは車速変化に対するレスポンスを最優先させるためであり、これによって生じる左右の車速アンバランスについては、各スレーブCPUからリアルタイムでモータ回転数を受けているマスタ CPU でシンクロ制御をおこなう。

スレーブ CPU では、車速変化、目標速度の変化に対する素早いレスポンスとオーバーシュートの防止を両立するために、PI制御によるフィードバック制御に加え、目標速度に応じたフィードフォワード制御を用いている。スレーブ CPU の制御ブロック図を Fig. 10、目標速度とフィードフォワード制御速度マップデータを Fig. 11 に示す。

フィードバック制御積分係数は、Fig. 12に示すとおり減速、加速に分けてマップデータ化をおこない様々な車速に対して安定したレスポンスを得ている。

3.2.2. ハイサイド・ローサイドスイッチング制御

12V 電源でのドライブにおいて要求走行トルクを得るために電流を増加しなければならない。よってスイッチング

素子(以下 FET)はスイッチングロスによる発熱や耐電流の観点から大容量化が望ましいが、パッケージの大型化、高コストにつながる。本開発では、スイッチング効率の良いドライブによる発熱ロスの低減、確実な保護により小容量の FET が採用可能となった。

モータドライブは三相ブリッジハイサイド、ローサイドの両サイドスイッチング方式としFET損失バランスの均等化をおこなっている。実用モードにおける発熱についても、Fig. 13 に示すとおりハイサイドとローサイドの温度差 $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ 以内を達成することが出来た。

3.2.3. 強制転流制御

走行中もしくは作業中に必要となる走行モータの最大トルクは $4.5\text{N}\cdot\text{m}$ である。しかしながら実走行においてクローラのロックが発生した場合、最大トルクが発生してもロック状態を解消出来ない場合がある。この場合はマスタCPUによるロック検出もしくはスレーブ CPU による過電流検出による保護処理となるが、作業機においてはロック状態でも極力走破したいという要求もある。従来の過電流検出時リトライ処理では電力が必要とされるため、12V 電源では実現が困難であった。またロック状態では同一相への通電が継続するため大電流が流れ、さらに過電流となってしまう。そこで、強制的に転流処理をおこない、ロック状態を解除させて新たな相への通電をおこなう方法とした。これにより Fig. 14 に示す通りのロック時トルクを得ることが出来た。

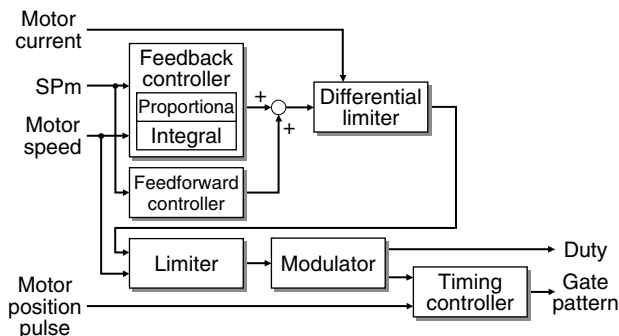


Fig. 10 DRV control block diagram

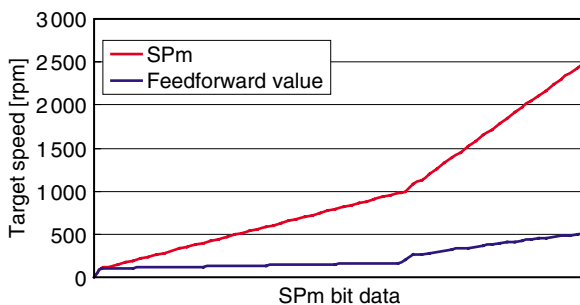


Fig. 11 Feedforward value

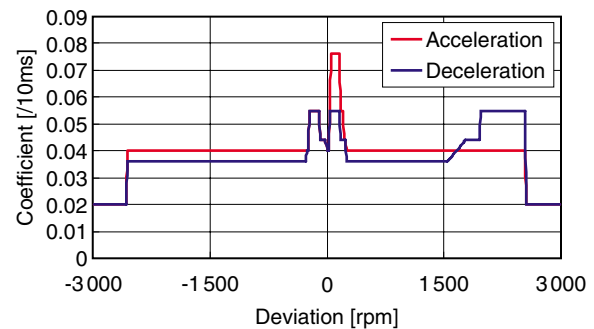


Fig. 12 Integral coefficient MAP

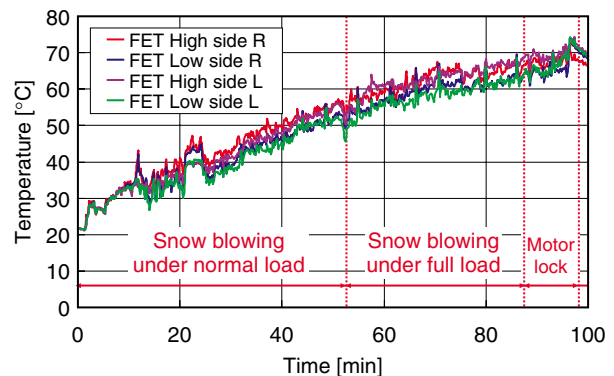


Fig. 13 Result of measurements temperature of drive FET

3.2.4. 起動同期キャンセル

12V単電源化にともない、低速度走行時にはモータ印加電圧3Vという場合がある。このような目標速度の印加電圧が低い時には、左右のモータ速度差を吸収するための直進同期制御により起動レスポンス悪化という状況が発生する。

起動時には左右のモータ間での同期をおこなわない方が良好な立ち上がりレスポンスを得られるということが判明したため、直進性を損なう規定回転数に達するまでは左右同期制御をキャンセルさせる事とした。この処理は初速発生後ただちに解除とするが、実機走行で同期制御への悪影響についても確認をおこない、問題が無いことを確認した。なお、この処理は速度ゼロからの立ち上がり時のみ適用し、直進減速時や旋回時には通常の処理方法を適用している。

なお、本項での結果はクローラという走行抵抗の高い駆動方法を持つ作業機に有効である。

4. ハードウェア構成

前項では、ソフトウェア側での対応策について記載したが、ここではハードウェア側について説明する。

12V 単電源システムによるハードウェア上の特徴としてモータ回生電圧の印加による過電圧の影響があげられる。本開発では、回路部耐圧スペックを制御部とドライブ部に分けそれぞれに印加される最高電圧より決定し、かつ過電圧保護により信頼性を確保している。ユニットの実装基板を Fig. 15 に示す。

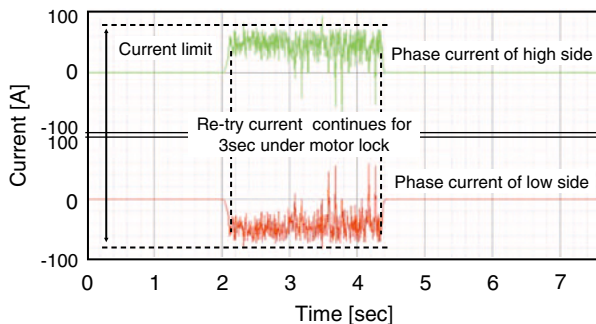


Fig. 14 Results of lock current measurements

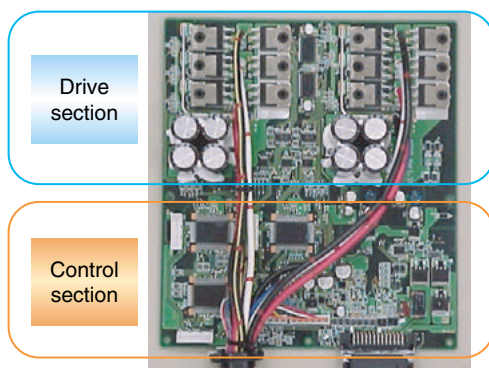


Fig. 15 Circuit board of ECU/DRV unit

4.1. 一体化基板

ガラスエポキシ4層基板による高集積実装レイアウトとし、モータドライブ部の大電流スイッチングによるコントロール部への影響が無いよう電源グランド(以下 GND)パターンを考慮して設計をおこなった。各 GND はパターン面積最小とするため共通化をおこなっているが、CPU の GND は独立させコネクタパターン近傍で共通コンデンサ、サージキラー素子と共に GND レベルを合致させ、GND ノイズに対する信頼性を確保した。

4.2. 制御電源構成

デバイス一体化にともない、複数の電源が同一基板上に混在することとなるが、

- ・モータドライブ用電源と DRV 制御電源共通化
- ・システム制御電源のみ単独化

とすることにより、最小の電源構成を実現した。

なお、各電源用レギュレータの立ち上がり時間差を設け、電源投入時、マスタ CPU がスレーブ CPU より先に立ち上がるハードウェア構成としている。

4.3. 入出力ライン

Figure 16に示すとおり、信号およびデバイス作動用インターフェイスは基板ダイレクトカップラにておこない、ユニット内のハーネスを削減、信頼性の向上と低コスト化をおこなっている。バッテリー電源入力およびモータドライブ出力用パワーラインについては基板に直接ケーブルを接合する構成としている。大電流を流すパワーラインの基板パターンが削減され、基板パターン引き廻し効率の向上と配線長のミニマム化によって、基板面積が削減し、既存デバイスに対し 10%の容積削減が実現出来た。

5. 実機テスト結果

起動から最高回転数速度までの走行速度レスポンスや実作業モードにおける作業フィーリング確認には、Fig. 17および Table 1 に示す小型ハイブリッド除雪機を用いた。この除雪機は電気制御システムのみならず、従来の機械式小

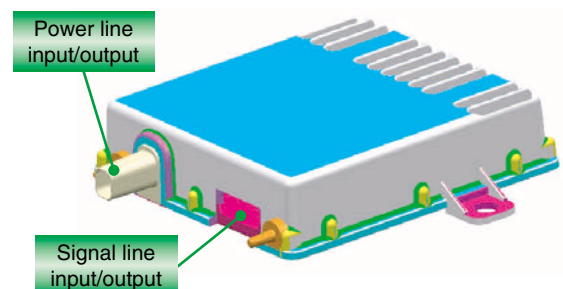


Fig. 16 Overview of ECU/DRV unit

Table 1 Major specification of hybrid snow thrower

Items	Former hybrid model	New hybrid model
Type	Medium	Small
L × W × H [mm]	1650 × 920 × 1340	1500 × 725 × 1155
Outfitted weight [kg]	265	163
Snow-clearing width [mm]	920	710
Snow-clearing height [mm]	580	510
Maximum snow-clearing volume [ton/h]	80	60
Drive system	Dual drive for DC motor	Dual drive for brushless DC motor
Speed control	Pulse Width Modulation (PWM) control with unipolar drive	Pulse Width Modulation (PWM) control with bipolar drive
Motor reduction gear ratio	61 : 1	36.4 : 1
Maximum speed [m/sec]	0.78	0.8
Maximum motor speed [rpm]	3000	2500
Maximum motor output [N·m]	4.5	4.5
Turning	Manual operation with analog switches	Automatic control with digital switches
Power source	12V battery ×2	12V battery
Control device	Electronic Control Unit (ECU) Motor Driver (DRV) ×2	Unified controller

型除雪機に対し30%の除雪性能向上やフルカバー化による低騒音、低振動化をおこない、より一層の商品力向上となった新モデルである。この小型ハイブリッド除雪機による実機テスト結果、除雪機に求められる走行要求条件を満足する性能を得ていることが証明出来た。

5.1. 除雪機の走行速度レスポンス

除雪機の駆動用モータ速度制御への影響は、1) 作業からの速度操作量の変化、2) 低摩擦係数(以下 μ)を持つタイル路面上から高 μ を持つ半融雪路面までの路面変化、3) 除雪負荷の増減による変化、といった様々なものがある。モータの実回転数と内部変数 SPm (マスタ CPU 内部で計算している目標回転数)に対するモータ回転数の時間変化を Fig. 18 に示す。この図は、作業からの速度操作を低速から最高速度まで変化をさせる際の、その条件下においての最適な目標回転数 SPm に対するモータ実回転数の追従性を示した。

上記変化に対しても、リニアな追従が可能でありイージョオペレート操作に対しても、十分なレスポンスを得ることが出来た。



Fig. 17 Overview of hybrid small snow thrower

5.2. 12V 単電源化による挙動

12V 単電源化によって、高負荷走行時の電圧ドロップおよび負荷変動による一次電圧変動がおよぼすドライブ回転数変動に対し実機実用テストにおいて、

- ・ 走行時電圧ドロップによる最低電圧 11.4V
- ・ 電圧変動による定格回転数誤差 $\pm 6\%$

という結果となり制御および応答性に影響をおよぼさない電圧レベルであり、かつ定格回転数許容範囲であることが確認出来た。

5.3. 旋回時の安定性

除雪作業時の様々な要因変化に対して、旋回時の安定性を確保する必要がある。Fig. 19 に示すヨーレートによる解析をおこなった。この結果、旋回に対し安定したヨーレートが得られ、体感として現れる実機挙動違和感は発生せず、トータルとして良好なレスポンスを得られることが確認出来た。

6. まとめ

本小型ハイブリッド除雪機における電気制御システムの開発により次の成果を得た。

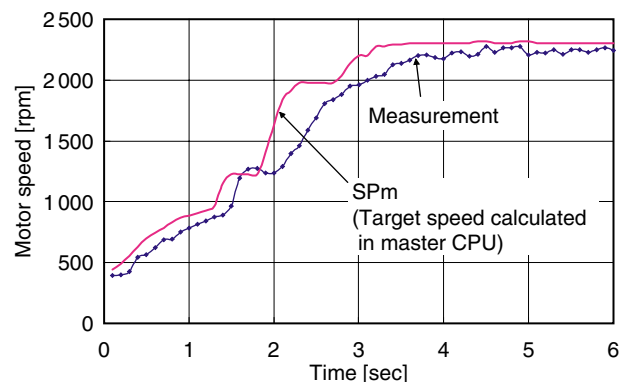


Fig. 18 Response time graph for different load characteristics

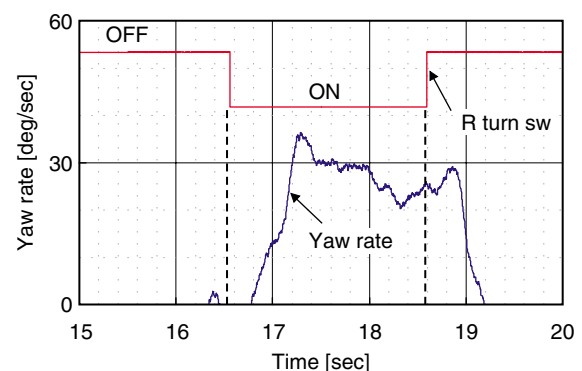


Fig. 19 Response time graph of vector curve

- (1) 自動旋回制御により、押しボタンスイッチのイージーオペレートによる自動減速および加速の安定した旋回を得られた。
- (2) モータ速度制御により、負荷や電圧変動などの不確定要素に対して安定した制御を得られた。また、ハイサイド・ローサイドスイッチング制御、強制転流制御、起動同期キャンセルによって、12V ドライブ電源で、要求される走行トルクと回転数を達成し、12V 単電源でのシステムが可能となった。
- (3) 一体基板化や制御電源構成最小化、入出力ラインのダイレクトコプラと基板へのケーブル接続併用により中型ハイブリッド除雪機の制御用デバイスに対し10%の体積削減が出来た。

参考文献

- (1) 松木 正人, 若城 輝男, 神山 敏宏, 佐藤 利行, 賀来 嘉昭, 神田 正浩: ハイブリッドカー「Civic Hybrid」用パワートレインの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.39-48(2002)
- (2) 花房 実美, 脇谷 勉, 山本 隆弘, 乾 勉: ハイブリッド除雪機「HS1390i」の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.31-38(2002)

■ 著 者 ■



脇谷 勉



山岸 善彦



川上 俊明



御菩薩池 勉