

組込みシステム教育における 走行体の消費電力に関する一考察

松田昭信† 山下直仁† 芦原秀一† 福田晃‡

現在、組込みシステム開発における低消費電力化は、最も重要な課題の一つである。しかし、組込みシステム開発者は、開発中に組込みシステムにおける消費電力の増加/減少を感覚的に認識することや、より低消費電力化を意識した開発に取り組むことは困難である。本稿では、走行体のコンテストを通じて、低消費電力を逐次考慮した組込みシステムの開発に取り組むことの基礎を学習できたことを示した。それにより、組込みシステムの低消費電力の開発を促進し、引いては省エネルギー対策に貢献することが期待される。

A Study of Embedded System Education with Running Vehicle Body Power Consumption

Akitoshi Matsuda† Naohito Yamashita† Shuichi Ashihara† Akira Fukuda‡

Recently, the low power consumption in embedded systems development is one of the most important issues. However, it is more difficult for embedded systems developers to recognize an increase or decrease in power consumption sensuously and to develop more conscious of power consumption in embedded systems development. This paper presents that a basis of the development which always considered low power consumption could be learned through the contest of running vehicle body. They can contribute to development of low power consumption in embedded system and are expected to energy conservation measures for a life in the future.

1. はじめに

現在、節電対策などの省エネルギー問題がクローズアップされている。そこで、その問題を多くの人へ意識付けるため様々な取組みがなされている[1]。その取組みの一環として、福岡県福岡市では、2009年度から3年計画で、先進的組込み技術者育成事業として技術セミナーなどを開催している。その一つに、プロジェクト型実践演習(Project Based Learning : PBL)がある[2]。2009年度のPBLの取組みでは、「ETロボコンを利用した消費電力測定」、「水素燃料電池を利用したライントレーサの製作」を実施した。2010年度のPBLの取組みでは、「組込みソフトウェアと低炭素社会」をテーマに、より低い消費電力で走行できるロボット・カーを製作し、実際に走行させるコンテストをおこなった。このコンテ

ストは、2010年9月18日、ロボスクエア(福岡市早良区百道浜)において[3]、「Green ET Challenge 2010」というテーマ名において開催された。本コンテストに参加したのは、企業関係5チーム、学校関係2チームの合計7チームであった。各チームは事前教育の座学で得た知識と走行体の基本モデルをもとに、消費電力のアルゴリズムを検討しながら本コンテストに挑んだ。本コンテストを通じて、消費電力の低減にどのような取組みが必要なのかを、組込みシステムを通して学習する機会が提供された。

従来から、この類のコンテストであるロボットコンテストなどは、走行コースをいかに速く完走するか、動作をいかにうまくコントロールするかなどのロボットの動きに重点を置いたコンテストが大半であった[4],[5]。そこで、今回はこのような趣向を若干変えて、走行体の消費電力に重点を置いたコンテストをおこなった。本コンテストの内容については、別の機会にて発表する。本稿では、組込みシステムの教育における走行体の消費電力計測及びその結果について重点的に述べる。

†九州組込みソフトウェアコンソーシアム

Kyushu Embedded Software Technology Consortium
九州大学大学院 システム情報学研究院

‡Graduate School of Information Science and Electrical
Engineering, Kyushu University

2. 基本モデルの開発

今回のコンテストに用いた走行体の基本モデルは、図1に示す基本モデルを用意した。走行コースとしては、タミヤ社のモータ付き模型自動車「ミニ四駆」の専用コースを用いた[6]。走行体の基本モデルのボディもミニ四駆を採用し、AVR マイコンによる制御基板を搭載した[7]。ブレーキ時にモータを閉ループにして、惰性で回るモータから電流を発生させる回生ブレーキ機能を追加した。基本構想から2回の試作を経て、のべ3カ月をかけて基本モデルを完成させた。本コンテストの規定では、一般に走行体は何を利用してもよいことになっている。しかし、この基本モデルと同じミニ四駆が低価格で簡単に手に入ることから、全チームとも基本モデルであるミニ四駆のボディを採用していた。ここで課題となるのは以下である。

- ・摩擦の少ないボディを作製する
- ・難所で横転せずバランスのよいボディを作製する
- ・低重心にして走行の安定化を図る

結果的には、全チーム同一の基本モデルを採用したため、これらの課題への対応が、今回のコンテストの成績に大きく影響を与えることが予想される。これらの課題解決のポイントは、走行体の安定感のみに注視してボディを重くすると、走行体の駆動のための動力が余計に必要となり、消費電力の増大につながる。この辺の課題をバランスよく解決する必要性が求められる。

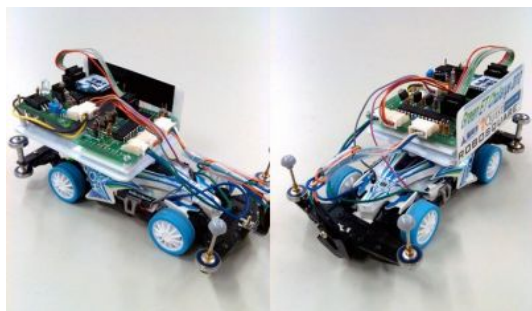


図 1 走行体モデル

3. ハードウェアの開発

次に、図1の走行体モデルのブロック図を図2に示す。制御基板は大きく制御器と計測器に分けられる。本コンテストでは、制御器については参加チームが改造してよいことになっている。ここでの課題は、主に以下の点が挙げられる。

- ・モータのスパイク・ノイズによるマイコンの誤動作を抑える
- ・回生ブレーキの改良・改善
- ・低消費電力に向けたマイコン制御回路の増減

今回のコンテストでは、走行体の DC ブラシモータにおいて発生するスパイク・ノイズに悩まされたチームが多かったようである[8]。次に、基本モデルで作成した計測器の概要を説明する。この計測システムにおいて、消費電力のデータの収集するトリガを発行する。その信号をもとに、走行体システムの計測器において、測定及び消費電力の計算を始める。これらの演算された結果を集計して最終的な消費電力量として表示する。走行体システムの制御器においては、今回のデータは、無線通信にてやりとりがおこなわれるので、それらの通信の制御を実行する。

次に、図3に計測器の回路図を示す。この図を見て分かるように、電源部&測定部、マイコン部、無線部に分けられる。電源部&測定部に測定用の抵抗(0.1Ω)を入れて、抵抗の両端の電圧をマイコンで A/D 変換して測定する。マイコン部にて、その電圧値を用いて消費電力を計算する。以下にマイコンの概要を示す。

品名: ATmega168P-20PU

■最大動作周波数: 20MHz

■フラッシュ: 16k バイト

■RAM: 1K バイト

■EEPROM: 512 バイト

■28ピン DIP

無線部は、XBee (ZigBee 対応) を使用した。機能は、非同期シリアル通信速度 9600bps で、処理ビット数は、8ビットである。

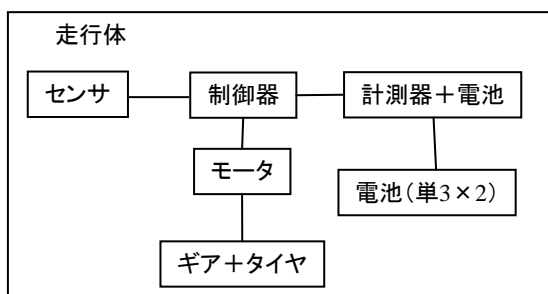


図 2 走行体のブロック図

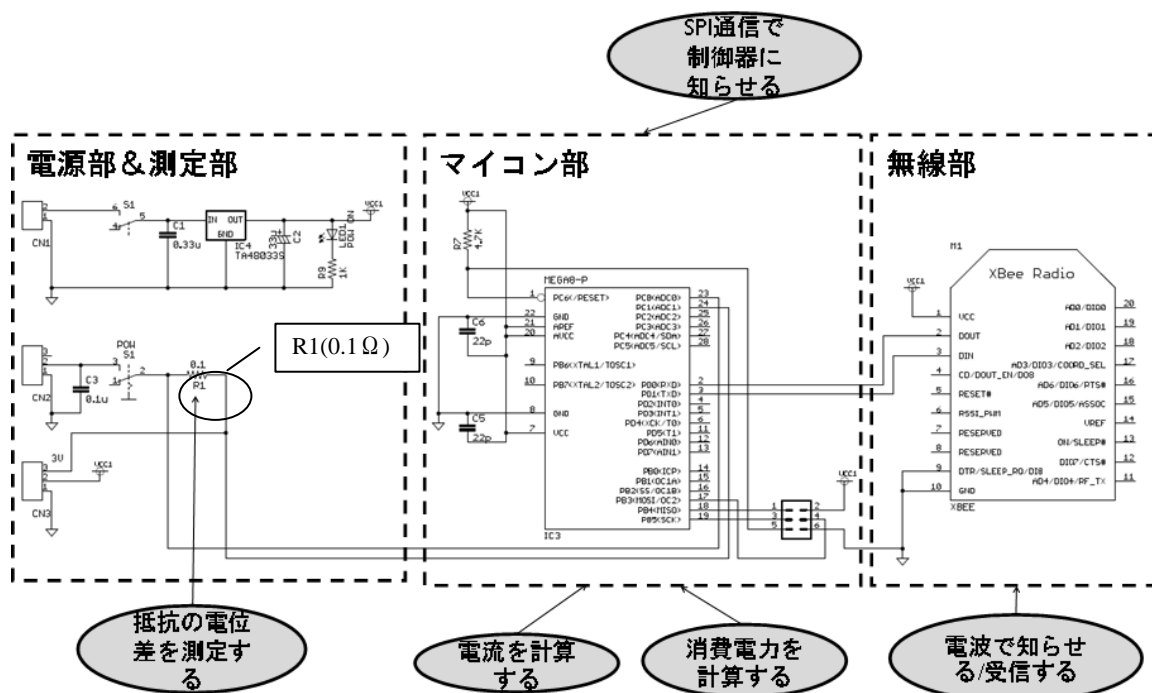


図 3 計測器の回路図

4. ソフトウェアの開発

今回のコンテストの事前教育における PBL 学習会の座学では、走行体(基本モデル)の制御システムを UML (Unified Modeling Language) を使って説明した [9]。これは、ユースケース図によって、ユーザ(外部システムも含む)の要求に対するシステムの振る舞いを表現する。ユースケース図はシステムの要件定義について全体的な関連を表すと同時に、要件定義の分析にも有用である [10]。また、これらの UML 表記をソフトウェア開発に結びつけるため、どのように C 言語に変換すればよいのかを検討しなければならない。そこで、今回は「C-language's Object Oriented Language: COOL」と名付けられたプログラミング手法を用いて UML 表記を C 言語へ変換した [11]。

これにより、C 言語はオブジェクト指向言語ではないが、オブジェクト指向の考え方に基づくプログラミングスタイルを、この COOL といったプログラミング手法によってある程度実現できる。この手法によって得られた C 言語を用いて、走行体の走行制御の最適化をおこなう。この制御ソフトウェア開発で課題となるのは、走行コースの難所を攻略するための走行制御の改良をどのような手法で実施するか、消費電力を抑えるための走行制

御をどのようにして改良できるかなどが挙げられる。

5. 消費電力測定

本コンテストでは、競技をスムーズに進行させるために、計測用のシステムのコンポーネントを準備した。今回のシステムは大きく分けて、走行体に搭載された計測器と、Java で作製したパソコン用プログラムである計測システム及びコース上に設置された周回ロガーに分けられる。この計測システムと走行体の計測器は、ZigBee 規格の無線電波で主に消費電力量の情報をやりとりする。計測システムは走行体に対して、スタート及びストップ命令を送信できる(競技開始時には、運営委員が計測システムの画面から操作して走行体をスタートさせる)。走行体は、搭載した計測器で消費電力を計測し、そのデータを 1 秒ごとに ZigBee 規格の XBee 無線モジュールより電波で計測システムに送信する [12]。そこで、図 4 に示すように、計測システムは受信した電力値を折れ線グラフに加工してリアルタイムに表示し、同時に積算消費電力量を表示する。この積算消費電力量によって、走行体の消費電力の低さを競う形となる。また、走行体の周回数と走行タイムも同時に表示する。



図 4 計測システムの画面

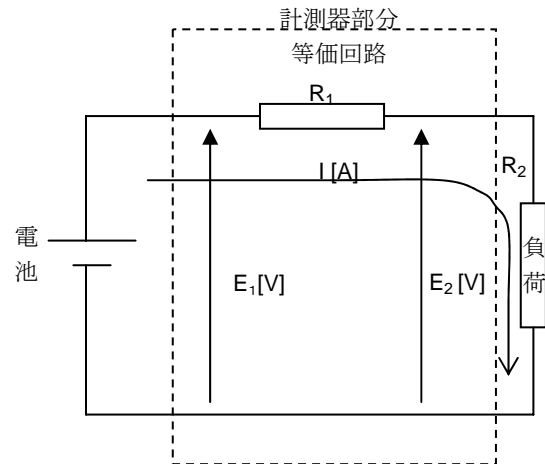


図 6 消費電力の計算回路

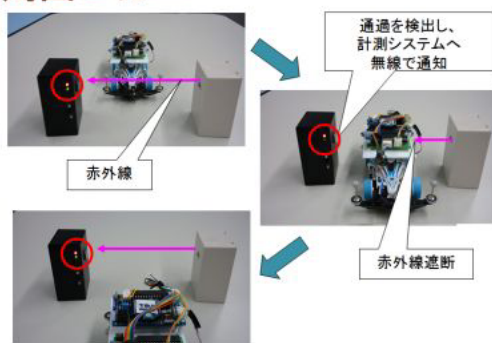


図 5 周回ロガー

また、コース上に設置された周回ロガーは、赤外線センサ(フォトインタラプタ)を備えており、常時赤外線を発射してその赤外線が遮られた間隔において走行体が1周したと感知する[13]。それをカウントする度に、走行体が周回を重ねると検知して、ZigBee規格の電波で計測システムに通過情報を送信する(図5参照)。計測システムは、走行体が12周走行したと判断すると自動的に走行体にストップ命令を送信し、競技が終了する仕掛けとなっている。

次に、消費電力の計測について述べる。消費電力の計測部分の等価回路を図6に示す。消費電力Pの計算は、以下の式で計算できる。

$$P = E_1 \times I \quad (1)$$

ただし、構造上、電流Iと負荷R2は測定できないので、以下の関係式より算出する。

```
//消費電力の計算とPCへの送信
void cal_current()
{
    //電流値Iと電圧値E1の計算
    //a0及びb0はそれぞれE1,E2のアナログ値
    i = (double)((a0 - b0) * 3.3)/1024.0/0.1;
    e1 = (double)((a0 * 3.3)/1024.0);
    //平均をとる
    if (0 == (total_watt_count % HEIKIN)){
        send_data = total_watt / total_watt_count;
        total_watt = i * e1;
        total_watt_count = 1;
        uart_transmit(send_data);//結果をPCへ送信
    }else{
        total_watt += i * e1;
        total_watt_count++;
    }
}
```

図 7 データ計算プログラム

$$E_1 = I (R_1 + R_2) \quad E_2 = I \times R_2 \quad (2)$$

よって、消費電力は以下の式で算出される。

$$P = \frac{E_1 (E_1 - E_2)}{R_1} \quad (3)$$

R1は図3における計測用抵抗R1(0.1Ω)である。

その計算プログラムを図7に表す。このプログラムは一定の期間ごとに消費電力を計算し、1秒毎に平均を取り計測システム(PC)へ送信する。PC側で消費電力を走行体が停止するまで加算していき、最終的には

消費電力の総合計を積算消費電力量(W・s)として計算する。

6. 考察

本コンテストは、各チームがそれぞれの走行体を用いて走行コースを走り、その消費電力の低さを競った。順位は、消費電力の低いほうが上位となる。それぞれ1位から3位までの成績(消費電力)を表1に示す。その中で、優勝したのは、参加チーム名「とおりもん」で、消費電力は266.81(W・s:ワット秒)であった(図8参照)。このチームは、走行体に以下の工夫が凝らされていた。

- ・走行体の摩擦力を極力減らすため4輪駆動を2輪駆動に変更
- ・ギアのバリを取り除いた
- ・車軸を強度の高いものに交換
- ・タイヤの接地を極力小さくした

など、走行体のボディにいろいろな工夫が施されていた。また制御ソフトウェアも、回生ブレーキに惰性を組み合わせて合理的に改良されていた。

次に、準優勝したのは参加チーム名「FSCレーサーズ」であり、成績は309.8(W・s)であった(図9参照)。このチームは、走行体が終始安定した走りをしており、回生ブレーキを使った急な停止動作はおこなわず、走行体の重量を増加して減速時には通電停止をおこない、走行体の惰性を利用して走らせるなどの工夫を凝らしていた。また、制御ソフトウェアは、ウォッチドッグタイマー対応やエラーパターン対策など、異常処理がきちんと実装されていた。

最後に、第3位の参加チーム名「頑張れ長辻」であった(図10参照)。このチームは、本コンテスト前でもハンダごてを握って制御基板の修正などを続けており、付け焼刃的な対応を不安視されていた。このような、その場の対処で、緊急対策を実施して成功した事例である。また、組込みソフトウェアとしても、難所を検知するマークをうまくカウントして難所ごとに攻略するという、他のチームとは違ったアプローチをとっていた。このような現場での経験は、実社会において組込みシステム開発をおこなう場合に、開発現場での対処の重要性を学ぶことができたと考える。

また、単なる消費電力の量だけでなく、図8と図9を見ると分かるように、図8のグラフは時間に対する消費電力の変化が大きく、これは走行体のスピードの高低が頻繁におこなわれていたことがわかる。逆に図9では、消費電力の変化が少なく、走行体が一定のスピードで走っていることが考えられる。このような、結果から、通

表1 消費電力測定結果

順位	積算消費電力量(W・s)
1	266.81
2	309.83
3	458.48



図8 計測システムの画面(1位)

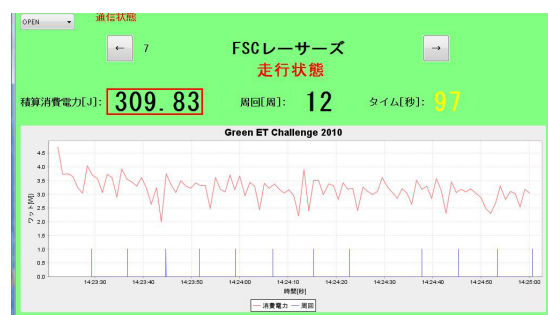


図9 計測システムの画面(2位)



図10 計測システムの画面(3位)

常のガソリンで走る自動車では、急加速及び急発進が燃費に影響するが、電気自動車では、そのような法則が当てはまらないのではないかと考えも、発見できた。

7. おわりに

今回のコンテストでは、ソフトウェア、ハードウェア及び走行体のボディなど様々な項目の開発を実体験することにより、より実体に近い組込みシステムの学習ができたと考えられる。

具体的には、低消費電力で走行するためには、どのようなソフトウェアの振舞いが必要であるか、全速で走行体を走らせるとトータル的な消費電力は確実に減少するが、走行コースに難所が仕組まれているためリタイアする可能性が高い。これらの各難題を十分に考慮しなければならない。これらの体験が、今後、組込みシステム開発において、効果的な体験として蓄積していくと考える。

今回のコンテストでは、重要なファクターはトレードオフの関係にあるスピードと消費電力である。これらのトレードオフ解析を十分に理解するように本コンテストで仕向けたことは、組込みシステム教育においても有益であったと考える。また、リアルタイムに消費電力の状況を確認できることは、ソフトウェア及びハードウェアの制御の方法で、消費電力に与える影響が随時確認できることも、有益であったと考える。

8. 今後の課題

今回のコンテストにおける走行体は、「止まる」「走る」の制御しか実現しなかったが、将来の走行体は自動走行を視野に入れているので、今回は「曲がる」を考慮する必要があると考えている。また、低消費電力で走行するためには、どのようなソフトウェアの構築が必要か、走行コースの難所をうまく利用する対策をどのように講じるか、についても考えさせる必要がある。今後、これらの課題を解消しつつ、消費電力のみならず発電機能を設けたりして、コンテストの充実を図っていきたいと考えている。

参考文献

- [1] Zeng, G., Tomiyama, H. and Takada, H.:
Dynamic Power Management for Embedded
System Idle State in the Presence of Periodic
Interrupt Services, IPSJ Transactions on System
LSI Design Methodology, Vol.1, pp.48-57,

- 2008
- [2] 花野井歳弘, 稲永健太郎, 澤田直, 安武芳紘,
牛島和夫:産学協同実践教育「プロジェクトベ
ース設計演習」高度化の取組み, 情報処理学会研
究報告, 情報システムと社会環境研究 報告,
Vol.32, pp.163-170, 2009
- [3] ロボスクエア, <http://robosquare.city.fukuoka.lg.jp/>
- [4] 藤田歩, 末広尚義, 佐伯圭介:ET ロボットコンテ
スト 2008 における走行体の特性解析と走行戦略,
東海大学紀要, 情報通信学部, Vol.1, No.2,
pp.15-22, 2008
- [5] 山下博之:小中学生を対象としたロボット競技会
と総合理科教育, 情報処理学会誌, Vol.48,
No.5, pp.502-511, 2007
- [6] タミヤ社, <http://www.tamiya.com/japan/>
- [7] 上野真路, 遠藤登, 北川秀夫:教育用マイコン制
御システムの開発研究, ソフトピアジャパン共同
研究報告書, Vol.9, No.10, 2004
- [8] 麻原寛之, 鈴木匠, 高坂拓司:スパイクノイズが
状態・時刻混合型断続動作特性を有する力学系
に及ぼす影響, 電子情報通信学会論文誌 A, 基
礎・境界, Vol.J92, No.9, pp.596-603, 2009
- [9] 小谷正行, 落水浩一郎:UML 記述の変更波及
解析に利用可能な依存関係の自動生成, 情報
処理学会論文誌, Vol.49, No.7, pp.2265-2291,
2008
- [10] 高久陽平, 林晋平, 佐伯元司:ユースケース記述
からの状態遷移モデル生成, 情報処理学会研究
報告, Vol.2010-SE-167, No.17, pp.1-8, 2010
- [11] C 言語によるオブジェクト記述法 COOL ver.2,
<http://www.sage-p.com/process/cool.htm>
- [12] 南正輝, 猿渡俊介:アプリケーション指向センサ
ネットワーク, 計測と制御, Vol.48, No.7,
pp.548-553, 2009
- [13] 加納梢, 中嶋信生, 大野宏, 石田勉:赤外線セン
サによる人体移動検出特性の検討, 電子情報通
信学会技術研究報告, Vol.108, No.399, pp.1-6,
2009