

## ダイナミックブレーキを用いたヒューマノイドロボットにおける 省エネルギー効果の検証

Verification of Energy Savings in a Humanoid Robot Using a Dynamic Brake

○角田優, 竹田真也, 山野光裕, 鈴木裕一

○Yu KAKUTA, Shinya TAKEDA, Mitsuhiro YAMANO, Yuichi SUZUKAWA

山形大学

Yamagata University

**キーワード** : ダイナミックブレーキ(Dynamic Brake), 消費電力(Power Consumption),  
省エネルギー(Energy Savings), ヒューマノイドロボット(Humanoid Robot)

**連絡先** : 〒992-8510 米沢市城南 4-3-16 山形大学 大学院理工学研究科 機械システム工学専攻  
山野研究室 角田優, Tel&Fax: 0238-26-3238, E-mail: btmr09kk@yahoo.co.jp

### 1. 緒言

ヒューマノイドロボットが自立歩行を行なう際、バッテリーを使用するロボットには小型で軽量のバッテリーが望ましい。また、関節の駆動においても消費電力の少ないことが求められる。一方、DC モータにおいて、モータの両端子を接続し、モータを回転させようとする、その動きに対し制動がかかる。この制動はダイナミックブレーキ、または発電ブレーキと呼ばれている。ヒューマノイドロボットの場合、物を下ろす動作やしゃがむ動作など、ロボット自身や対象物の位置を下げる動作が少なくない。その際、重力による関節の回転をダイナミックブレーキによって適切な速度に抑えることができれば、ブレーキのための電力はほぼ不要であるため、関節駆動用モータの使用電力を減らすことができる。これは、バッテリーで駆動する自立型の移動ロボットにとって、特に有効である。また、関節駆動用モータへダイナミックブレーキを使用することは、ロボットが人や環境などから外力を安全に受け止めることができるため、人間と作業しやすく、安全で、環境になじみやすいロボットを開発するのにも有効である。

ダイナミックブレーキは PWM (Pulse Width Modulation) 信号を利用することで制動力を変えられることがわかっている<sup>1)</sup>。また、山野らは、1 台の PC と複数のマイコンボード

を組み合わせたロボット制御システムを開発した<sup>2)</sup>。この制御システムでは、通常のモータ駆動法に加えて、PWM 信号によるダイナミックブレーキの制御も利用可能になっている。筆者らはこのシステムを使用し、通常のモータ駆動時の電力とダイナミックブレーキを使用した時の電力を比較し、省エネルギー効果の検証を行った。本稿では、電力測定方法と検証のための実験結果を報告する。

### 2. マイコンと PC を用いたヒューマノイドロボットのシステム構成

本研究で使用したヒューマノイドロボットを Fig.1 に示す。ロボットは、全高 1.25 [m]、重量 32.5 [kg] で 21 個の DC サーボモータを搭載している。モータ軸はベルト・プーリによってハーモニックドライブに連結され、333 : 1 に減速される。モータの回転角を取得するために、1 回転 400 パルスのエンコーダを 2 逡倍で使用した。

ロボット制御システムの概要を Fig.2 に示す。PC に目標角、制御時間、ブレーキのデューティ比の値を入力すると、PC はモータ制御用のマイコンボードへモータ指令値やブレーキのデューティを送信する。マイコンボードは、受信データを基にモータを制御する。マイコンの制御ループ内では、エンコーダ値の取得、偏差の取得後、

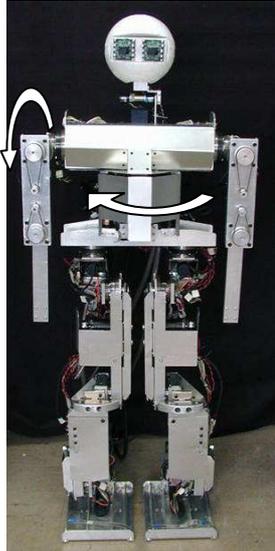


Fig.1 Humanoid robot

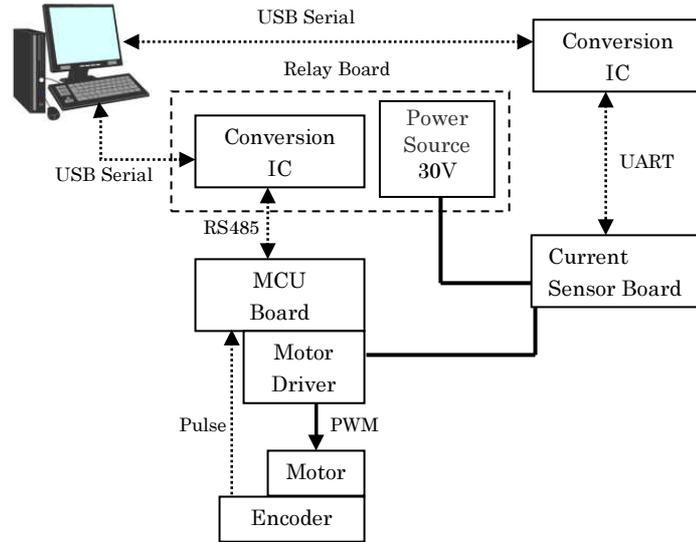


Fig.2 Robot control system

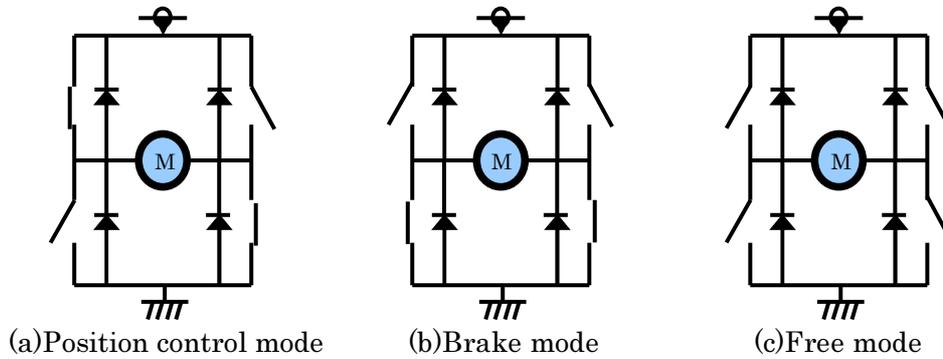


Fig.3 Motor control mode

位置制御モード，ブレーキモード，フリーモードへの条件分岐を行なう．各モードにおける Hブリッジ回路の状態を Fig.3 に示す．また，マイコンボードはエンコーダ値，モータ制御時のデューティ比を PC に送信する．データは RS485 や USB シリアルを用いた通信により，PC とマイコンボードの間で送受信される．通信速度は，マイコンと PC 共に 921600 [bps] に設定した．モータを制御するマイコンボードと PC 間では 16 [Byte] のデータが送受信される．また，電流測定用の電流センサボードと PC 間のデータは，USB シリアルを用いて送受信される．電流センサボードから PC へは 8 [Byte]，PC から電流センサボードへは 1 [Byte] のデータを送受信する．

### 3. 電流測定

ダイナミックブレーキによる省エネルギー

効果を検証するために，ダイナミックブレーキを使用した場合と使用しない場合の消費電力量を比較する．そのため，ヒューマノイドロボットの駆動時の電流測定を行い，電流測定結果から電力量を求める．電流測定には電流センサを用い，マイコンによる AD 変換で電流センサの出力する電圧を読み取る．電流センサは Fig.2 に示すように，モータドライバボードに接続する電源ケーブルに挟んだ．電流センサの出力する電圧は，マイコンで AD 変換され PC に送信される．電流センサボードでは，電流センサを最大 6 個載せることができる．今回用いた電流センサは，ホール効果型の Allegro Microsystems 社の ACS712 である．センサの感度は 185 [mV/A] で，出力誤差は  $\pm 1.5$  [%] である．また，外付けコンデンサを取り付けることでローパスフィルタをつくることができる．ローパスフィルタのカットオフ周波数は 1 [kHz] とした．今回，AD 変換で使用したマイコ

ンは Microchip 社の dsPIC33FJ128MC204 である。AD 変換の分解能は 12 [bit]とした。そのため、電流測定分解能は 4.3 [mA]となる。

## 4. 実験

### 4.1 実験方法

ヒューマノイドロボットに物の移動を行わせ、動作中の電流を測定する。Fig.4 にロボットの動作を示す。Fig.4 の 1 の姿勢を初期姿勢とする。初期姿勢にするために、ロボットの腕を前に振り上げ、右側の土台を向くようにロボットの腰を回転させる。ロボットの右手先におもりを吊り下げ、おもりを土台の上を下ろす。目測で位置の調整を行なったため、肩関節の角度や腰関節の角度に $\pm 5^\circ$ ほどの誤差が含まれる。各関節モータを正転させた時の、各関節の回転方向は Fig. 1 の矢印に示す通りである。ロボットの右手先におもりをつけ、初期姿勢の位置から  $30^\circ$ 腕を振り上げ、腕を振り上げたまま腰を  $100^\circ$ 回転する。その後、振り上げた位置から腕を  $40^\circ$ 振り下ろす。この動作では、腰と肩関節のモータを使用する。腰関節のモータについては常に位置制御で行なうが、肩関節モータは腕を振り下ろす動作において、位置制御及びダイナミックブレーキそれぞれについて行なう。

マイコンの制御周期は 10 [kHz], PWM 周波数は 100 [kHz]とした。位置制御は式(1)を用いて行なった。

$$D = 0.8(E_{ref} - E_{cur}) \quad (1)$$

ここで、 $D$  はデューティ比を表し、0 から 800 としている。デューティ比が 100 % のとき 800, 0 % のとき 0 となる。 $E_{ref}$  は目標エンコーダ値 [パルス],  $E_{cur}$  は現在のエンコーダ値 [パルス] である。

ロボットの全動作における腕の振り上げ、腰の回転、腕の振り下しをそれぞれ一つの動作とする。各動作における目標軌道は、PC で制御時間と目標角を取得し、算出する。目標軌道の算出式を式(2), 式(3), 式(4)に示す。

$$q = at^3 + bt^2 + \theta_i \quad (2)$$

$$a = -2(\theta_f - \theta_i)/T^3 \quad (3)$$

$$b = 3(\theta_f - \theta_i)/T^2 \quad (4)$$

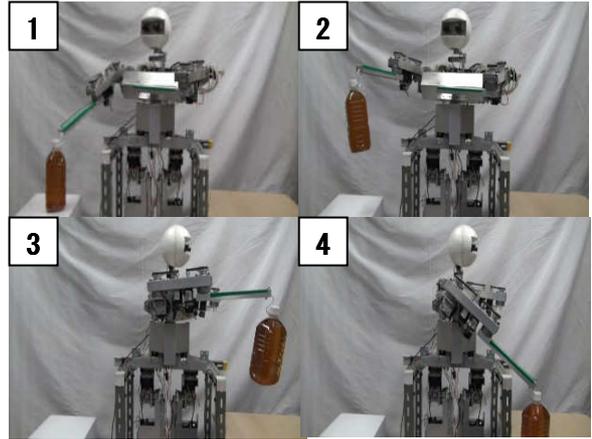


Fig.4 Experiment scene

ここで、各動作における動作時間を  $T$  [s]とする。例として、 $T=5$  [s]の時、ロボットはそれぞれ 5 [s]間隔で腕の振り上げ、腰の旋回、腕の振り下ろしを行う。また、 $t$  は動作中のある時刻 [s],  $q$  はその時刻におけるモータの目標角 [°],  $\theta_i$  は各動作の始点の角度 [°],  $\theta_f$  は各動作の終点の角度 [°]である。また、近似的に電力を求めるために式(5)を、電力量を求めるために式(6)を用いた。

$$P(j) = 30I(j) \quad (5)$$

$$W = \sum_{k=1}^n P(k)\Delta t \quad (6)$$

ここで、 $P(j)$  は消費電力 [W],  $I(j)$  は電流値 [A],  $n$  はサンプリング回数である。また、 $j$  は  $j=1,2,3,\dots,n$  となる。 $W$  は消費電力量 [J],  $\Delta t$  はサンプリング周期 [s]である。マイコンの AD 変換のサンプリング周期は、8 [μs]とした。

$T$  を 5 [s], 7 [s], 10 [s]と変えて、動作の速さによる消費電力量の変化を調べた。また、おもりを 1.0 [kg], 2.0 [kg], 3.0 [kg]と変えて、おもりの違いによる消費電力量の変化を調べた。

### 4.2 結果と考察

$T$  を 5 [s], おもり 1.0 [kg]で物の移動を位置制御のみで行った時の肩関節モータの電流値を Fig.5 に、ダイナミックブレーキを使用したときの肩関節モータの電流値を Fig.6 に示す。Fig.5, Fig.6 において、0 [s]から 5 [s]でおもりを持ち上げ、5 [s]から 10 [s]でおもりを持ち上げながら平行移動し、10 [s]から 15 [s]でおもりを下ろしている。Fig.6 において、10 [s]から 15 [s]で

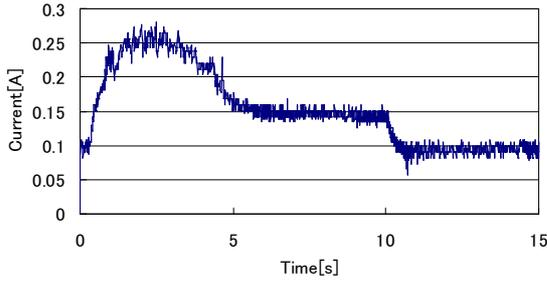


Fig.5 Current when dynamic brake is not used

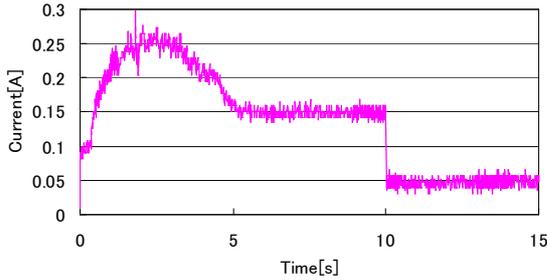


Fig.6 Current when dynamic brake is used

ブレーキを使用している。ブレーキ使用時は0 [A]になるはずだが、0.05 [A]程度の電流が定常的に流れている。本来0 [A]になるはずのフリーモード時、ブレーキモード時、位置制御モードのデューティ比が0 [%]の時にも0.05 [A]程度の電流が検出された。0.05 [A]の電流が流れてしまっている理由は未だわかっていないが、実際に消費している電力としてこの値を含めて消費電力量の算出を行なった。また、マイコンのAD変換のサンプリング周期は、8 [μs]としたが、PCで更新されるAD変換値の周期は8 [ms]だった。そのため、サンプリング周期は8 [ms]として行なった。おもり1 [kg]を下ろすときの  $T$  の違いにおける肩関節モータの消費電力量の比較を Fig.7 に示す。また、全動作を行なった場合のロボット全体での消費電力量の比較を Fig.8 に示す。Fig.7 から、どの  $T$  においてもブレーキを使用したときのほうが電力量は小さい。また、 $T$  が長くなるにしたがって、電力量の差が大きくなっている。そのため、 $T$  が長いほど省エネルギー効果が大きいと考えられる。ロボット全体では、約5.5 [%]から6.6 [%]の省エネルギー効果がみられた。

$T$  を10 [s]にした場合での、各重さのおもりを吊りしたときの肩関節モータの消費電力量を Fig.9 に示す。また、全動作を行なった場合の

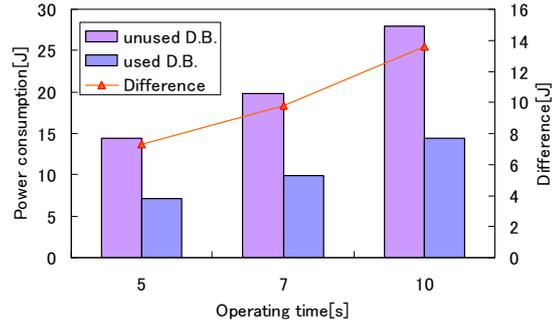


Fig.7 Power consumption of shoulder joint motor when weight of 1.0 kg is unloaded.

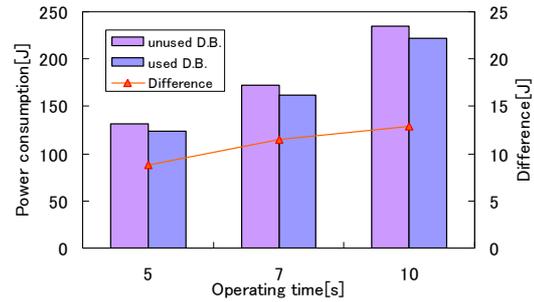


Fig.8 Power consumption of all joint motors when weight of 1.0 kg is unloaded.

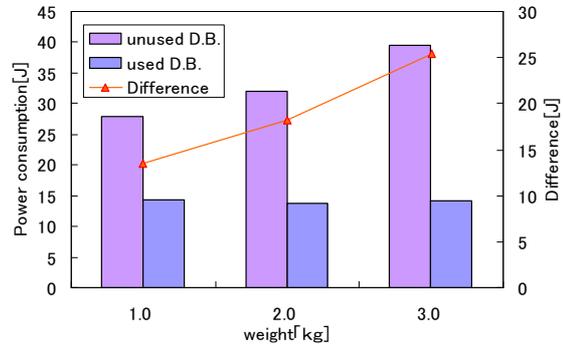


Fig.9 Power consumption of shoulder joint motor when operating time is 10 seconds for a weight changing situation.

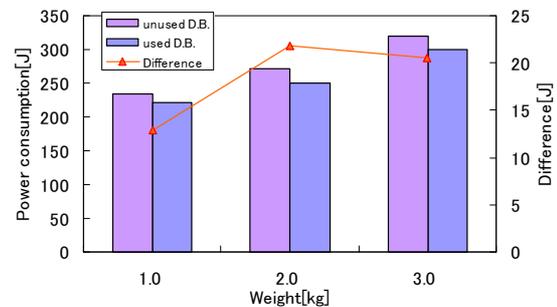


Fig.10 Power consumption of all joint motors when operating time is 10 seconds for a weight changing situation.

ロボット全体での消費電力量の比較を Fig.10 に示す. Fig.9 において, おもりが重いほど電力量の差は大きい. そのため, おもりが重いほど省エネルギー効果が大きいと考えられる. また, ロボット全体で見ても, 5.5 [%]から 8.0 [%]の省エネルギー効果がみられた.

## 5. 結言

電流測定用のロボットシステムで電流を測定することができた. また, 測定した電流値からロボットの消費電力量を求めることができた. 測定結果より, ダイナミックブレーキによる省エネルギー効果がみられた. ダイナミックブレーキを使用することにより, ロボット全体の動作に使用するエネルギーは減ることが検証された.

## 参考文献

- 1) 落合章裕: ヒューマノイドロボット用分散型制御システムに関する研究, 山形大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻 2009 年度修士論文(2010)
- 2) 鈴川裕一: ロボット制御ボードの開発とその応用に関する研究, 山形大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻 2010 年度修士論文(2011)
- 3) Mitsuhiro Yamano, Akihiro Ochiai, Yuichi Suzukawa, Hanafiah Yussof, Masahiro Ohka and Yasuo Nasu : “ Design of a Distributed Control System Using a Personal Computer and Micro Control Units for Humanoid Robots,” Journal of Computer Science 6,8,pp.880–885, 2010.
- 4) 山野光裕, 落合章裕, 鈴川裕一: ダイナミックブレーキを用いたヒューマノイドロボットの関節制動実験, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 資料番号 1A3-2, 2010.