

論文

## 電動自転車のための駆動制御技術

三上和正\*<sup>1)</sup> 坂巻佳寿美\*<sup>2)</sup> 渡邊耕士\*<sup>3)</sup> 李 金山\*<sup>4)</sup>

Drive control technology for an electric bicycle

Kazumasa MIKAMI, Kazumi SAKAMAKI, Kohji WATANABE and Jin Shan Li

**Abstract** The purpose of this research is to develop a control technique which conforms to a person's movement. The force to the pedal of the bicycle was analyzed. Then, the circuit board and software for drive control were designed. This drive equipment was installed in an electrically assisted bicycle. The result made it possible to realize new functions of automatic movement. Moreover, a control method for smooth and comfortable control of a bicycle was developed.

**Keywords** Electrically assisted bicycle, Automatic movement, Smooth and comfortable, Circuit board, Pedal, Drive control

### 1. はじめに

本研究は、企業との共同開発研究という位置づけで、電動自転車のための制御手法及び駆動システムを開発することを目的とした。研究は、人の動作に適合した制御手法を開発するため、自転車用ペダルをターゲットに踏力を解析し、駆動制御用の回路基板とソフトウェアを設計・試作した。そして、この駆動システムを電動自転車へ適応することにより、新たな機能を実現すると共に、滑らかさや快適性などを考慮した制御方式を開発した。

なお、開発に当たり以下の項目を具体的な課題とした。

- 自動走行機能
- 安全装置の検討
- 軽量化、省エネ化への対策
- 駆動制御回路の設計
- 踏み力の測定と解析
- 各種アシストモードの検討
- ソフトウェアの開発
- 駆動システムの試作
- 電動アシスト自転車への適応と評価

### 2. 研究内容

#### 2.1 新たな機能と省エネ対策

##### (1) 新たな機能の開発

###### 自動走行機能

スロットル走行とも呼ばれる方式で、回転型グリップの回転角に比例し、モータの駆動電流を制御することで、パワフルかつ滑らかな自動走行を図る。

###### 無停止型電流制限機能

坂道等における安全性を確保するため、過負荷時やモータの拘束時において、駆動電流を一定値以下に抑制できる電流制限装置を開発する。この機能は、急な坂道や重荷走行時でも無停止状態とするための小さな駆動力を維持するものである。

また、この機能により、異常時における各部品の損害防止等の保護による安全・信頼性の向上も図る。

###### ブレーキ検出機能

センサ付きのブレーキハンドルを採用し、自走防止等の安全走行を確保する。これは、後輪ブレーキ使用時に駆動力を完全にカットさせる機能となる。

#### (2) 軽量化と省エネ対策

##### 軽量化

製品の軽量化を図るため、現在の鉛型バッテリーの型式変更及び容量を多少減少させることを検討する。

##### 省エネ対策

制御回路の消費電力を軽減する方法として、各部の消費電流を測定し、対策を検討する。

#### 2.2 駆動制御システムの設計

既存の電動自転車に対し、新たな機能を有する駆動制御システムの設計・試作を行う。

#### 2.3 制御プログラムの検討

電動アシスト自転車の制御プログラムについては、共同研究企業において既に開発済みのものがあり、それを基に“人に優しい”アシスト制御を開発することを目的

\*<sup>1)</sup> 電子技術グループ \*<sup>2)</sup> 情報システム技術グループ

\*<sup>3)</sup> 電子技術グループ(現企画普及課)

\*<sup>4)</sup> (株)日本リサイクリングシステム

とした。具体的事項は、電動アシスト自転車に於ける「人に優しい」アシスト制御として、「滑らかな制御」と「心地よいアシスト感」の2点に着目して検討を行う。

2.4 評価実験用アシストモードの検討

「滑らかな制御」と「心地よいアシスト感」に影響のありそうな箇所として、アシストトルク変換表の見直し、最適アシストトルクを計算してPWM出力を司るタイマーカウンタの割込周期の変更、計測した踏力データから滑らかな変化分を抽出するための累積データ数及び平均化アルゴリズムの検討を行う。

2.5 評価方法(テスト走行)

「滑らかな制御」も「心地よいアシスト感」にしる、感性による評価となる場合が多い。機械的計測による明確な評価方法を模索したが、適当な方法が見つからなかった。そのため、産技研から8名、共同研究企業から7名の合計15名の被験者による試乗評価を行い、その結果を集計し比較検討する。

3. 実験・開発の結果

3.1 駆動制御システムの開発

新たな機能を有する電子制御回路を設計した。それは、2つのモード走行を可能とし、さらに各種検出機能及びスイッチ入力/表示回路から成る駆動制御システムとして設計・試作を行った。その駆動システムの概略を図1に示す。

スロットル回路は、ハンドルの回転角に応じて検出電圧を発生し、自動走行モード時にモータに与える操作量を決定するための入力信号となる。

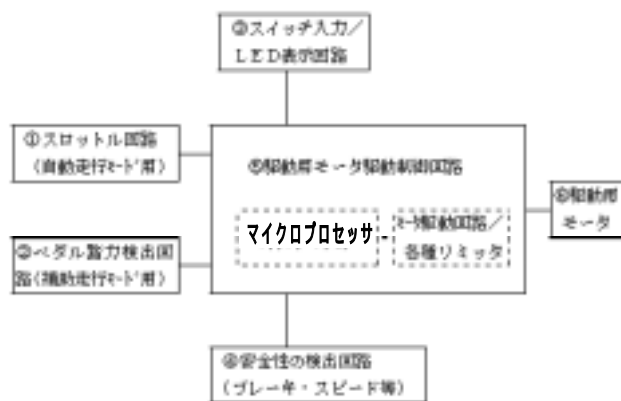


図1 駆動制御システムの構成

ペダル検出回路は、磁気センサ(ホール素子)により人の踏み力を検出し、補助走行モード時のアシスト量を決定するための入力信号となる。

スイッチ入力/LED表示回路は、電源のON-OFF、2つの動作モードを含む各種走行モードの選択入力、及びバッテリーの残量の表示を行っている。

安全性の検出回路は、ホール素子を用いブレーキ操作の有無及び歯車の速度を検出し、処理回路を経てデジタル信号として、直接CPUに入力される。

駆動用モータ駆動制御回路は、アナログ入力付CPUとFETによるモータ駆動回路から構成されている。CPUは、各種検出回路からの信号の取り込みと内蔵ROM(ソフトウェア)により、的確に制御された駆動電流を発生・維持する。別途に、駆動電流を検出することで、モータの焼損、バッテリー及び電子回路の不具合等の保護リミッタとしての機能を兼ね備えている。

駆動用モータは、後輪軸に直結したハブドライブ式を採用した出力160WのDCブラシモータである。

省エネへの対策

バッテリーの消費を軽減するため、駆動回路の消費電力を検討した。その方法として、待機時における各部の消費電流を測定した。その結果を表1に示す。

表1 消費電流の測定値(モータ無、DC26V)

|        |        |           |       |
|--------|--------|-----------|-------|
| 動作時    | 待機時    | 待機時(CPU無) |       |
| 93.2mA | 55.2mA | 50.3mA    |       |
| 磁気センサ  | 信号処理部  | 電源IC      | 残量検出部 |
| 33mA   | 10mA   | 6.1mA     | 1.5mA |

測定結果より、待機時における磁気センサー、信号処理部及び残量検出部を切断することで、約43mAの電流を節減することが可能となった。そのためのアナログスイッチ回路の挿入とソフト変更を行うこととした。

3.2 駆動制御回路の試作

試作した駆動制御回路には、3つの機能(自動走行機能、無停止型電流制限機能、ブレーキ検出機能)を実現することができた。さらに、従来のディスクリット部品を改め、省スペース化を目的にチップ部品実装として試作した制御回路基板(図2参照)を電動自転車に搭載した。

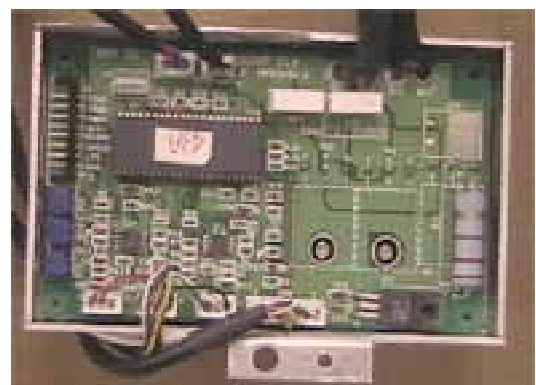


図2 試作した制御回路基板

3.3 制御用プログラムの開発

制御プログラムは、採用した8ビット・ワンチップマイコン専用の言語で記述し、main及びtime等合計5本の関数による構成とした。

各関数の機能を以下に記す。

- main：各種機能の初期設定，ウォッチドッグタイマの設定と起動
- time0：タイムベースタイマによる割込処理ルーチン ON/OFFスイッチの監視とLEDによる表示
- time1：タイマカウンタ1による割込処理ルーチン 速度（パルス幅）と足踏みトルクの計測，割込周期
- time2：タイマカウンタ2による割込処理ルーチン 速度とペダル踏力の測定
- time3：タイマカウンタ3による割込処理ルーチン 速度0（停止状態）の検出

3.4 評価用アシストモードの考案

トルク換算表，タイマーの設定値，累積データ数及び平均値アルゴリズムの検討を行った。そして，それらの組み合わせによる評価用アシストモードとして7種（No.0～No.6）を考案した（表2参照）。各モードは，デジタルスイッチで選択し，設定・実行できるよう評価実験用制御プログラムとして開発した。

表2 評価実験用アシストモードの設定内容一覧

| モード名 (略号) | トルク 変換表           | タイマー 設定値 | 累積データ数 | 平均処理 アルゴリズム        |
|-----------|-------------------|----------|--------|--------------------|
| No. 0     | 旧表                | 25ms     | 8個     | 旧方式 <sup>*1</sup>  |
| No. 1     | 新表1 <sup>*2</sup> | 25ms     | 8個     | 移動平均 <sup>*3</sup> |
| No. 2     | 新表1               | 100ms    | 8個     | 移動平均               |
| No. 3     | 新表1               | 125ms    | 8個     | 移動平均               |
| No. 4     | 新表1               | 100ms    | 20個    | 移動平均               |
| No. 5     | 新表1               | 100ms    | 8個     | 移動平均               |
| No. 6     | 新表2 <sup>*3</sup> | 100ms    | 20個    | 移動平均               |

(注) No. 2とNo. 5は、評価結果の信頼性を検討するために、あえて同一内容としてある  
 \*1: 新しく作成したもの、\*2: 旧表サイン補正  
 \*3: 8個固定の累積平均、\*4: 100ms毎の移動平均

(1) アシストトルク変換表の見直し

アシスト量は、人の足によるペダルの踏力の大きさまでを最大限度とするように道路交通法により規定されている。また、時速15km/hを越える速度においては、図3に示すようにアシスト量の制限が決められている。そのため、ある瞬間のアシスト量の上限は、その時のペダルの踏力と速度によって決まることになる。本制御プログラムでは、リアルタイムにこれらの演算処理を行わず、予め変換表を作成しておき、表参照方式により、最適アシスト量を算定している。そのため、アシスト変換表の内容をどのようにするかによって、アシ

スト感に大きく影響を与えることになる。

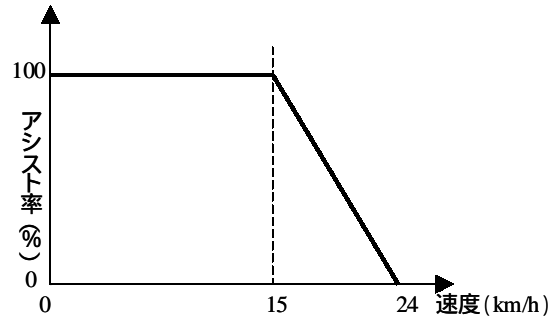
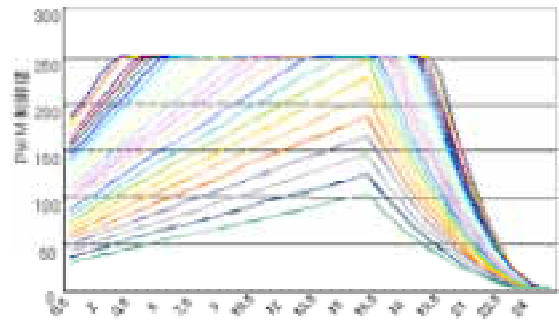
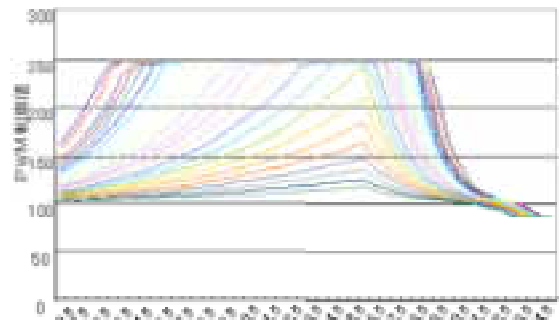


図3 アシスト率に関する規定

制御対象となる自転車に搭載されている踏力センサとモータの特性およびタイヤの径など、幾つかのパラメータを考慮し、アシスト変換表を作成するプログラムがあり、これを用いて図4(a)に示すような変換表を作成した。また、発進時などで速度が遅い時、および高速の加速時などにおけるアシスト量の物足りなさを補うために、図4(b)に示す補正を行った変換表についても検討した。



(a) 新たに作成した換算表：横軸は速度(km/h)



(b) 補正を行った換算表：横軸は速度(km/h)

図4 アシスト変換表

(2) タイマー周期の変更

当初は、周期25ms毎に最適アシスト値の計算を行い、モータに与えるPWM制御値とした。しかし、あまりに細かい時間間隔で制御量を変化させることは滑らかな制御を行うため適さないと考え、周期として100msと

125msの2種類を追加し評価を行った。

(3) 平均化処理の改善

規定では、ペダルの踏力と同等のトルクまでアシストすることが認められている。そのため、正確なペダル踏力の計測が必要となる。一方、ペダルを踏む力は一様でなく、半回転毎に左右のペダル交互に変化することが予測できる。

以上から、滑らかな制御を行うためには、平均化処理が重要となる。ここで、旧方式のプログラムを検討した結果、計測したペダル踏力データを図5(a)のように8個単位毎に区切って算術平均処理を行っていることが判明した。しかし、この方法では、8個毎に平均化処理が完結してしまうため、平均化処理の継続性が保たれず、滑らかな制御は望めない。

そこで、図5(b)に示すように、常に一定個数ずつをFIFO型のバッファに詰め込み、移動平均処理を行うように改善した。

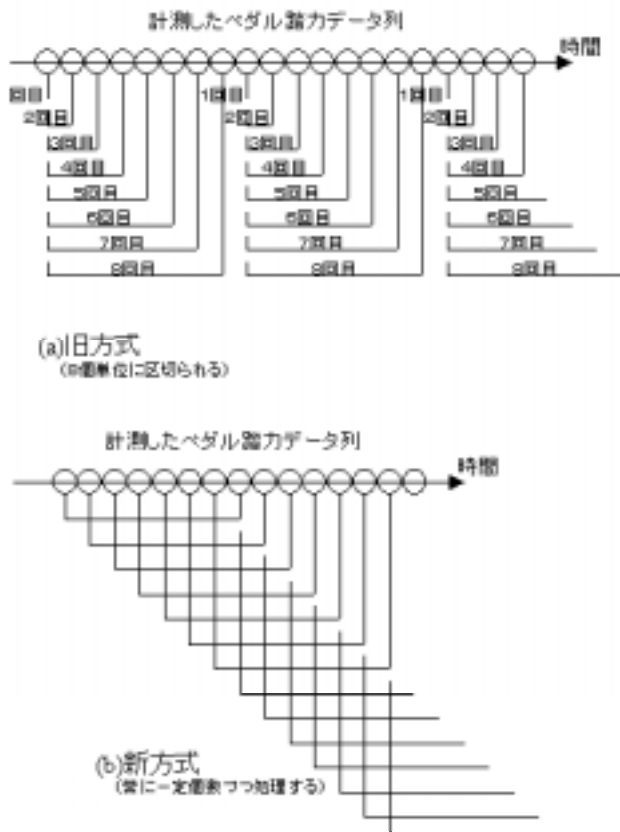


図5 平均化処理の改善

(4) 累積データ数による影響の検討

次項の平均化処理で累積するためのデータ数を幾つにするかも重要である。この数を増加させることにより、細かな変動を平均化(積分処理)して滑らかな変化とすることができる。しかし、必要以上に多くすると、演算処理に時間がかかることになるため、マイコンの処理能力との兼ね合いとなる。本評価実験用としては、既存の8個の他に20個を試すことにした。20個とは、ペダルを一回転させる間取り込まれる平均デー

タ個数であり、最も平均化に適した数と思われるからである。

(5) シミュレーション

平均化処理に関してシミュレーションを行った。その結果を、図6に示す。テストコースを走行したときの踏力データを使用し、平均化アルゴリズムと併記するデータ個数を変えて行った。それぞれのシミュレーションカーブには、Y軸に50づつのオフセットを加え、グラフがダブらないように表示してある。また、速度データは、参考に入れた。

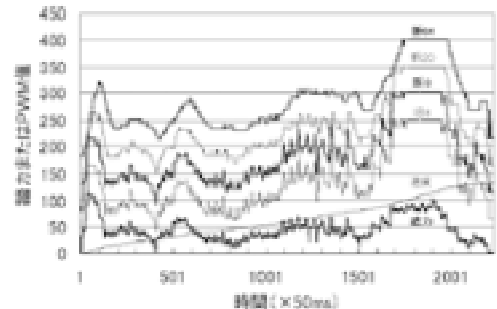


図6 平均化方式のシミュレーション結果

平均化アルゴリズムの比較は、ともにデータ個数8個で行った。旧アルゴリズムでは、8個単位で細かなヒゲ状の突起が見られるが、新方式においては、減少していることがわかる。

一方、平均化するデータ個数については、8個、20個、64個の3種について行った。個数が増えるに従ってより滑らかになることは当然である。しかし、64個にもなると、踏力の変化との遅れが大きくなり、アシストに違和感が生じるようになった。

3.5 走行テストの結果

(1) 評価手法

評価手法としては、表2に示した各評価実験用アシストモード毎に、発進時、加速時、急加速時、平坦走行時、登坂時における「滑らかな制御」と「心地よいアシスト感」について、5段階評価とした。

(2) 評価結果

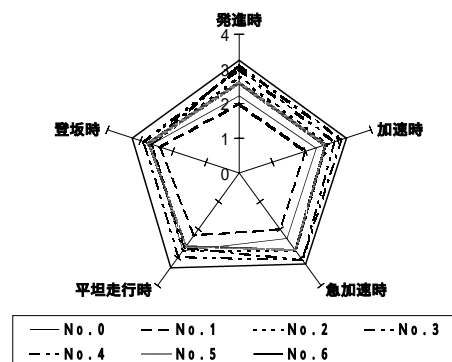


図7(a) 評価結果「滑らかな制御」

先の表2に示した評価実験用アシストモードの設定内容に従い評価実験を行った。その結果、図7(a)に示した「滑らかな制御」に関する各アシストモードにおいて、次のことが明らかになった。

No.0 と No.1 では、トルク変換表と平均化処理アルゴリズムが異なっているにもかかわらず、似たような傾向を示している。特に、平坦走行時と登坂時の評価が上がっているのが特徴的であり、タイマーの設定値25ms が関係しているものと推測する。

No.1, No.2, No.3 では、タイマーの設定値のみが異なっている。これらは、発進時、加速時、急加速時までに優位差があるものの、同じような傾向を維持している。しかし、平坦走行時と登坂時に関しては、タイマーの設定値が大きくなる程、評価が低下する傾向がある。No.3 の 125ms は必要以上に大きすぎたと推測できる。

No.2 と No.4 では、累積データ数が異なっている。この両者は、全評価項目において同じような傾向を示しており、データ個数の多い方 (No.4) が良い評価となっていることが明らかである。

No.4 と No.6 の比較では、トルク変換表が異なっている。この場合には、サイン補正を行ったトルク変換表を採用した No.6 の優位が明確となっている。

以上 ~ から「滑らかな制御」を行うためには、表2内に示す新表1 (または新表2)、タイマーの設定値は100ms、累積データ数は20個、そして移動平均を採用したNo.4 (またはNo.6) が適当と言うことになる。

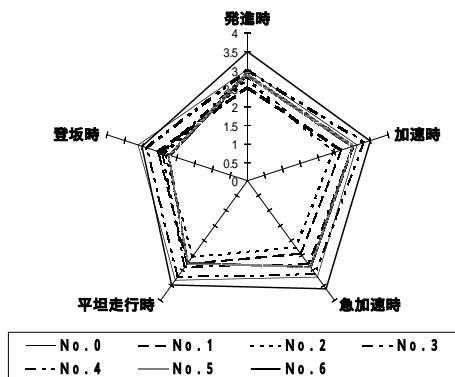


図7(b)評価結果「心地よいアシスト感」

次に、図7(b)に示した「心地よいアシスト感」についての評価実験結果については、No.2モードとNo.5モードの評価が、発進時と平坦走行時、登坂時以外は大きく異なっている。その結果、加速時、急加速時の評価は、かなり微妙なものであると判断できる。

No.0 と No.1 では、先の「滑らかな制御」の時とは正反対の結果となっている。

No.1, No.2, No.3 の比較では、No.1 と No.2 が逆転してはいるものの No.3 の優位は「滑らかな制御」の場合と同じである。また、登坂時の評価低下についても共通している。登坂時の「心地よいアシスト感」とし

ては、タイマーの設定値を小さくして、キビキビした応答が望まれているようである。

No.2 と No.4 では、累積データ数の多い方 (No.4) が、明らかに良い評価となっている。これについては、「滑らかな制御」の時と同じである。

No.4 と No.6 の比較では、「滑らかな制御」の時と同じく、サイン補正を行ったトルク変換表を採用した No.6 が優位となっている。

以上 ~ から「心地よいアシスト感」を得るためには、新表2、タイマーの設定値は25ms ~ 100msの間、累積データ数は20個、そして移動平均を採用したNo.6 が適当と言うことになる。「滑らかな制御」の時、あまり評価の高くなかった No.0 が、「心地よいアシスト感」の評価に於いて上位になっている。

#### 4. まとめ

##### 4.1 新たな機能の実現

###### 自動走行機能

スロットルグリップの回転にあわせ、滑らかに駆動走行を行う機能を実現した。

なお、この機能は法的規制の緩いヨーロッパ仕様を対照にした新走行モードであり、日本国内での公道使用には規制がある。

###### 無停止型電流制限機能

急な坂道や重荷走行時でも無停止状態となることが避けられ、安全走行を確保できるようになった。また、異常時における部品や装置の焼損、及びバッテリーの保護が可能となった。さらに、後輪拘束テストを実施し、ヒューズ切れのトラブルを無くした。

###### ブレーキ検出機能

後輪ブレーキ使用時に駆動力を完全にカットでき、非常時の安全性が増した。

###### 軽量化

鉛型バッテリー (10 kg) を、ニッケル水素型バッテリー (3.5 kg) に仕様変更し、約 6.5 kg の軽量化を実現した。

なお、本項の考案等に関し、企業と共同で特許願中である。(発明の名称：電動自転車及びその走行制御方法、出願番号：特願 2000-285609)

##### 4.2 人に優しい制御の実現

人に対する「滑らかな制御」と「心地よいアシスト感」を実感できる要因を追求するため、7つの走行モードについて評価実験を行った(表2参照)。

評価実験の結果から、「滑らかな制御」に比べて「心地よいアシスト感」の評価結果が一様にならない

ことが分かった。「心地よいアシスト感」の方が、感性に依存する傾向が強いためと考えられ、被験者の個人差が、そのまま現れた感があった。

さらに、被験者の意見として、「発進時のアシストを弱くしてほしい」と「発進時のアシストに欠ける」の相反するものがあった。このことから、多くの人に共通する「心地よいアシスト感」をたった1つだけのアシストモードによって与えることは、不可能であった。

そのため、幾つかのアシストモードを、ユーザの好みに合わせて、選択して使用出来るような製品開発をするのが望ましい。その候補として下記の名称を考えた。

- ノーマル：人に優しいアシスト（一般車，実用車）
- パワー：瞬間的に大きなアシスト（法規制あり）
- スポーツ：アシスト効果を適時に利かせる（競技用）
- エコノミー：各所のアシスト力を弱め、バッテリーの消費を抑える（健康用）
- ヘルシー：モータを発電制御する負のアシスト（健康具，ダイエット用）/今回は不採用

#### 開発した電動自転車



図7 新機能を搭載した電動自転車

- 主な仕様
- タイヤサイズ：26インチ
- 重量：25kg
- 駆動方式：ハブドライブ
- 定格出力：160W
- モーター：DCブラシ式
- 充電時間：4時間
- バッテリー：Ni-MH(24V-7Ah)
- 走行モード：ペダルアシスト又はスロットル

以上、本共同開発研究によって、4つの新たな機能を実現し、優しい制御として5つのアシストモードを提案することができた。そして、新たな機能としてスロットルやブレーキ等の新システム及び新バッテリーを搭載した電動自転車（図7参照）を開発した。

今後、本研究による人に優しいアシスト制御の技術は、電動車椅子や各種介護機器の制御に適用することが可能である。

（原稿受付 平成13年7月31日）