

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「電動自転車、電動バイク用センサーレス・モータ・
コントロール組込みソフトウェア開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 よこはまティールオー株式会社

研究開発成果等報告書目次

第1章 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3 頁

(2) 研究の目的及び目標・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 頁

1) 目的及び目標・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4 頁

2) 研究の実施結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5 頁

1-2. 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5 頁

1) 研究組織（全体）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5 頁

2) 管理体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6 頁

(2) 管理員及び研究員・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7 頁

1-3. 成果概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8 頁

1-4. 当該研究開発の連絡窓口・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9 頁

第2章 本論

2-1. センサーレス・モータ・コントロール搭載のために最適な車体と

インホイール・モータの構造及び電装系の開発・・・・・・・・ 10 頁

2-2. モータ磁極位置検出方法の確立・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12 頁

2-3. 矩形波駆動方式による超低速（1.3cm/秒）での位置検知の確立・・ 14 頁

2-4. 正弦波駆動（ベクトル制御）による位置検出・・・・・・・・・・ 15 頁

2-5. 実車試験用測定器と電動自転車負荷装置の協調評価・・・・・・・・ 17 頁

2-6. 高出力モータを搭載した車両への

センサーレス・モータ・コントロールの適用研究・・・・・・・・ 19 頁

2-7. 低コストのモータ・コントローラ専用 IC 回路の開発・・・・・・・・ 19 頁

2-8. 機能安全性に関する評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21 頁

第3章 総括

3-1. 工業所有権の取得状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22 頁

3-2. 研究開発成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22 頁

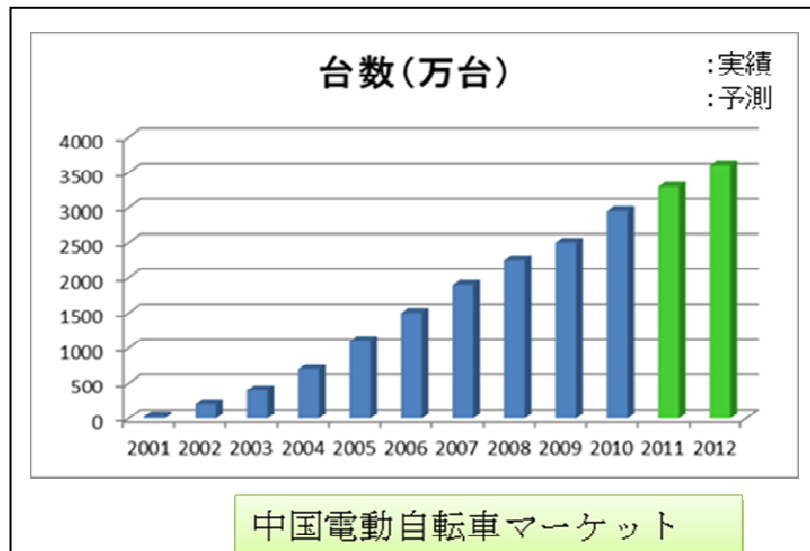
3-3. 事業化展開・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23 頁

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

ガソリン・バイクに代わり自走式電動自転車の普及が著しい、特に、中国においては、自走式電動自転車は、3,000万台／年も製造されている巨大マーケットである。(図1参照)



【図1 中国の電動自転車マーケット】

上記の巨大マーケット向けに開発する電動自転車、電動バイク用のモータ・コントロールでは、車輪とモータが一体となったインホイール(In-Wheel)モータを使用。このインホイール・モータでは、振動、温度、浸水を受けて内部のホールセンサーが特性不良を起こしやすい。また、従来のセンサーレスでは、モータ逆起電力を利用してモータ回転子位置情報を得て、モータ・コントロールしている。

しかし、

- ①モータ停止状態では、逆起電力が発生しないために回転子位置が分からない。そのため、停止状態からの起動は、50%対50%の確率で前進(正転)、後進(逆転)を起こす。
- ②車速が超低速(約1cm/秒)では、モータからは微小な逆起電力しか得られなく、モータ制御が出来ない。
- ③坂道発進で、後進(逆転)から前進(正転)の切り替えが素早くスムーズに出来ない。

これらの課題に対して、

- ①モータ停止状態での位置検出開発。モータ停止時は、逆起電力が発生しないので、モータが回転しない程度の短時間(60ms)の高周波テスト電流を流して、モータ回転子位置を検出し停止時からの運転を実行する。
- ②従来は超低速では逆起電力が小さいため、正確に位置検出出来なかったが今回の開発により、超低速時(約1cm/秒)でも正確にモータ位置を検出するアルゴリズム確立する

- ③坂道発進時に、後進（逆転）している状態から前進（正転）への素早い切替を実現する
 ④ロバスト設計。組込ソフトウェアの中にベクトル制御を組み込み、モータ誤動作の瞬時検出、瞬時回復を実現する

このような新センサーレス・モータ・コントロール組込ソフトウェアを用いて、今後、非常に将来性があり、これからの環境に良い乗り物として注目されている電動自転車、電動バイクのセンサーレス・モータ・コントロールを開発試作する。本計画ではその問題点を解決できるセンサーレスモータ制御アルゴリズム・組込み用ソフトの開発を目指す。自走式電動車両の使用環境（温度、振動、浸水等）に強いロバストなものを開発する。

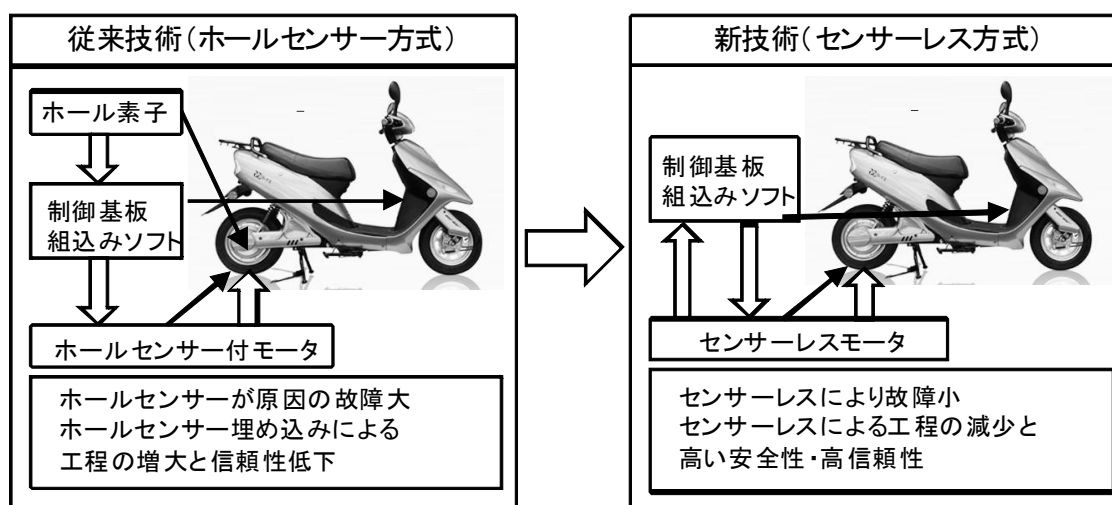


図1. 2A.従来技術

図1. 2B.新技術

（２）研究目的及び目標

１）目的及び目標

環境対策、CO₂削減からガソリン・バイクに代わり自走式電動自転車の普及が著しい、特に、中国においては、自走式電動自転車は、3,000万台／年も製造されている巨大マーケットである。しかし、現状の電動自転車、電動バイクのモータ・コントロールでは、ホールセンサーを使用しているため、高温ではセンサー動作不良を起こし易い。本研究開発の目的は、ホールセンサーを使用しないモータ・コントロールを開発することにより信頼性の向上（機能安全確保を含む）、誤動作を起こさない安全性の確保を実現して、利用品質を飛躍的に向上させることを目的とする。その結果、重大事故を引き起こさない障害対応の設計思想やシステム、これらに対応したソフトウェア技術を飛躍的に向上させる。具体的には、ホールセンサー起因故障3%から0%にすることにより、製品全体の故障率を半減する。このような研究開発を行うことにより、今後の電動自転車・バイクの安全性、信頼性の向上を目指した開発、製造に寄与することを目的とする。

2) 実施結果

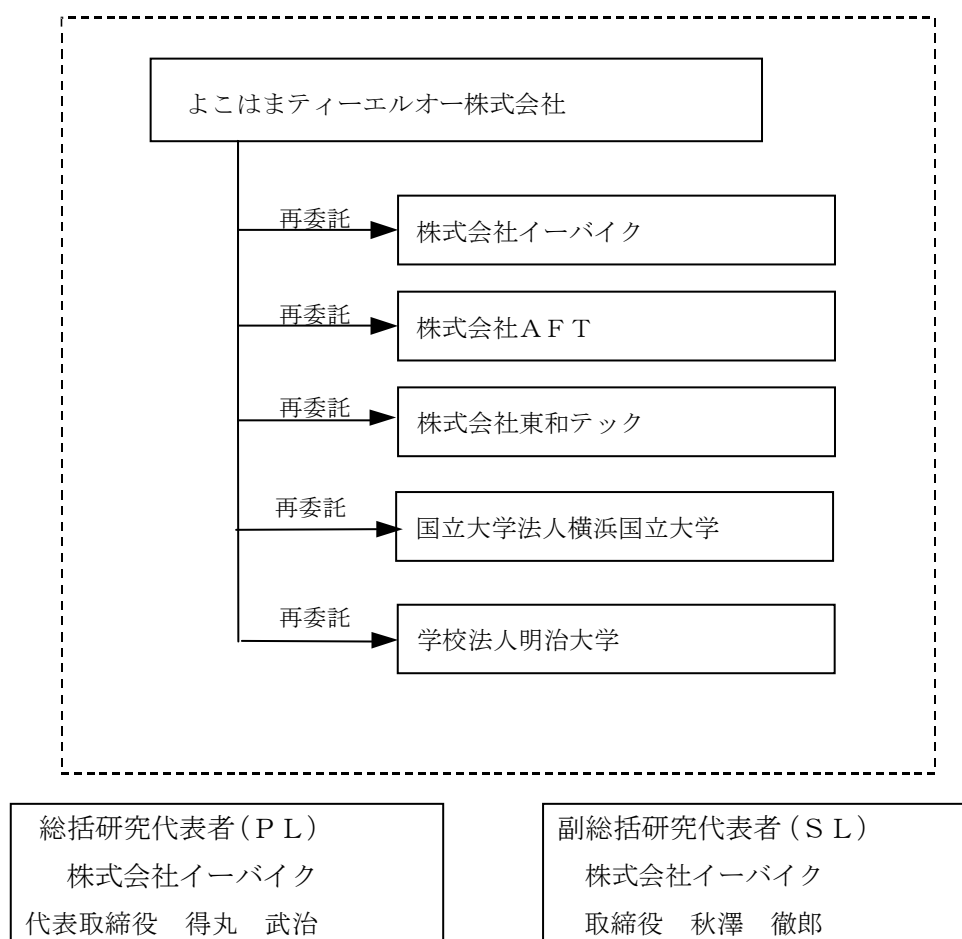
センサーレス・モータ・コントロール組込みソフト開発において、一番難題だったロータ磁極位置推定アルゴリズムを確立した。そのアルゴリズムにて組込みソフトを開発して、電動自転車実機に搭載、予定通り動作することが確認出来た。更に、試験評価において、路上試験データを実験室内のモータ試験機にデータを移して、路上運転の再現性も確認出来た。これにより、路上モータ試験の評価・解析が大幅に便利になった。更に、開発品の事業化においてはコストが極めて重要なために、低コスト化の研究も行い、シミュレーション・ベースでは、低コスト回路図を作成出来た。これによりコストダウンの方策を確立した。

更に、安全性の確立の為に機能安全性の調査も行い、その調査結果に基づき安全性の机上チェックを行い、安全システムが装備されていることを確認した。

1－2．研究体制

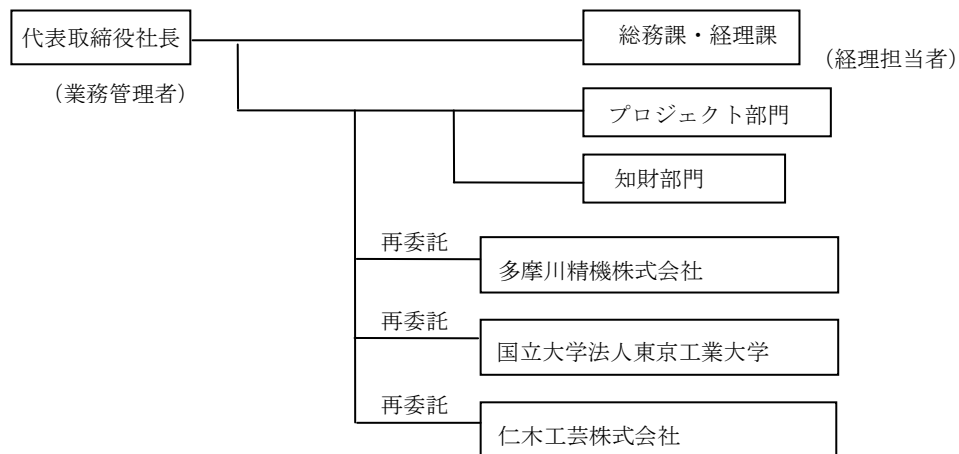
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



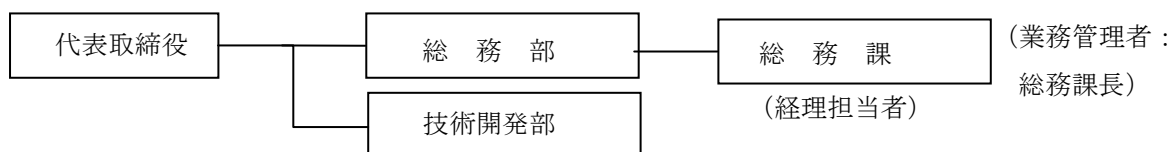
2) 管理体制

①事業管理機関 [よこはまティーエルオー株式会社]

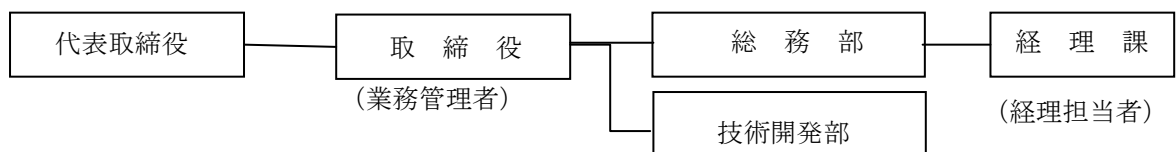


② 再委託先

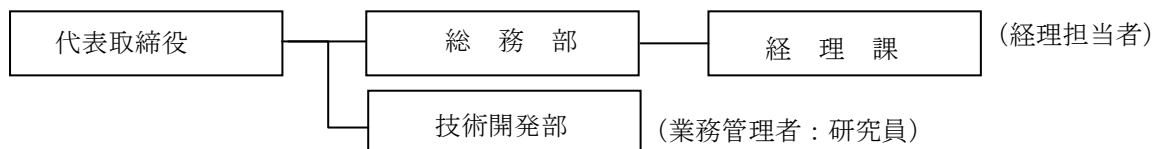
[株式会社イーバイク]



[株式会社AFT]

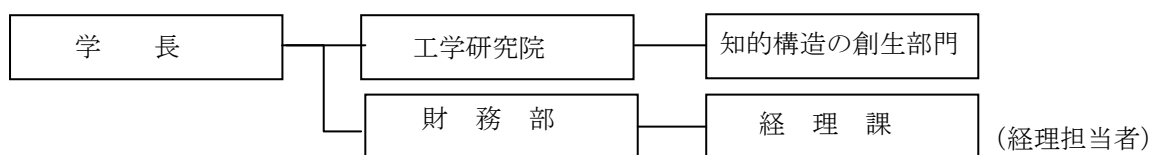


[株式会社東和テック]

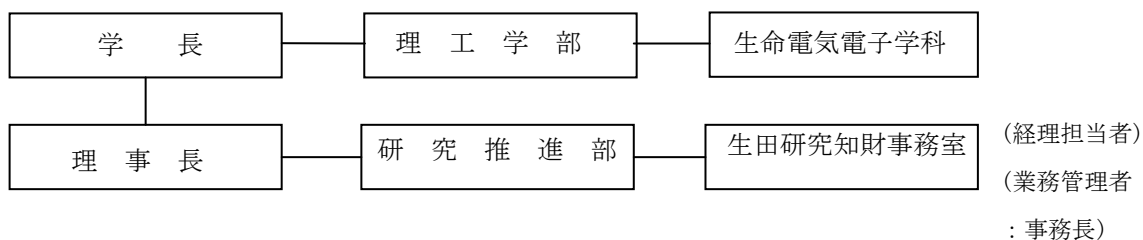


[国立大学法人横浜国立大学]

(業務管理者：准教授)



[学校法人明治大学]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 よこはまティーエールオー株式会社

①管理員

氏名	所属・役職
岡林 光志	プロジェクト部門 部門長

【再委託先】

(研究員)

株式会社イーバイク

氏名	所属・役職
得丸 武治	代表取締役 (本社&横浜鶴見実験室)
秋澤 徹郎	取締役 (横浜鶴見実験室)
土屋 二三夫	技術開発部 研究員 (磐田事務所)

株式会社A F T

氏名	所属・役職
津国 恒二	代表取締役

株式会社東和テック

氏名	所属・役職
小澤 茂雄	代表取締役

国立大学法人横浜国立大学

氏名	所属・役職
藤本 康孝	工学研究院 知的構造の創生部門 准教授

学校法人明治大学

氏名	所属・役職
久保田 寿夫	理工学部 生命電気電子学科 教授
小林 直樹	研究推進部 生田研究知財事務室 知的財産マネジャー

1-3 成果概要

①ロータ磁極位置検出の確立と脱調検出から正常制御への瞬時回復を可能とするアルゴリズムの開発。

ロータ磁極位置検出は、高周波電流をU相、V相、W相に重畳して、各相に流れる電流分析により磁極位置推定アルゴリズムを確立した。電動バイクに磁極位置推定アルゴリズムに基づいた組み込みソフトウェアを搭載して、理論値と実験値が一致して、良好な結果が得られた。また、高周波電流を重畳することによる高周波の騒音問題は、キャリア周波数を9KHzにすることにより騒音がしなくなり、騒音問題は解決した。

②坂道発進時における後進から前進の瞬時（100ms 以内）切替え可能なアルゴリズムの開発
坂道発進対策のアルゴリズムにおいて、坂道発進で後進から前進の瞬時切替えの技術を確認した。後進から前進時の超低速状態で、モーター・ロータ位置検出が出来ない場合があり脱調が起きる。この問題に対策として、脱調検出と脱調からの瞬時回復とするアルゴリズムを実装して完全なアルゴリズムとした。

③実車試験用測定器と電動自転車負荷装置の協調評価

実車試験用測定器を使用して路上試験データを採取（USB格納）し、実験室に設置している電動自転車負荷装置にデータ転送（USBにて）を行い実験室レベルでの路上試験の忠実な再現方法を実現した。これにより、路上試験データを実験室環境で再現させ、解析出来るようになった。

④高出力モーターを搭載した車両への適用研究

モーター出力 600W～2KW 程度の高出力モーター用のセンサーレス・モータ・コントロールを開発した。実車による試験として累計距離 285Km 走行させ問題がないことを確認した。

⑤低コスト化のための専用 IC 開発

コスト低減を図るため、部品点数の削減及び専用 IC 化の研究を行い部品点数を削減したモータ・コントローラ回路を開発した。

開発環境として、MATLAB/Simulink を利用した専用開発システムを開発し、低コスト専用 IC 回路の動作確認、評価を行った。

⑥機能安全性に関する評価

日本と中国の機能安全性評価基準を調査し、ISO26262 に基づく評価試験を実施した。
本プロジェクトでは、異常を検出して制御する組込みソフトウェアと異常を通知する要求システムの機能安全性を確立する事に絞って機能安全チェックリストを作成して机上チェックを行った。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

①研究機関

株式会社イーバイク

代表取締役 得丸 武治 toku2844@k9.dion.ne.jp

電話&FAX：045-511-0900

②事業管理機関

よこはまティールオー株式会社

プロジェクト部門 部門長 岡林 光志 oka-ytlo@ynu.ac.jp

TEL：045-339-4441 FAX：045-340-3541

第2章 本論

2-1. センサーレス・モータ・コントロール搭載のために最適な車体とインホイール・モータの構造及び電装系の開発

(1) 中国及び日本における電動バイクの動向

研究開発の目標を明確にするために、中国と日本の電動バイクの車体とメーカー動向を調査した。

表 1

【中国】		
出力	150W・200W・250W・350W・500W・600W・1000W・3000W・5000W	
電圧	12V・24V・36V・48V・60V・72V(出力600W相当まで)	
駆動方式	インホイールモーター(シェア99%)、DDモーター+CVT方式	
中国では、ほぼ添付の車体資料※に集約される。基本的にはガソリン車の流用。		
※車体A・車体B・車体一覧		
エンジン部分をインホイールモータに変えただけ。価格も安い(日本の1／5以下)		
インホイールモーター以外の駆動方式を持つ車体はあまり見当たらない		
価格は以下の通り		
250W以下の自転車タイプで12000円～		
600Wバイクタイプで30000円～80000円		
【日本】		
日本メーカーは、中国車の輸入業者が非常に多い。		
開発メーカーは非常に少ない。ベンチャー・中小企業では独自開発の成功例は少ない		
【独自開発】	①ヤマハ発動機	600W
モーター仕様は 原付規格(600W) タイプのみ	②ホンダ	600W(未発売)
	③スズキ(三洋電機)	600W(未発売)
	④APAXPower(東京)	600W(CVTユニット)
	⑤オーシャンエナジーテクニカ(熊本)	600W
	⑥フジヤ(徳島)	600W
【輸入業者】	プロスタッフ(岐阜)	
※中国の輸入品	テラモーターズ(東京)	
モーター出力は (600W～3000W)	スクーテックジャパン(東京)	
	コムテック(埼玉)	
	ベネフィット(愛知)	
	東京マルイ(東京)	
	JSK(愛知)	
	アシスト(山梨)	
	日本テクノ(東京)	
	※その他、小規模な会社が10社程度あり	

(2) 電動バイクの国内法規調査

電動バイクの法律を調査し、正しい知識を習得することで、製品開発に活かす。関連すると思われる下記の法規を入手した。

①自動車の型式指定申請等におけるタイヤ安全性の確認について

運輸省自動車局技術安全部、 自審第581号 平成6年5月9日

②二輪車のフェアリング技術基準について

運輸省自動車整備部 57自技発第185号 昭和57年4月28日

③原動機付自転車用電動機の定格出力の試験方法について

運輸省自動車交通局 自審第1328号の2 平成5年11月1日

④第一種原動機付自転車の速度性能の抑制等に関する措置について

運輸省自動車局 自車第998号 昭和57年12月10日

(3) 鉛電池特性調査及び残量推定アルゴリズムの研究

電動バイクに多く使用されている鉛電池について、特性を測定し、残量推定のアルゴリズムの参考にした。

結論：中国製電動バイクの残量計は、電圧計となっているが、上記の様に電圧をモニターしても変化が大きく、正確な残量は計れない。

今回の残量推測は、一定時間内の電圧減衰値を積分し、一定のゾーンを設定することにより、残量を推測するアルゴリズムで進める。

アルゴリズムにおいて、電源投入直後、充電中、急加速などの電圧上昇時の変化は除外する。

図3は、研究開発に使用した電動自転車。



図3. 研究開発用の電動自転車

2-2. モータ磁極位置検出方法の確立

モータを駆動する方法として、矩形波駆動方式と正弦波駆動方式がある。特徴は下記の通りである。

- ・ 矩形波駆動方式

最適化された電機子巻線を使用したものである。制御回路が単純で、ロータ回転角度の検出も磁極切り替え部の検出のみである。

- ・ 正弦波駆動方式

ロータの回転に合わせて適切な正弦波波形をモータ部に供給する回路を備えたもの。矩形波駆動よりも高効率にすることが可能であるが、より細かい回転角度検出が必要となる。

モータ停止状態でのロータ位置の検出方法として、モータが回転しない程度のテスト電流を流しその大小によって現在の位置を測定する方法検討した。

(1). 矩形波駆動方式の位置検出研究

(1) - 1. テスト電流通電パターン

テスト電流は、6個のトランジスタ（FET）を制御して2通りの組合せで評価を行った。

（表2、表3）

表2. テスト電流通電パターン①

H:High/L:Low High Active

	1	2	3	4	5	6
UH	H	H	L	L	L	L
UV	L	L	L	H	H	L
VH	L	L	H	H	L	L
VL	H	L	L	L	L	H
WH	L	L	L	L	H	H
WL	L	H	H	L	L	L

表3. テスト電流通電パターン②

H:High/L:Low High Active

	1	2	3	4	5	6
UH	H	H	L	L	L	L
UV	L	L	L	H	H	L
VH	L	L	H	H	L	L
VL	H	L	L	L	L	H
WH	L	L	L	L	H	H
WL	L	H	H	L	L	L

(1) - 2. テスト電流通電パターン

テスト電流を通電する時間は表 2 に示すように 3 通りの組合せで評価を行った。

表 4. テスト電流通電時間

No	テスト電流を流す時間	次の通電までのOFF時間
1	150uS	800uS
2	50uS	270uS
3	30uS	160uS

(1) - 3. テスト電流測定結果

それぞれの測定結果を図 5 に示す。

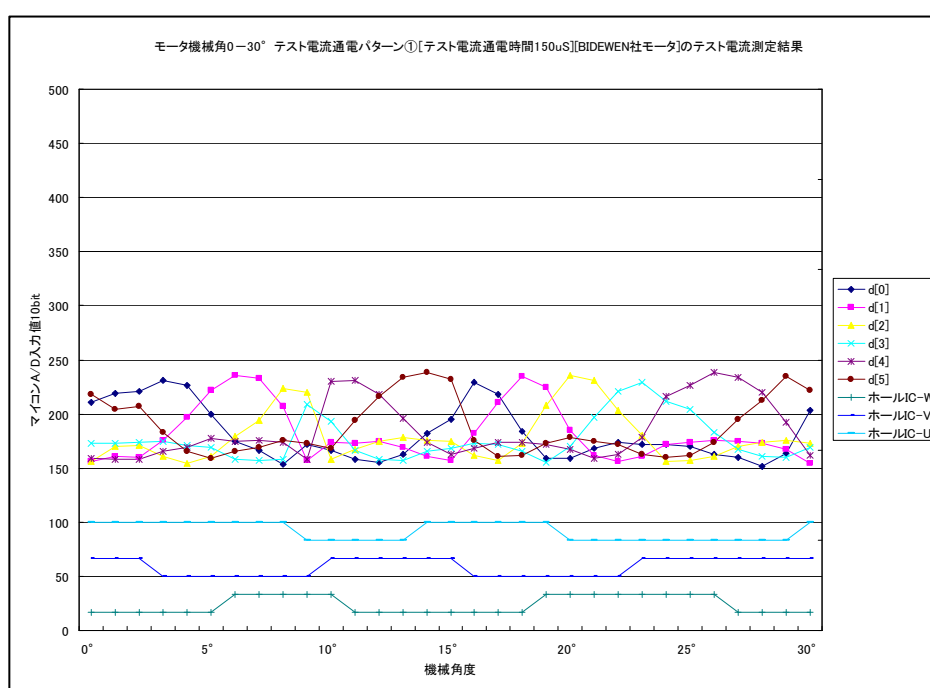


図 4. テスト電流通電パターン① [テスト電流通電時間 150uS] 測定結果

(1) - 4. 研究結果

モータ停止状態での位置検出方法は、モータが回転しない程度のテスト電流を流すことで検知可能であることが得られた。テスト電流は、ON 時間が 150uS 程度必要であった。

2-3. 矩形波駆動方式による超低速（1.3cm/秒）での位置検知の確立

矩形波駆動方式で、超低速（1.3cm/秒）での位置検知の確立を研究した。

矩形波駆動方式は3相モータの2相を通電し、残った1相に発生する逆起電力を検知し、通電相を切り替えていく。この逆起電力はモータの回転速度により大小がきまり、速度が遅いほど、逆起電力は小さくなる。

モータ制御は各相をPWM通電して電圧を制御する。一般的に使用されているPWMがON時の逆起電力は最大でモータに通電する電圧と同じ電圧が発生する。従って制御マイコンで逆起電力を直接測定することはできず、数分の1から数十分の1に電圧を落として入力する。今回の電動自転車で使用するモータは48Vタイプのものを使用するため、制御マイコンに入力するには1/10程度にする必要がある。

逆起電力を1/10に圧縮すると、検知レベルも1/10に圧縮されるため、それだけで検知感度が下がる。従来の方では、超低速での逆起電力が検出できない。図5からもわかるように逆起電力はPWMがOFFのときも発生する。位置検出として必要な情報は、逆起電力がゼロクロスするポイントのみで良いため、ゼロクロス近辺だけを切り取り、拡大して、一定電圧範囲の信号だけを制御マイコンへ入力する。この手法により約10倍の検知感度に上げて超低速領域までの検出を可能にした。

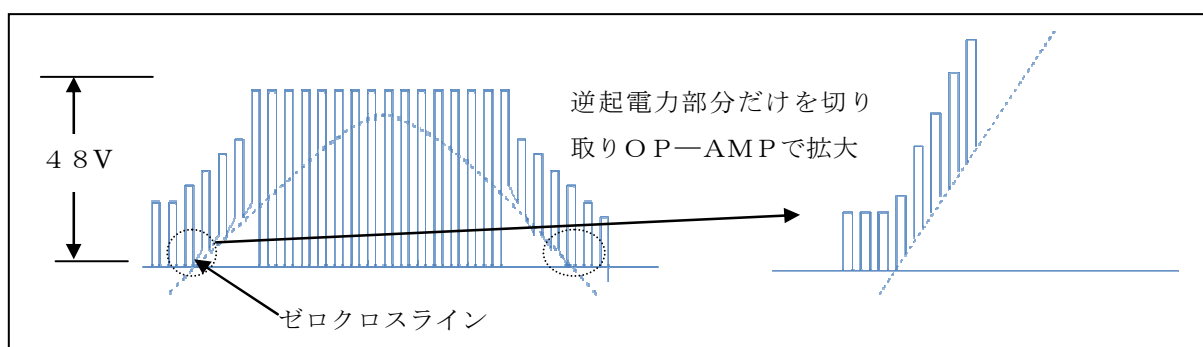


図5. PWM OFF時の逆起電力波形

2-4. 正弦波駆動（ベクトル制御）による位置検出

2-4-1. 脱調検出から正常制御への瞬時回復を可能とするアルゴリズムの開発。

U相、V相、W相に高周波を重畳して、磁極位置推定を行った。

埋込磁石同期電動機（IPMSM）のセンサレスベクトル制御

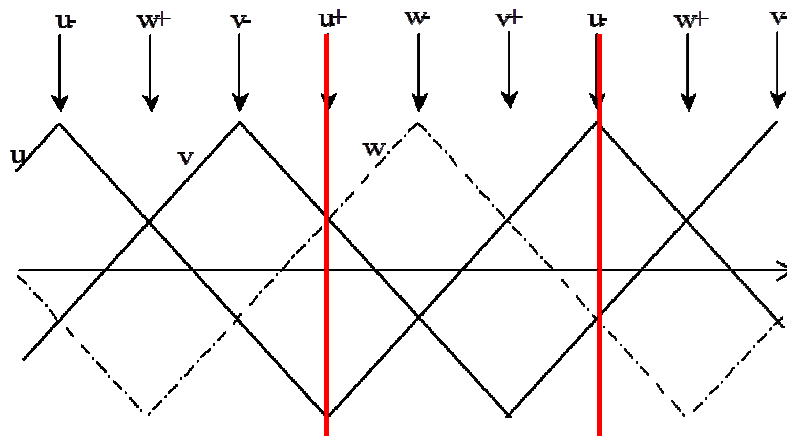


図 6. 三相三角波

2-4-3. 実験結果

350W 48V（直流電圧） 48極
 $152.7\text{Hz} = 381\text{min}^{-1} = 30\text{km/h}$
 $R=0.5352$, $L_d=0.595\text{mH}$, $L_q=1.14\text{mH}$
 $K_e=0.0364\text{V}/(\text{rad/s})$

表 5. IPMSM の定格とパラメータ（電動スクーター Yadea 製 YD-EM22）

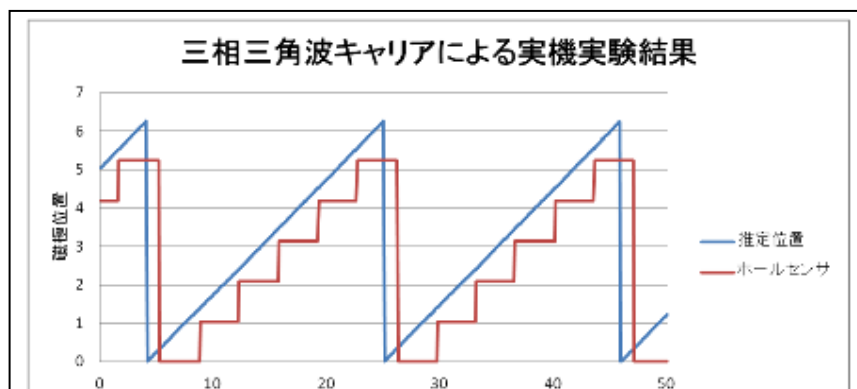


図 7. 三相三角波キャリアによる実験結果

実験結果の図 7 に示す様にホールセンサー（リファレンスとして使用）と推定結果は、良い一致結果が得られ、本手法（高周波重畳方式）の有効性が確認された。また、実車では脱調することなく運転特性が得られ、実車にても有効性が確認できた。

2-4-4. 定格運転（回転）での磁極位置検出方法

ロータ位置推定はロータ位置推定値の誤差から生じる d 軸誘起電圧を 0 にするような角速度を算出し、角速度から現在のロータ位置を推定する。

図 8 左図は推定誤差がなく、誘起電圧 $E=R_E q$ の状態である。一方、右図は誘起電圧 E が q 軸に対してずれているおり、 R_{Ed} が 0 でない状態である。ロータが矢印方向に回転している場合、実際の d、q（ロータ位置）に対し d' 、 q' が進んでいることになり、この場合、角速度を減速することで、ずれ（ R_{Ed} ）が 0 になるように調整した。

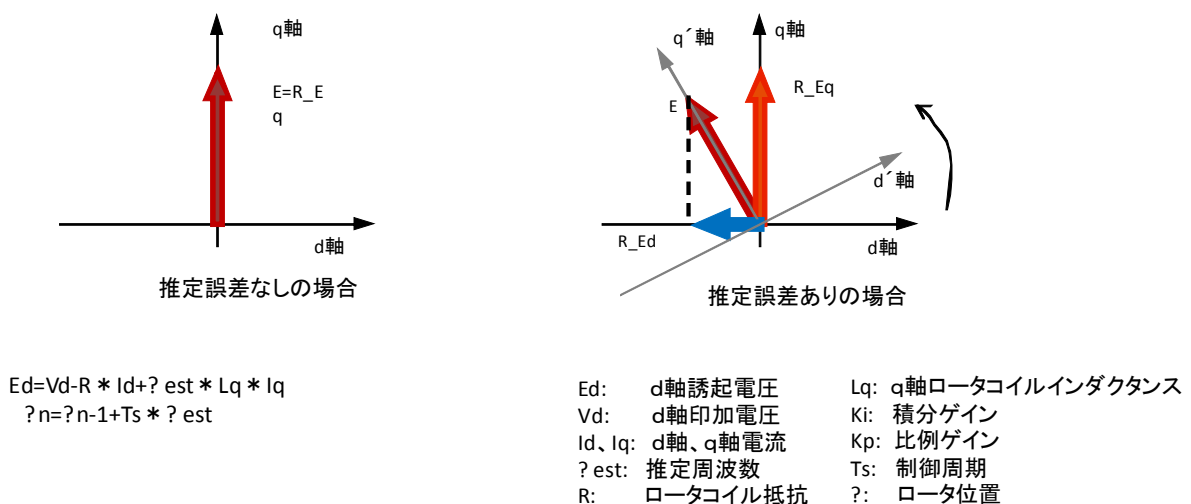


図 8. 回転時の磁極位置推定手法

2-4-5. 研究結果

高周波電流をU相、V相、W相に重畳して、 I_q 、 I_d を分析することにより、磁極位置推定技術は、良好な結果が得られた。即ち、ホールセンサーで検出した磁極位置と、本磁極位置推定技術で求めた位置は、同じ磁極位置となり、有効性が確かめられた。また、実機でも誤動作なく起動運転が出来た。但し、当初のキャリア周波数は、8 KHzで、このキャリア周波数によるモーター騒音が発生していたが、キャリア周波数を9 KHzに上げることによりモーター騒音はなくなった。同時にキャリア周波数を上げることは、演算処理時間が狭められることになるが、特に制約うけることなく、演算処理が出来た。この結果、本磁極位置推定技術を実機に搭載する目途がついた。

2-5. 実車試験用測定器と電動自転車負荷装置の協調評価

2-5-1. 実車試験データ採集ハードウェア仕様概要

電動自転車にデータロガーを搭載して下記データを収集した。その後、実験室のモーター試験機にデータロガーの収集データに移して再現テストした。この方法により、テスト解析の向上技術を確認した。

●測定データ

(1) モーター

- ①駆動波形（U相、V相、W相）、
- ②回転数、回転方向

(2) モータ・コントロール

- ①アクセル信号
- ②ブレーキ信号
- ③データ収集トリガー信号
- ④電圧／電流（U相、V相、W相の個別データ、及びU相＋V相＋W相合計データ）
- ⑤温度（パワートランジスタの温度）
- ⑥脱調（モーター制御が外れる）検出信号

(3) バッテリー

- ①電圧

●実車試験測定器（イメージ配置図）：電動自転車に測定器搭載

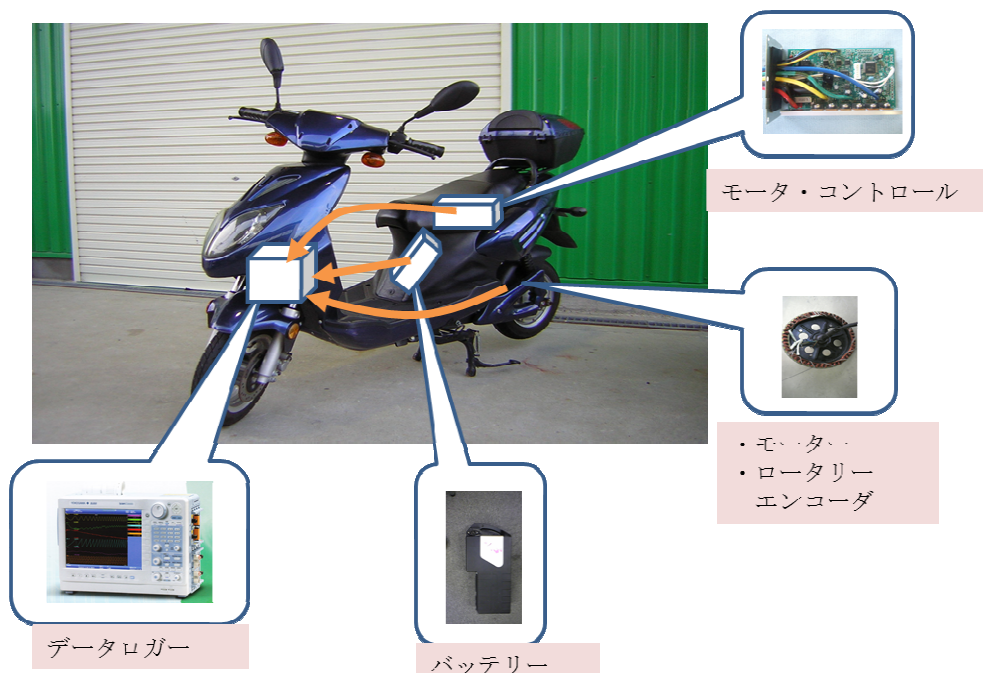


図9. 実車試験測定器構成

2-5-2. 実車試験データを室内環境で走行を再現装置

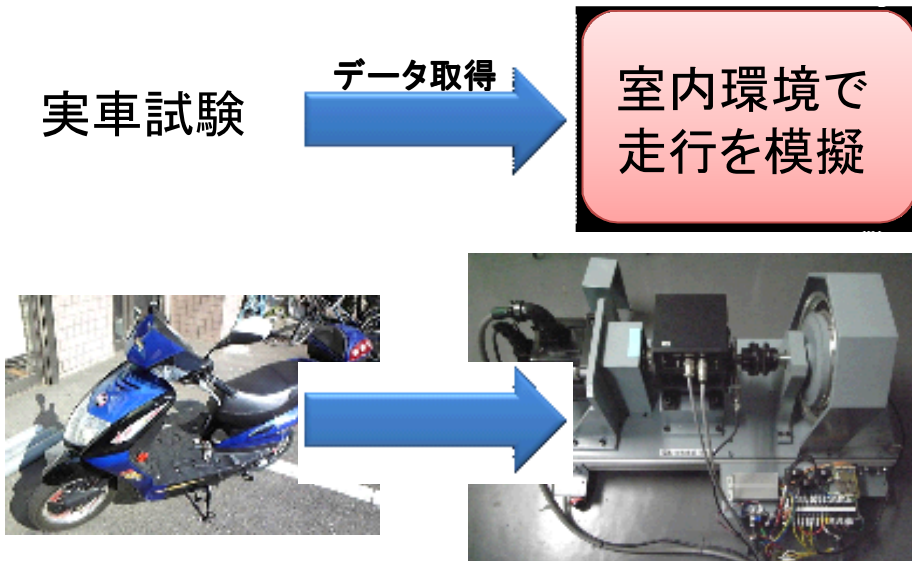


図 10. 路上データを室内環境で走行試験

2-5-3. 負荷モーター制御による走行抵抗の模擬

モデル化された走行抵抗にしたがって負荷トルクを発生させる方式を検討した。

$$\tau^{ref} = -(F_{rol} + F_{air} + F_{acc})r \quad (2.2)$$

$$F_{rol} = \mu Mg \quad (2.3)$$

$$F_{air} = \frac{1}{2}\rho AC_d(r\omega)^2 \quad (2.4)$$

$$F_{acc} = M_0 \frac{d(r\omega)}{dt} \quad (2.5)$$

パラメータ	記号
車重	M[kg]
転がり摩擦抵抗係	μ
空気摩擦抵抗係数	C_d
タイヤ半径	r[m]
重力加速度	g[m/s ²]
全面投影面積	A[m ²]
大気密度	ρ [kg/m ³]

図 11. 走行パラメータ

F_{rol} : 転がり抵抗 F_{air} : 空気抵抗 F_{acc} : 加速抵抗

式 (2.2) を用い、取得された試験モーターの回転速度情報に基づいて負荷トルクを制御し、路上での走行を模擬した。

2-5-4. 実験結果

実測データから負荷を推定するためのモータ特性の試験を実施して、路上試験データが再現出来た。

2-6. 高出力モータを搭載した車両へのセンサーレス・モータ・コントロールの適用研究

2-6-1. 高出力モータへの適用方法

下記対策を実施して、2 KWまでのモータ・コントロールを可能にした。

- ①最終段パワートランジスタの変更：75 V、75 A → 100 V、120 A
- ②パワー段電源供給ラインの増強
- ③マイコン側電圧レギュレータに70 V以上かからないようにツェナーダイオード追加

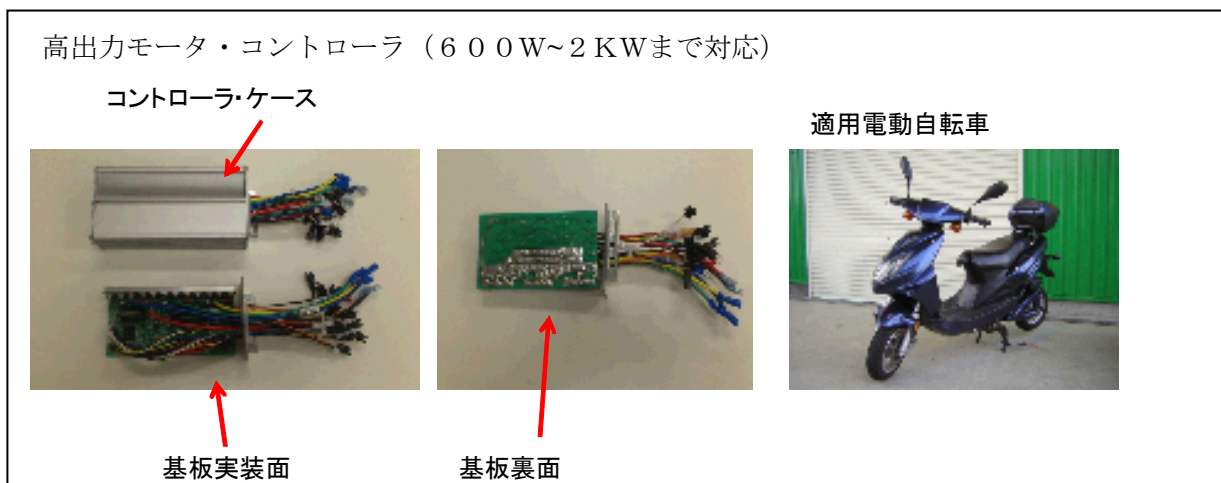


図 12. 高出力モータ基板と搭載実車

2-6-2. 実験結果

以下のテストコースで実車評価を実施し問題なく走行した。

テストコース詳細：ほぼ直線路、片道7.3 km、坂道：堤防への取り付け道路 約3度~4度

2-7. 低コストのモータ・コントローラ専用 IC 回路の開発

低コスト専用 IC 回路開発用に MATLAB をベースとした専用開発システムを開発した。また、専用開発システムを利用して専用 IC 回路のシミュレーション評価を行った。

評価システムは図 13 に示す。

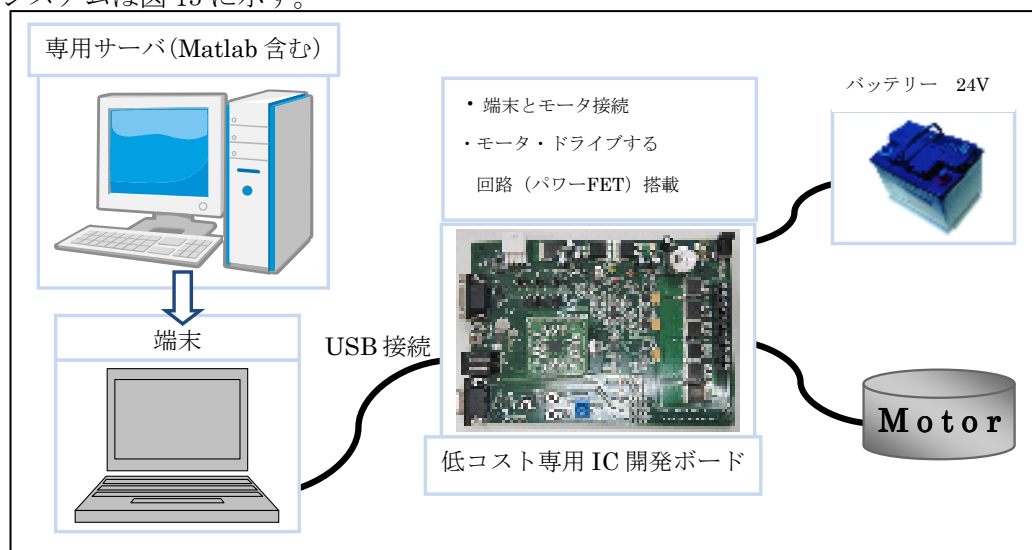


図 13. 低コスト専用 IC 開発システム

低コスト専用 I C 開発システムでは、下記 4 通の方法が実現出来るシステムを構築した。

① Model In the Loops Simulation : MILS

MILS では、全てをモデル化し、机上で評価を行う。この後の RCP と組み合わせることで、早期に制御システムを確立することができる。

② Rapid Control Prototype : RCP

RCP では、制御モデルを P C 上などにモデル化し、実機と組み合わせて動作させる。MILS で、制御対象モデルと組み合わせて、既に多くのことが評価されているが、制御対象モデルはハードウェアの全てができていないわけではありません。RCP は想定外を早期に減らし、制御仕様を早い段階で品質の高いものに上げるために活用される。

③ Hardwar In the Loop Simulation : HILS

HILS では、ハードウェアと現物の制御コントローラを組み合わせで動作させる。ソフトウェアの検査の目的で使われる検査装置です。故障を再現できる機能を取り入れたモデルを用いて、ソフトウェアが全ての故障検出できるかの検査を行うことができる。

④ Auto Code Generation : AGC (自動コード生成)

ACG では、制御モデルから C コードを自動生成し、実際の制御コントローラであるマイクロコンピュータに組み込む MATLAB のオードコードの品質はかなり高く、人が作るものとほとんど同じレベルのコードがほんの数秒で出力される。

低コスト専用 I C 開発に使用したツールを図 14 に示す

ツール名	MotorCycle モデリング	備考
MATLAB	全般	
Simulink	全般	
Simscape	物理間接続	
SimPowerSystems	モータ・バッテリー	
SimElectronics	制御・電気系統	
SimMechanics	車体 (Body) ・サスペンション	
SimDriveline	ブレーキ・タイヤ	
MATLAB Coder	ソフトウェア開発	
Simulink Coder	ソフトウェア開発	
Embedded Coder	組込ソフトウェア開発	
Device Blocksets for dsPIC	組込ソフトウェア特定デバイス開発	dsPIC用
MPLAB C Compile MPLAB C Compiler for PIC24 MCUs and dsPIC DSCs	コンパイラ	dsPIC用

図 14. 開発に使用したツール

実験結果と生成した低コスト I C のコスト試算を表 6 に示す

部品	従来コスト	低コスト専用 I C	備考
マイクロコンピュータ	100 円	150 円	専用 IC 3mm
インバータ・ブリドライバ	180 円		3 個
増幅器 (OpAMP)	50 円		3 個
インバータ MOSFET	60 円	60 円	6 個 Max 60A
シャント抵抗	20 円	20 円	2~50mmΩ
コンデンサ、抵抗、基板など	200 円	150 円	
開発費 (人件費含む) /10 万	90 円	45 円 (3 カ月)	150 万円/月
コスト計	700 円	425 円	

表 6. 低コスト専用 I C コスト試算

2-8. 機能安全性に関する評価

電動自転車に必要な機能安全性の調査、資料を収集した。チェックは、机上で行った

【準拠する基準】

ISO26262 と I E C の IEC61508 の 2 種類があるが、本プロジェクトでは、ISO26262 に基づいて機能安全性を研究した。

理由：IEC61508 は「確率論に過度に重点を置きすぎている」「部品ごとに安全性の認証を与えてしまっている」「ソフトウェアの設計エラーなどを定量化できるかのように扱っている」「根拠となるバックグラウンドがない」等の批判があり、その結果改良された ISO26262 を準拠とした。

【準拠基準から抽出した評価内容】

本プロジェクトでは、異常を検出して制御する組込みソフトウェアと異常を通知する要求システムの機能安全性を確立する事に絞って機能安全の机上チェックを行った。

システム	想定されるハザード	備考
電気機械式ブレーキ	意図しない急減速	机上チェック
モータ	・突然の意図しない回転上昇、急発進 ・突然の意図しない回転ゼロ ・異常な温度上昇	同上
バッテリー	・過放電 ・過充電 ・過温度	同上
表示、メータ	・ブレーキランプ表示しない ・方向指示器表示しない	同上

表 7. 機能安全性の評価内容

第3章 総括

3-1. 工業所有権の取得状況 (5件)

- ①センサーレスモータの制御方法、装置及びこれら方法、装置を用いる伝動装置電動装置
(特願 2011-64168)
- ②電動車両用試験測定システム (特願 2011-64169)
- ③センサーレスモータの制御方法、装置及び電動装置
(特願 2012-57497)
- ④電動車両用モータの試験方法 (特願 2012-57498)
- ⑤センサーレスモータの制御方法、装置及び電動装置 (特願 2013-36120)

3-2. 研究開発成果

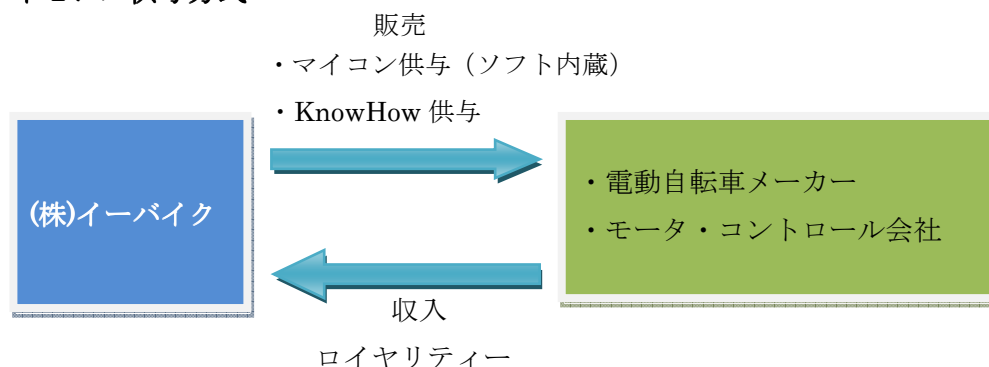
- ①センサーレスでの磁極位置推定アルゴリズムを完成した。組込みソフトウェアを電動自転車に搭載し実車での正常動作を確認出来た。
- ②超低速でも、正確に磁極位置推定する技術確立した
- ③停止一超低速一通常回転までの全領域に亘って、磁極位置を推定する技術確立した。
- ④モータ試験技術も同時に完成した。また、解析効率を上げる為に、路上試験データを実験室内のモータ試験機に移して、路上試験データを再現する技術を完成させた。
- ⑤川下ユーザーより、2KW モータ用のモータ・コントロールの開発要望を受け、2KW モータ用モータ・コントローラを完成した。
- ⑤事業化にはコストが極めて重要なため、低コスト専用 IC を開発した。併せて低コスト IC 専用開発システムを開発した。
- ⑥機能安全性基準を調査して、電動自転車での機能安全性のチェックリスト作成し、机上評価を実施した。

3-3. 事業化展開

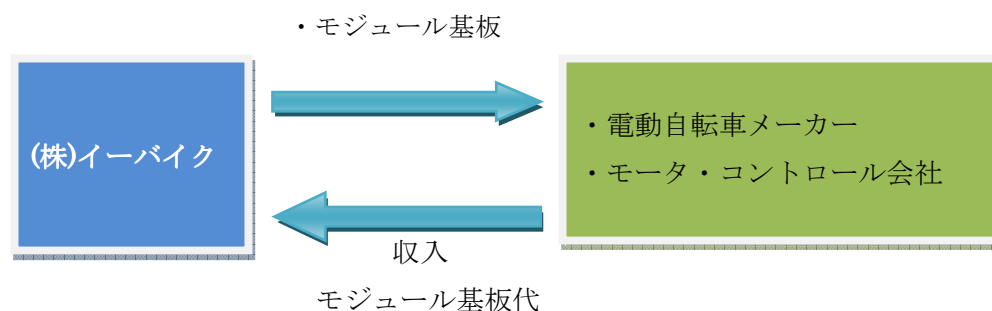
開発したセンサーレス組込みソフトウェアの事業展開として、①ライセンス供与方式、②組込みソフトウェア・モジュール販売の2通りの方法で展開していく方針である。

3-3-1. 販売方法

①ライセンス供与方式



②組込みソフトウェア・モジュール基板販売



3-3-2. 事業拡大化

開発したセンサーレス・モータ・コントロール組込みソフトウェアは、当初の目標である自走式電動自転車分野を中心にして事業展開を図っている。その過程で、電動自転車以外に家庭電器のエアコン用ファン・モータ制御、コンプレッサ・モータ制御でも多くのニーズがあることが判明した。電動自転車は使用環境が非常に厳しい（正転逆転、負荷変動、スピード変動）が、技術を更に高めて市場参入を図っていく。一方で電動自転車にこだわらず、参入が容易な家庭電器分野でも積極的に展開を図っていく。

3-3-3. 売上目標

事業化項目		売上		
		平成25年度	平成26年度	平成27年度
電動自転車用モータ・コントロール	単価(円)	600	600	550
	台数	50,000	100,000	500,000
	売上(円)	30,000,000	60,000,000	275,000,000
電動アシスト自転車用モータ・コントロール	単価(円)	1,500	1,500	1,500
	台数	10,000	50,000	100,000
	売上(円)	15,000,000	75,000,000	150,000,000
エアコン用モータ制御	単価(円)	400	400	400
	台数	100,000	1,000,000	2,000,000
	売上(円)	40,000,000	400,000,000	800,000,000
スターリング・エンジン用モータ・コントロール	単価(円)	2,000	2,000	2,000
	台数	1,000	2,000	10,000
	売上(円)	2,000,000	4,000,000	20,000,000
合計	円	87,000,000	539,000,000	1,245,000,000

以上