

AVR495 : 定V/f則と空間ベクトルPWM法を用いた AC誘導電動機制御



8ビット AVR[®]
マイクロコントローラ

応用記述

1. 要点

- 費用効率的で柔軟な3相誘導電動機駆動
- 割り込み駆動
- 低いメモリと計算の必要条件

2. 序説

直前の応用記述(AVR494)では定V対Hz則を用いた誘導電動機速度制御繰り返しのAT90PWM3での実装と自然パルス幅変調(PWM)技法が記述されました。自然PWM技法に代えて空間ベクトルPWMを用いてもっと複雑にする方法は、より低いエネルギー消費と改善された遷移応答を提供することが知られています。この応用記述の目的はより大きい集中的な計算を通してAT90PWM3でも実装することができる、この方法を示すことです。

3. 鍵となるAT90PWM3Bの機能

制御算法は最大16MIPSを成し遂げ、DC/DC昇圧変換器、永久磁石同期機械、3相誘導電動機、ブラシレスDC電動機の制御に適合する、安価で低電力な単一チップのAT90PWM3Bマイクロコントローラで実装されています。このデバイスは以下を統合します。

- ・ 8ビットAVR新RISC構造マイクロコントローラ (コアはATmega88と同じ)
- ・ 8Kバイトの実装書き込み可能なフラッシュメモリ
- ・ 応用プログラム専用の変数と参照表を格納するための512バイトのSRAM
- ・ 構成設定データと参照表を格納するための512バイトのEEPROM
- ・ 1つの8ビット計時器と1つの16ビット計時器
- ・ 64MHz PLLクロックでの半ブリッジ電力制御に最適化された6つのPWMチャネル
- ・ 11チャンネルの10ビットA/D変換器と10ビットD/A変換器
- ・ 3つのチップ上アナログ比較器
- ・ 内部発振器を持つ設定可能なウォッチドッグタイマ

4. 動作の理屈

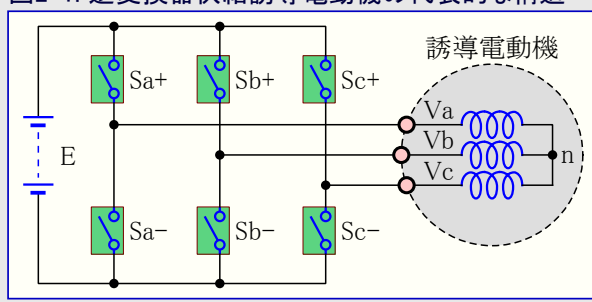
4.1. 空間ベクトル変調の原理

図4-1.は電圧源逆変換器(VSI:Voltage Source Inverter)に接続される3相誘導電動機の代表的な構造を示します。電動機は未接続中立点、 $V_n = (V_a + V_b + V_c)/3$ を持つ平衡負荷と見做されるため、 $V_{an} = V_a - V_n = (V_{ab} - V_{ca})/3$ 、 $V_{bn} = V_b - V_n = (V_{bc} - V_{ab})/3$ 、 $V_{cn} = V_c - V_n = (V_{ca} - V_{bc})/3$ です。上側電力スイッチはONとOFFだけができ、下側は常に逆の状態になることになっているため(逆変換器1区間の沈黙時間は無視されます)、図4-2.で示されるように8つの可能な切り替え状態だけがあります。

それらの6つが非0の相電圧になり、2つの相互交換可能な状態が0の相電圧になります。クラークコンコルディア変換(Clark-Concordia Transformation)[1,2]を用いて固定された2次元枠に固定子を割り当てる時に、6つの非0の相電圧が六角形の頭頂を形成します(図4-3.をご覧ください)。

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}$$

図2-1. 逆変換器供給誘導電動機の代表的な構造



本書は一般の方々の便宜のため有志により作成されたもので、Atmel社とは無関係であることを御承知ください。しおりのはじめにでの内容にご注意ください。

Rev. 7546A-12/05, 7546AJ2-04/21

図4-2. 3相逆変換器の可能な切り替え構成設定

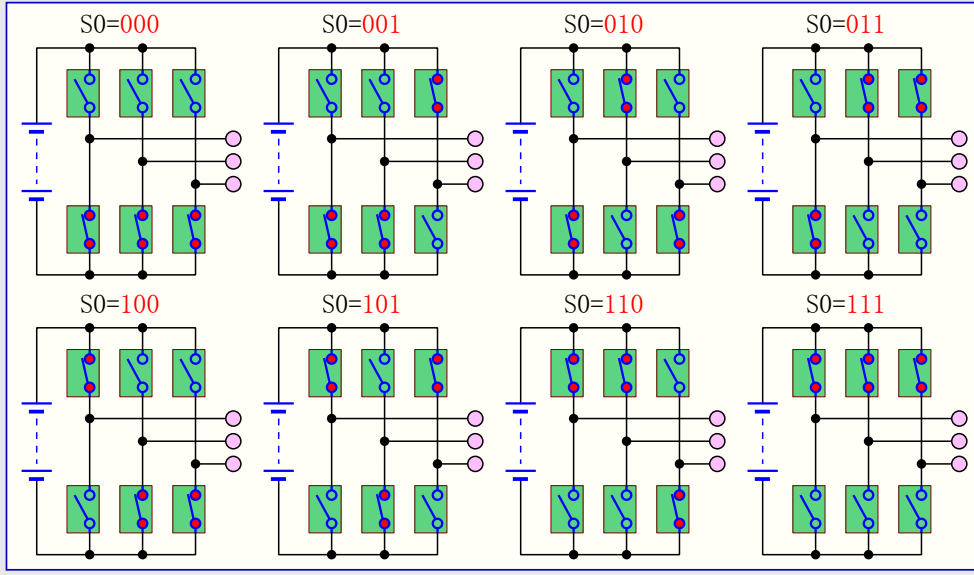


図4-3.で示されるように、2つの連続する非0電圧間の角度は常に 60° です。

複雑な形式で、それらの非0相電圧は $6\sim 6$ 、 $V_0=V_7=0V$ で $V_k=Ee^{j(k-1)\frac{\pi}{3}}$ として書くことができます。

表4-1.は逆変換器の可能な8つの構成設定の各々に於ける線対線と線対中立点の電圧を示します。

表4-1. 3相逆変換器の切り替え構成設定と出力電圧

Sa+	Sb+	Sc+	Si	Vab	Vbc	Vca	Van	Vbn	Vcn	V α	V β	V i
0	0	0	S0	0	0	0	0	0	0	0	0	V0
0	0	1	S1	0	-E	+E	-E/3	-E/3	+2E/3	-E/2	-E $\sqrt{3}$ /2	V5
0	1	0	S2	-E	+E	0	-E/3	+2E/3	-E/3	-E/2	+E $\sqrt{3}$ /2	V3
0	1	1	S3	-E	0	+E	-2E/3	-E/3	-E/3	-E	0	V4
1	0	0	S4	+E	0	-E	+2E/3	-E/3	-E/3	+E	0	V1
1	0	1	S5	+E	-E	0	-E/3	-2E/3	+E/3	+E/2	-E $\sqrt{3}$ /2	V6
1	1	0	S6	0	+E	-E	-E/3	+E/3	-2E/3	+E/2	+E $\sqrt{3}$ /2	V2
1	1	1	S7	0	0	0	0	0	0	0	0	V7

図4-3. コンコルディア基準枠での

可能な8つの構成設定の表現

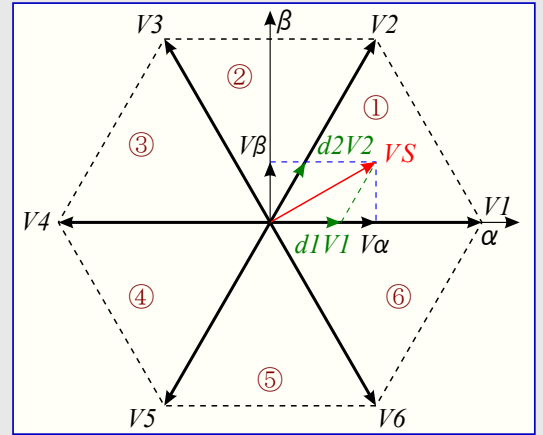


表4-2. 各扇状角に於けるデューティサイクルの式

扇状角番号	θ	d_k	d_{k+1}
1	$[0, \frac{\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\theta)$
2	$[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$
3	$[\frac{2\pi}{3}, \pi]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$
4	$[\pi, \frac{4\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(2\pi - \theta)$
5	$[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$
6	$[\frac{5\pi}{3}, 2\pi]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(2\pi - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$

コンカルティア枠で、この六角形の内側に配置される固定子電圧 $V_S = V_\alpha + jV_\beta = V_{sm} \cos(\theta) + jV_{sm} \sin(\theta)$ は6つの扇状角の1つに属し、この扇状角の範囲を定める2つの非0相電圧の直線的な組み合わせ、 $V_S = dkV_k + dk+1V_{k+1}$ として表されます。各扇状角で $dk+1V_{k+1}$ を $V_{sm} \cos(\theta) + jV_{sm} \sin(\theta)$ と等しくすることが表4-2. で示されるデューティサイクルの式を導きます。逆変換器が瞬間的に V_S を生成することができないので、空間ベクトルPWM原理は $T_k = dkT_S$ 中の T_k と $T_{k+1} = dk+1T_S$ 中の T_{k+1} の生成により、 V_S に等しい平均値の T_S 周期的電圧の生成にあります。 $dk + dk+1 \leq 1$ のため、それらの電圧は V_0 と/または V_7 によって切り替え周期 T_S に渡って完了されなければなりません。多くの解決策が可能で、固定子電流の総高調波歪を最小にする1つは、同じ持続期間 $T_0 = T_7 = \frac{1-dk-dk+1}{2} T_S$ 中に V_0 と V_7 を印加することにあります。 V_0 は切り替え周期の始めと最後で等しく印加され、これに反して V_7 は中央で印加されます。図解されるように、図4-4. の上側は扇状角1で得られる波形を示します。

4.2. SV(空間ベクトル)-PWMの効率的な実装

表4-2. は各扇状角でデューティサイクルが異なる式を持つことを示すように見えます。にも拘らず、これらの式の検討は $\sin(x) = \sin(\pi - x)$ のために、それら全てのデューティサイクルが $\theta'' = \frac{\pi}{3} - \theta'$ と $\theta' = \theta - (k-1)\frac{\pi}{3}$ で $dk = \frac{2V_{sm}}{E\sqrt{3}} \sin(\theta'')$ と $dk+1 = \frac{2V_{sm}}{E\sqrt{3}} \sin(\theta')$ として統一する方向で書くことができます。これらの式がもはや扇状角番号に依存しないため、それらは d_a と d_b として表すことができます。 θ' が常に 0 と $\frac{\pi}{3}$ のために、 d_a と d_b の計算はこの間隔の内側の角度だけに対する正弦表が必要です。これはこの正弦表を格納するのに必要とするメモリ量を大きく減らします。

AT90PWM3は空間ベクトル算法で計算された切り替え波形を生成するのに必要とされる3つの電力段制御器(PSC)を提供します。計数器は0から(図4-4. の下側で示されるように)切り替え区間の半分に対応する値まで計数し、そして0へ下降計数します。3つの比較レジスタに格納されなければならない値は表4-3. で与えられます。

図4-4. 逆変換器切り替え波形と対応する比較レジスタ値

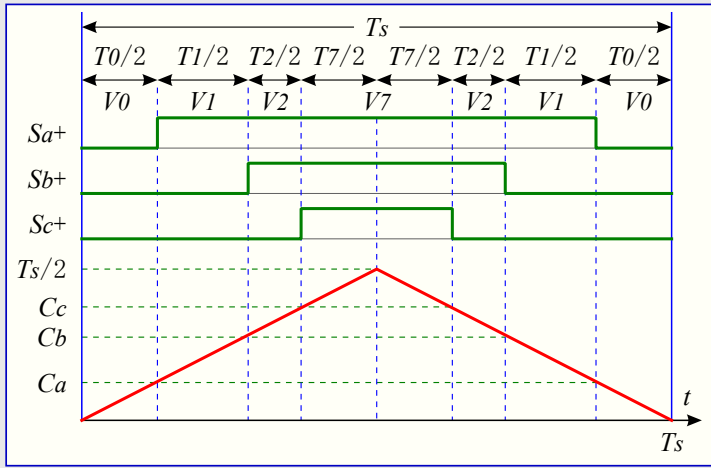


表4-3. 比較レジスタ値 対 扇状角番号

扇状角番号	$\frac{4}{T_S} C_a - 1$	$\frac{4}{T_S} C_b - 1$	$\frac{4}{T_S} C_c - 1$
1	$-d_a - d_b$	$d_a - d_b$	$d_a + d_b$
2	$-d_a + d_b$	$-d_a - d_b$	$d_a + d_b$
3	$d_a + d_b$	$-d_a - d_b$	$d_a - d_b$
4	$d_a + d_b$	$-d_a + d_b$	$-d_a - d_b$
5	$d_a - d_b$	$d_a + d_b$	$-d_a - d_b$
6	$-d_a - d_b$	$d_a + d_b$	$-d_a + d_b$

4.3. 扇状角決定算法

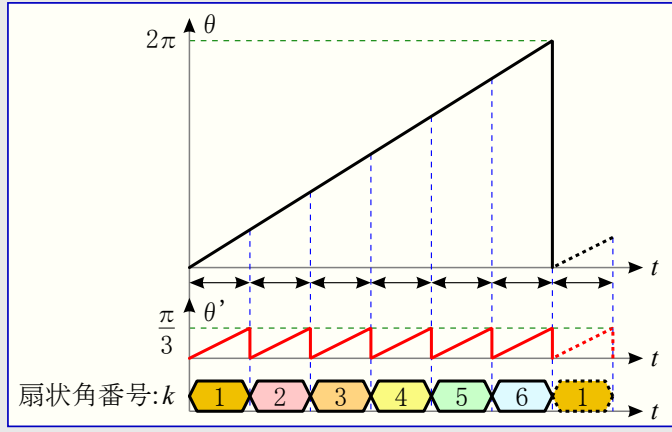
与えられた固定子電圧 V_S がどの扇状角に属するかを決めるため、いくつかの算法は一般的に多数の演算操作が必要でコンカルティア面内またはa-b-c相空間内の V_S の座標に基づく文献で提唱されています。この電圧がV/f制御則から推論される時に、その係数 V_{sm} は直前の応用記述で思い出されるV/f法によって計算され、その位相 θ は離散時間積分器によって ω_s から推論されます。この扇状角決定算法を効率的に実装するために、図4-5. で示される専用積分器で、 θ の代わりに θ' と k を管理します。扇状角番号 k は θ' が $\frac{\pi}{3}$ を超える度毎に6つの計数器の商の出力で、 θ' は 0 と $\frac{\pi}{3}$ 間に位置するように制限されます(図4-6. をご覧ください)。

図4-5. 扇状角決定算法

```

初期化:
θ' = 0; θ'' = π/3; k = 1;
算法の始まり:
θ' = θ' + ωsTS
if θ' ≥ π/3 then
    θ' = θ' - π/3
    if k ≥ 6 then k = 1 else k = k - 1 end
end
θ'' = π/3 - θ'
算法の終わり:
    
```

図4-6. 扇状角決定



望む速度と測定した速度間の差が固定子電圧周波数を決めるPI制御部に供給する速度制御繰り返しを構成するのに、**図4-7.**で示されるデータの流れ構成図の結果を使うことができます(**図4-8.**)。制御部の複雑さを減らすため、V/f則と空間ベクトルPWM算法の入力は固定子電圧周波数の絶対値です。PI制御部の出力が負の数なら、逆変換器(インバータ)の電力トランジスタを駆動する2つの切り替え変数が交換されます。

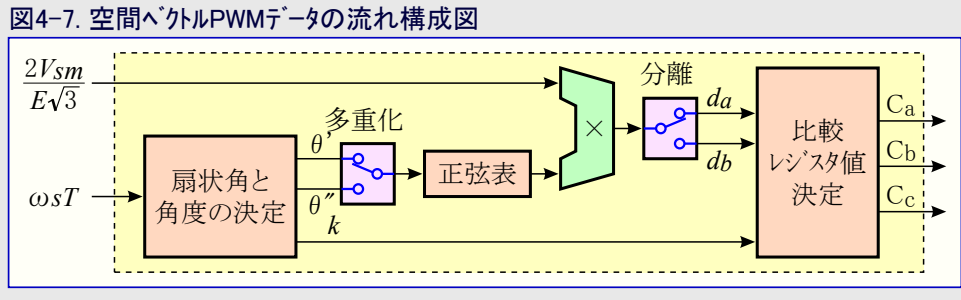
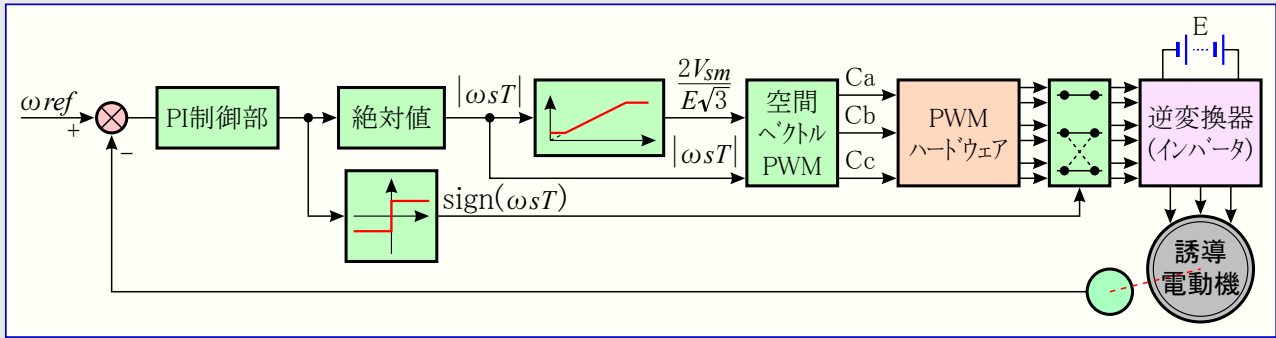


図4-8. 完全な制御系の構成図



5. ハードウェア説明(ATAVRMC200)

この応用記述はATAVRMC200評価基板で利用可能です。この基板は同期電動機制御を開始して実験する方法を提供します。ATAVRMC200の主な特徴は次のとおりです。

- AT90PWM3マイクロコントローラ
- RS232インターフェース
- 110～230V AC電動機駆動
- 絶縁された感知器用入出力
- 知的な電力単位部 (230V/400W基板の大きさ)
- 指示または感知器用の0～10V入力
- ISPとエミュレータのインターフェース

6. ソフトウェア説明

全ての算法は開発ツールとしてIAR Embedded Workbench®とAVR Studio®を用いてC言語で書かれています。空間ベクトルPWM算法については0～80間の k に対して $127\sin(\frac{2\pi k}{480})$ の丸めた値の表が使われます。この表の長さ(81バイト)は利用可能な内部メモリの大きさと回転子移動速度の定量化間の良好な妥結です。双方向速度制御については、PI調整部が負の数値の出力の時に比較器の2つで格納された値が交換されます(**図4-8.**をご覧ください)。

6.1. プロジェクト説明

ソフトウェアはAtmelのウェブサイト上の付随するプロジェクトで入手可能です。使うプロジェクトはProject_Vectorです。Project_NaturalはAVR494応用記述に対応します。

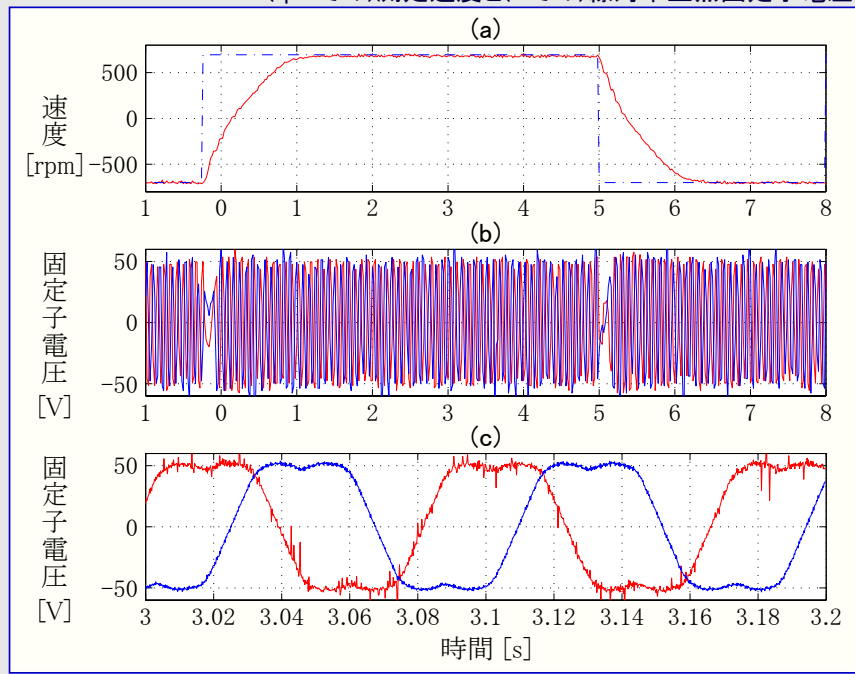
表6-1. "Project_Vector" IARプロジェクトで使われるファイルの一覧

ファイル名	説明
main_space_vector_PWM.c	応用の主上位
space_vector_PWM2.c	扇状角と θ を決定
controlVF.c	定V/F比計算
mc_control.c	調整繰り返し (PI)
read_acquisitionADC.c	A/D変換結果を返す。
init.c	CPU初期化(入出力ポート、計時器)
psc_initialisation2.c	電力段制御器(PSC)初期化
adc.c	A/D変換器(ADC)初期化
dac.c	D/A変換器(DAC)初期化

6.2. 実験

図6-1.は+700と-700rpm間の速度基準段階に対してマイクロ コントロールで得られる速度応答と固定子電圧を示します。これらの結果は750W誘導(電動機)装置で得られました。これらの図は1.2秒長の遷移後に望む速度に達し、PI調整部の出力で得られた固定子周波数 ω_s が0近くの時に固定子電圧の大きさが促進電圧に等しいことを示します。これらの図は空間ベクトルPWMで得られた遷移がより滑らかであるが、より長いことも追認します。

図6-1. 速度基準歩み中にマイクロ コントラ-で得られた
(rpmでの)測定速度と(Vでの)線対中立点固定子電圧



7. 資源

コード量 : 2584バイト
RAM量 : 217バイト
CPU負荷 : 33%/8MHz

8. 参考文献

1. Atmel AVR494:定V/頷則と自然PWM法を用いたAC誘導電動機制御
2. W. Leonhard, "Control of electrical drives", 2nd Ed, Springer, 1996.
3. F.A. Toliyat, S.G. Campbell, "DSP-based electromechanical motion control", CRC Press, 2004.
4. Y.Y. Tzou, H.J. Hsu, "FPGA realisation of space-vector PWM control IC for three-phase PWM inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 12, No 6, pp 953-963, 1997.
5. K. Zhou, D. Wang, "Relation between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp 186-196, February 2002.



本社

Atmel Corporation

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131, USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 487-2600

国外営業拠点

Atmel Asia

Unit 1-5 & 16, 19/F
BEA Tower, Millennium City 5
418 Kwun Tong Road
Kwun Tong, Kowloon
Hong Kong
TEL (852) 2245-6100
FAX (852) 2722-1369

Atmel Europe

Le Krebs
8, Rue Jean-Pierre Timbaud
BP 309
78054 Saint-Quentin-en-Yvelines
Cedex
France
TEL (33) 1-30-60-70-00
FAX (33) 1-30-60-71-11

Atmel Japan

104-0033 東京都中央区
新川1-24-8
東熱新川ビル 9F
アトメル ジャパン株式会社
TEL (81) 03-3523-3551
FAX (81) 03-3523-7581

製造拠点

Memory

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131, USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 436-4314

Microcontrollers

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131, USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 436-4314

La Chantrerie
BP 70602
44306 Nantes Cedex 3
France
TEL (33) 2-40-18-18-18
FAX (33) 2-40-18-19-60

ASIC/ASSP/Smart Cards

Zone Industrielle
13106 Rousset Cedex
France
TEL (33) 4-42-53-60-00
FAX (33) 4-42-53-60-01

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.
Colorado Springs, CO 80906, USA
TEL 1(719) 576-3300
FAX 1(719) 540-1759

Scottish Enterprise Technology Park
Maxwell Building
East Kilbride G75 0QR
Scotland
TEL (44) 1355-803-000
FAX (44) 1355-242-743

RF/Automotive

Theresienstrasse 2
Postfach 3535
74025 Heilbronn
Germany
TEL (49) 71-31-67-0
FAX (49) 71-31-67-2340

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.
Colorado Springs, CO 80906, USA
TEL 1(719) 576-3300
FAX 1(719) 540-1759

Biometrics

Avenue de Rochepleine
BP 123
38521 Saint-Egreve Cedex
France
TEL (33) 4-76-58-47-50
FAX (33) 4-76-58-47-60

文献請求

www.atmel.com/literature

お断り: 本資料内の情報はAtmel製品と関連して提供されています。本資料またはAtmel製品の販売と関連して承諾される何れの知的所有権も禁反言あるいはその逆によって明示的または暗示的に承諾されるものではありません。Atmelのウェブサイト位置する販売の条件とAtmelの定義での詳しい説明を除いて、商品性、特定目的に関する適合性、または適法性の暗黙保証に制限せず、Atmelはそれらを含むその製品に関連する暗示的、明示的または法令による如何なる保証も否認し、何ら責任がないと認識します。たとえAtmelがそのような損害賠償の可能性を進言されたとしても、本資料を使用できない、または使用以外で発生する(情報の損失、事業中断、または利益の損失に関する制限なしの損害賠償を含み)直接、間接、必然、偶然、特別、または付随して起こる如何なる損害賠償に対しても決してAtmelに責任がないでしょう。Atmelは本資料の内容の正確さまたは完全性に関して断言または保証を行わず、予告なしでいつでも製品内容と仕様の変更を行う権利を保留します。Atmelはここに含まれた情報を更新することに対してどんな公約も行いません。特に別の方法で提供されなければ、Atmel製品は車載応用に対して適当ではなく、使用されるべきではありません。Atmel製品は延命または生命維持を意図した応用での部品としての使用に対して意図、認定、または保証されません。

© Atmel Corporation 2005. 不許複製 Atmel®、ロコとそれらの組み合わせ、AVR®とその他はAtmel Corporationの登録商標または商標またはその付属物です。他の用語と製品名は一般的に他の商標です。

© HERO 2021.

本応用記述はAtmelのAVR495応用記述(doc7546.pdf Rev.7546A-12/05)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には()内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。