

RX23T 變頻器套件——如何以浮點運算提升運動控制演算法的效能？

前言

新推出的RX23T和RX24T微控制器系列搭載全新RX v2核心，能夠兼顧動作控制的最佳效能與成本。例如，根據最新標竿測試，RX23T在40 MHz時，可發揮80 DMIP的效能，而RX24T微控制器則可在80 MHz達到160 DMIP。

根據EEMBC認證標竿分數，無論是哪一款核心，RX23T/24T每MHz最高可達4.25 CoreMark效能。如需更多資訊，請造訪官方網站：www.eembc.org/coremark/

這些微控制器是專為5 V運轉設計，以確保最高抗噪性，並整合關鍵硬體模組，如：浮點運算單元(FPU)。本文提及採用的FPU實現方式已成為軟體工程師開發先進控制軟體的基礎，不僅易於維護，測試也相當簡便。

為何瑞薩電子要在最新的RX23T/RX24T系列上，實作浮點運算單元？

現有的RX62T及RX63T在目前馬達控制解決方案中，已可發揮極為出色的效能，這些系列也已經整合浮點運算單元。瑞薩電子決定要提升RX系列的整體核心效能，而FPU就是其中的一項利器。

關於RX V2核心的指令，請參閱下表，其中以紅色標示者，為V2相較於V1所新增的指令。

New instructions of the RX V2 Core

Arithmetic/Logic			Data Transfer				DSP			
ABS	MAX	RORC	MOV	POP	PUSHC	SCCnd	EMACA	MSBLO	MVTACGU	
ADC	MIN	ROTL	MOVCO	PUSH	PUSHM	STNZ	EMSBA	MULHI	MVTACHI	
ADD	MUL	ROTR	MOVLI	POPC	REVL	STZ	EMULA	MULLH	MVTACLO	
AND	NEG	SAT	MOVU	POPM	REVV	XCHG	MACHI	MULLO	RACL	
CMP	NOP	SATR	System manipulation		Branch	Strings	MACLH	MVFACGU	RACW	
DIV	NOT	SBB	BRK	MVTC	Bcnd	SCMPU	MACLO	MVFACHI	RDACL	
DIVU	OR	SHAR	CLRPSW	RTE	BRA	SMOVB	MSBHI	MVFACLO	RDACW	
EMUL	RMPA	SHLL	INT	RTFI	BSR	SMOVF	MSBLH	MVFACMI	FTOI	
EMULU	ROLC	SHLR	MVTIPL	SETPSW	JMP	SMOVU	Floating-point		FTOU	
SUB	TST	XOR	MVFC	WAIT	JSR	SSTR	FADD	FMUL	ITOF	
Bit manipulation						RTS	SUNTIL	FCMP	FSUB	ROUND
BCLR	BMcnd	BNOT	BSET	BTST	RTSD	SWHILE	FDIV	FSQRT	UTOF	

RX v2核心可藉由3項新增的FPU指令和14項新的DSP指令，執行32位元乘以單一指令，提供更高的計算準確度。此外，使用特定指定管理累加器和四捨五入的處理，可確保

整體高效能。相較於RX v1每MHz可達1.65 DMIP的效能，全新RX v2每MHz最多可達2 DMIP。

全新RX v2指令	功能
FSQRT	浮點平方根
FTOU	浮點至整數轉換
UTOF	整數至浮點轉換

在相同的微控制器RX23T上，實作三相電流無感測器向量控制演算法並進行比較後，發現晶片內建FPU模組可節省27%的處理時間，並減少28%的CPU負載，發揮出色效益。

RX23T			
CPU時脈	40 MHz · V2核心		效能
軟體使用的算術	定點	浮點	差異
控制迴圈計時	51 μs	40 μs	27%
快閃記憶體代碼行數	26 KB	20 KB	30%
RAM代碼行數	3 KB	2 KB	50%
CPU於16 KHz PWM / 控制迴圈的負載	82%	64%	28%

上述測量值是在RX23T套件 (名稱：YROTATE-IT-RX23T套件)上執行的變頻器套件軟體所測得。該軟體整合以下軟體區塊：

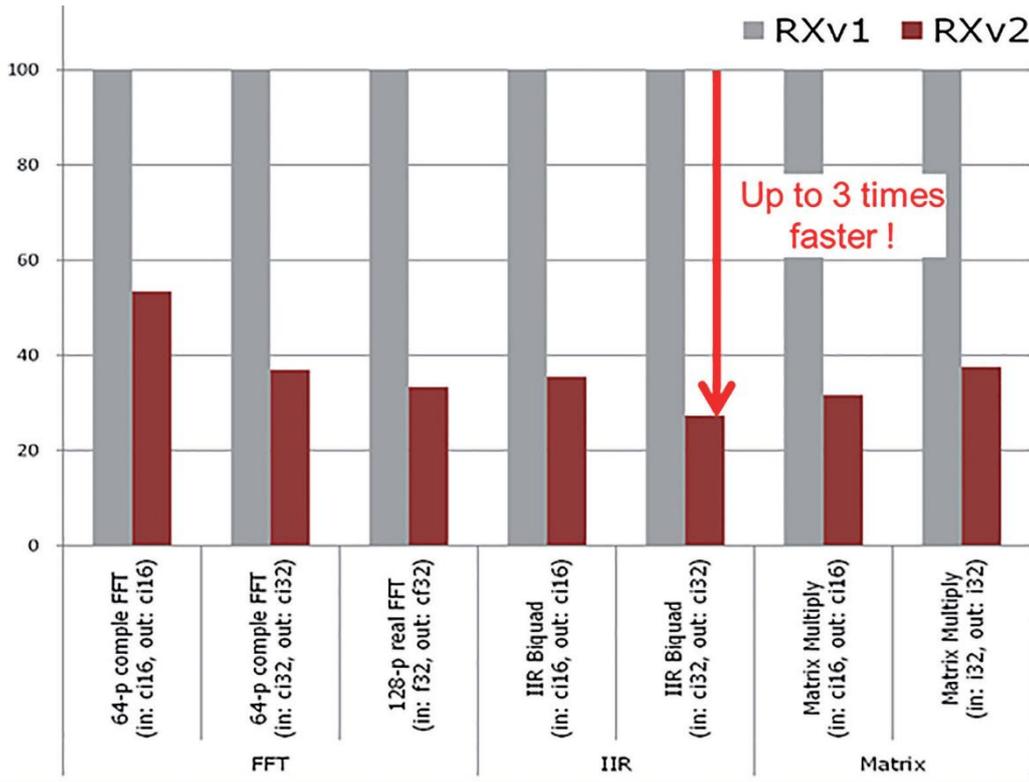
- 比例-積分電流控制器
- 比例-積分速度控制器
- Clamped PWM調變
- Clarke與Park轉換
- 磁通相位估測器
- 速度估測
- 三相電流回饋

標竿測試與實測所使用的軟體完整來源碼任何人都可取得，而且免授權金。

此外，在許多運動控制應用下，常使用感測器回饋信號進行數位濾波運算以克服雜訊干擾。此為瑞薩電子在RX V1和V2版本之間，

透過改善各種數位濾波運算速度而能夠協助開發提升效能的控制系統。

RX23T 變頻器套件—如何以浮點運算提升運動控制演算法的效能？



如需 RX23T 套件的完整相關資料，請造訪以下網站：
www.renesas.eu/motorcontrol

首先，我們先探討變頻器的內嵌軟體來源碼。變頻器演算法中所使用的常數，顯現出高分辨率與準確度，這代表著扭力與速度的整體控制準確無虞。如此一來，內嵌軟體的開發與維護便容易多了。此外，韌體中所使用的變數，會直接以實際的安培、伏特、赫茲、韋伯(磁通量)及亨利(電感)等單位表示。微控制器支援浮點變數可使得運算上實際採用浮點數字，提升輸出的效率。

根據上述資料可知，對於使用快速傅立葉轉換(FFT)的每一項濾波操作而言，最新的核心RX v2在無限脈衝響應(IIR)濾波器和矩陣乘法中，速度比前一代核心至少快2倍。以上圖表是與RX V1核心效能比較之後所得的標準化數據(非實際時間)。

若為第二階數濾波器(IIR Biquad)，RX v2核心可透過全新指令，在相同時脈頻率下，提供比RX v1核心高出三倍的速度。

至目前為止，本文已經說明了RXV2內嵌浮點運算單元模組的原因，以及效能、代碼行數和整體代碼效率的結果。

我要如何從定點運算轉換成浮點運算？

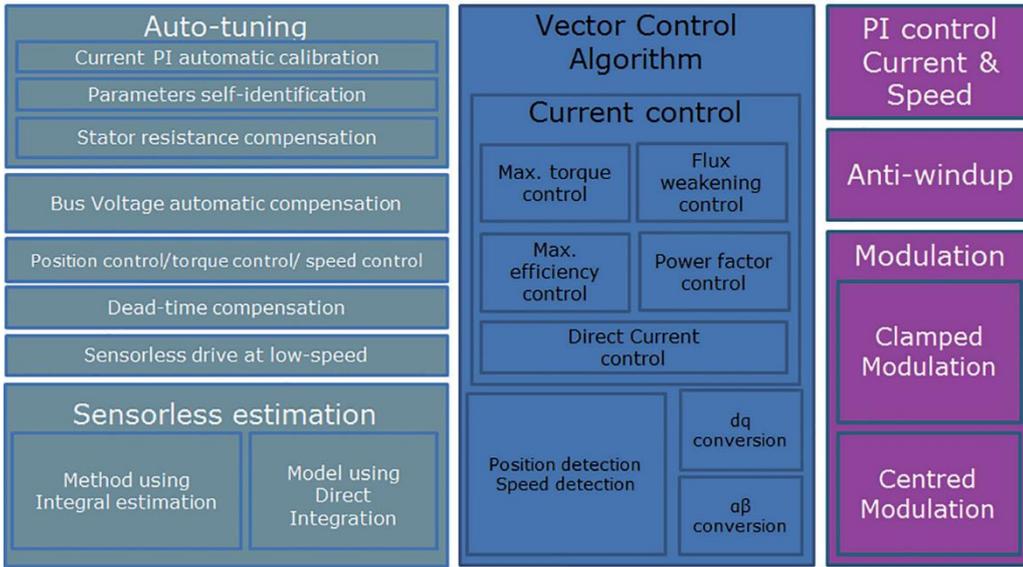
首先可以參照瑞薩提供的3相變頻器參考設計方案。其搭載RX23T的套件(如：YROTATE-IT-RX23T)，可讓開發人員迅速地針對浮點變數的使用進行實驗。

```
// floating point numerical constants
#ifndef F_CONST
#define F_CONST
#define PI ( 3.141592654 ) // 180
#define PISIXTH (PI / 6.0) // 030
#define PIFOURTHS (PI / 4.0) // 045
#define PITHIRDS (PI / 3.0) // 060
#define PIHALVES (PI / 2.0) // 090
#define TWOPITHIRDS (PI * 2.0 / 3.0) // 120
#define THREEPIFOURTHS (PI * 3.0 / 4.0) // 135
#define FIVEPISIXTH (PI * 5.0 / 6.0) // 150
#define SEVENPISIXTH (PI * 7.0 / 6.0) // 210
#define FIVEPIFOURTHS (PI * 5.0 / 4.0) // 225
#define FOURPITHIRDS (PI * 4.0 / 3.0) // 240
#define THREEPIHALVES (PI * 3.0 / 2.0) // 270
#define FIVEPITHIRDS (PI * 5.0 / 3.0) // 300
```

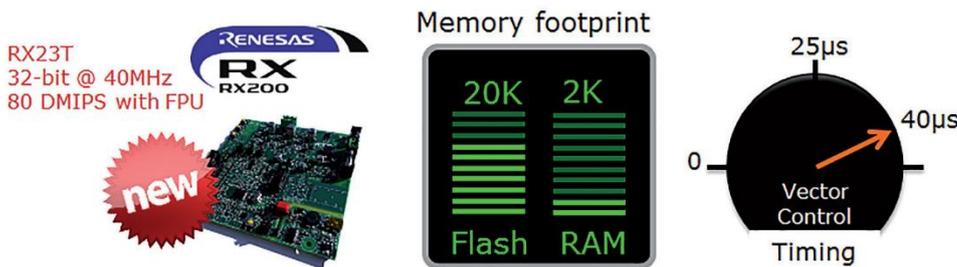
```
float32_t
ium_off, // IU analog channel offset
ivm_off, // IV analog channel offset
iwm_off, // IW analog channel offset
r_sta, // stator resistance
l_syn, // synchronous inductance
pm_flg, // permanent magnets flux
fb_gain, // flux amplitude feedback gain
flx_lpco_hz, // approx. flux estimation filter cutoff frequency
c_poli, // number of polar couples
i_start, // startup current (peak)
is_rdw, // startup current decreasing rate
vbus, // bus voltage
vbus_minf, // filtered available bus voltage (minimum value)
i_max, // maximum total current
id_max, // maximum d current
iqmax, // maximum q current
ibr, // beta current reference
rpmrif_x, // reference speed (ramp input) [rpm]
rpmrif_y, // reference speed (ramp output) [rpm]
r_acc, // acceleration ramp [rpm/main_loop_duration]
r_dec, // deceleration ramp [rpm/main_loop_duration]
rpm_max, // maximum speed [rpm]
rpm_min, // minimum speed [rpm]
min_speed, // minimum speed [rad/s]
max_speed, // maximum speed [rad/s]
omegae, // electrical angular speed
omf, // electrical angular speed (filtered)
maxerr, // maximum speed error [rad/s]
```

3相變頻器系統的所有內部物理量，均可輕鬆以浮點方式表示，不需要將變數進行正規化或進行比例轉換。基於此一優點，代碼的管理與判讀也更加簡便，進而可輕鬆計算出馬達模型，不需要逐一調整或額外的轉換動作。此外，下頁將說明「磁通相位估測」區塊。

RX23T 變頻器套件—如何以浮點運算提升運動控制演算法的效能？



將RX編譯程式最佳化等級設定至「最高(Max)」，便可達到以下效能。

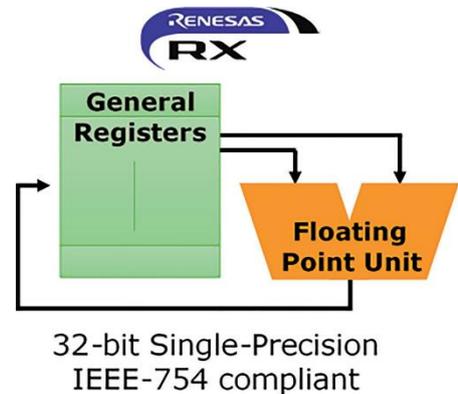


在RX23T上執行的軟體所使用的資源非常精簡：20 KB 快閃記憶體和2 KB RAM，這表示在搭載128 KB快閃記憶體的RX23T上，有高達108 KB的可用空間可供應用程式使用。

結語

本文詳細說明使用RX23T浮點運算單元，可如何提升變頻器演算法的效能。

精簡整體使用的代碼行數，更迅速執行完整的軟體實作，不需要模擬比例或飽和運算。此外，相較於整數實作，由於浮點運算的內建軟體使用實際的物理單位，因此可提供更高的準確度。最後，FPU可針對PI控制器與估測器，提供更快的運算時間。



所以，還等什麼呢？趕緊前往 www.renesas.eu/motorcontrol，下載最新資料，使用免授權金的來源碼進行評估。

購買或使用此處所列之任何瑞薩電子產品前，請先參考最新產品手冊和 / 或產品規格表。