

## 模型基礎設計可縮短馬達控制應用程式的研發時間

*Dr. Arun Mulpur and Dr. Zijad Galijasevic, MathWorks Inc.*

### 簡介

精密馬達控制器的應用範圍日益廣泛，不僅可提供更複雜、更精確的動作控制與減少耗能，並具備其他多項優點。這類控制器通常是以 16 及 32 位元的數位訊號控制器（DSC, digital signal controller）為主，可提供某些應用程式館（application library），但仍需發展與完成進階級馬達及動作控制演算法，並整合各種控制功能與周邊設備等各種工具及方法。此外，由於設計與整合錯誤通常直到於實際硬體上執行代碼時才被發現，因此往往導致研發時間與成本的增加。

而模型基礎設計可有效解決這些問題—藉由啟動階層式設計過程，於最初的概念等級即可限定整體設計，加入必要的細節，進而發揮所需的功能性。此模型是用以限定規格、評估設計與系統性能、自動產生代碼、執行硬體迴路測試（hardware-in-the-loop testing），並可建立軟體基礎測試控管機制以測試生產軟體。此方法不僅可大幅減少研發時間，迅速形成完全與功能性概念驗證設計，還可經由統一的設計、模擬與測試環境，獲得快速的設計重複與參數最佳化。

### 嵌入式控制系統的模型基礎設計

模塊組（blockset）的引進，有助於馬達控制應用程式的模型基礎設計的使用，包括預先組態的模塊，以處理向量控制系統的所有元件，例如派克與克拉克轉換（Park and Clarke transforms）、脈波寬度調變（PMW）、比例積分（PI）迴路、速度估測器、磁通估測器等 **1**。這些新工具使設計人員可利用預先建立、代表原始與進階演算法的模塊，迅速建立圖形模型，並僅於需要時才納入其本身的 C 碼，且各種模塊與周邊設備間的所有整合均可自動執行。事實上，這些新工具已為客戶們所接受，並應用於重大工程計畫，同時亦獲得業界的認可 **2**。圖 1 為完成嵌入式馬達控制器的模型基礎設計流程，並指出各階段的代表軟體工具。

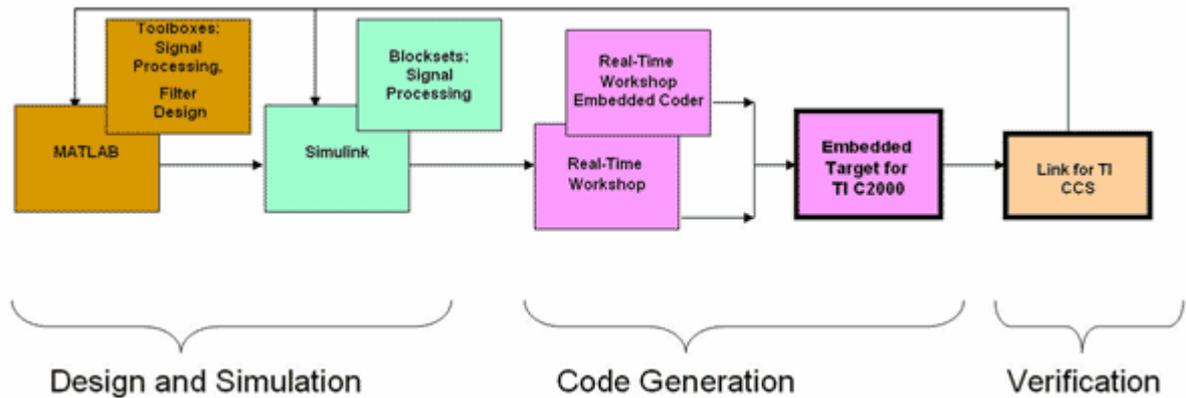


圖 1：模型基礎設計的流程與代表工具

模型基礎設計使工程師能建立程序檔以描述一般的操作情況，用軟體模擬控制器的操作。工程師可迅速修改模型並觀察性能變化，透過快速的重複達到設計性能的提升。此方法的主要特色即在於評估新設計時的彈性，無須將大量資金投入硬體原型化（hardware prototyping）。例如，工程師可於模擬即時平台上操作控制器模型，控制模擬馬達性能的模式；或者，可產生代碼，並於實際硬體上執行，利用其控制真正的馬達或馬達的即時模擬。

### 模型基礎設計範例

動態系統模擬軟體 Simulink® 為 MathWorks 公司所研發的主要平台，適用於複式領域模擬與模型基礎設計，以下將詳述如何利用此軟體發展出一項簡單的直流馬達控制系統設計。圖 2 顯示具有次系統擴展觀點的模型，適用於轉速的校正與測量。

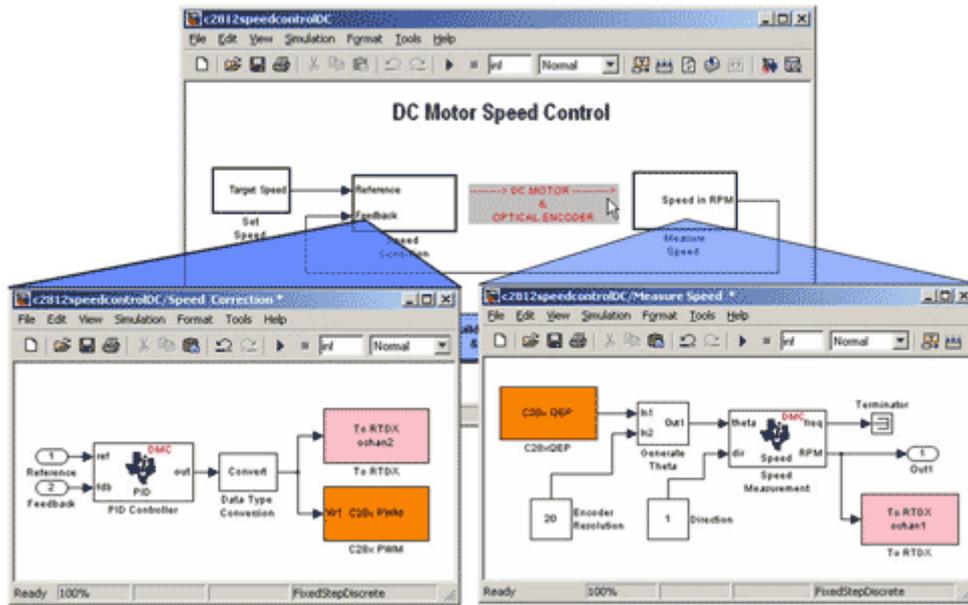


圖 2：直流馬達控制器的 Simulink 模型

比例積分微分（PID）模塊控制 PWM 模塊的工作週期，PWM 模塊則控制傳遞至馬達的電壓。正交編碼器脈衝（QEP, quadrature-encoder-pulse）模塊會接受連接馬達電樞的光學編碼器的相位脈衝輸出，而 QEP 則會計算電樞的位置與速度。QEP 的輸出係數位速度訊號，是由 PID 控制器模塊用以控制 PWM 的工作週期。需注意的是，速度測量、PID 及若干其他模塊所產生的手寫組合代碼（hand-written assembly code），為本範例中所使用的 TI DSP 進行最佳化。

### 經由模擬產生的可靠控制設計

使用模型基礎設計，在研發過程中不需硬體即可隨時執行模擬與評估結果，因此在研發初期，可於極短的時間內，以甚低的成本評估各項設計的性能。舉例而言，在本文所討論的應用程式中，工程師應發展一個簡易的電動馬達軟體模型，並以控制系統的初期重複進行控制。工程師亦可輕易地將控制系統性能量化，亦即對速度變化命令反應的所需時間。如欲改變設計，僅需調整 PID 參數即可，便可立即得知對於性能的影響。圖 3 為用以確定參數與評估 PID 模塊性能模型。

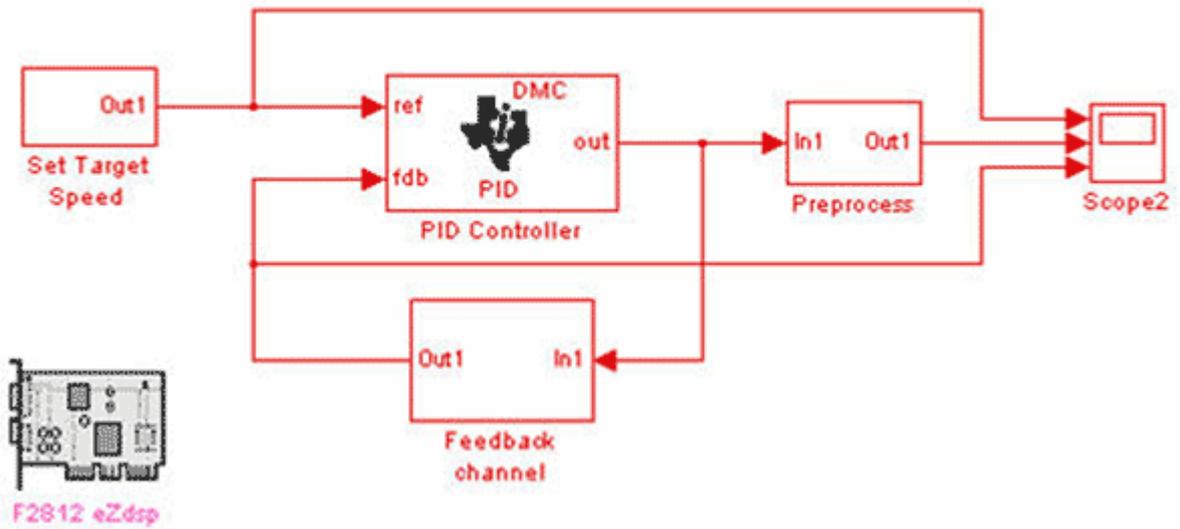


圖 3：評估 PID 控制器用的 Simulink 模型

最初 PID 參數所產生的結果，顯示於圖 4（左圖）。根據圖中標示所需的轉速、PWM 工作週期與實際轉速，顯示控制器反應並未最佳化，這是由於調量過大與延長振動的緣故，但只需藉由反復修改，即可調整 PID 模塊的參數以產生更佳的反應。結果顯示於圖 4（右圖）。

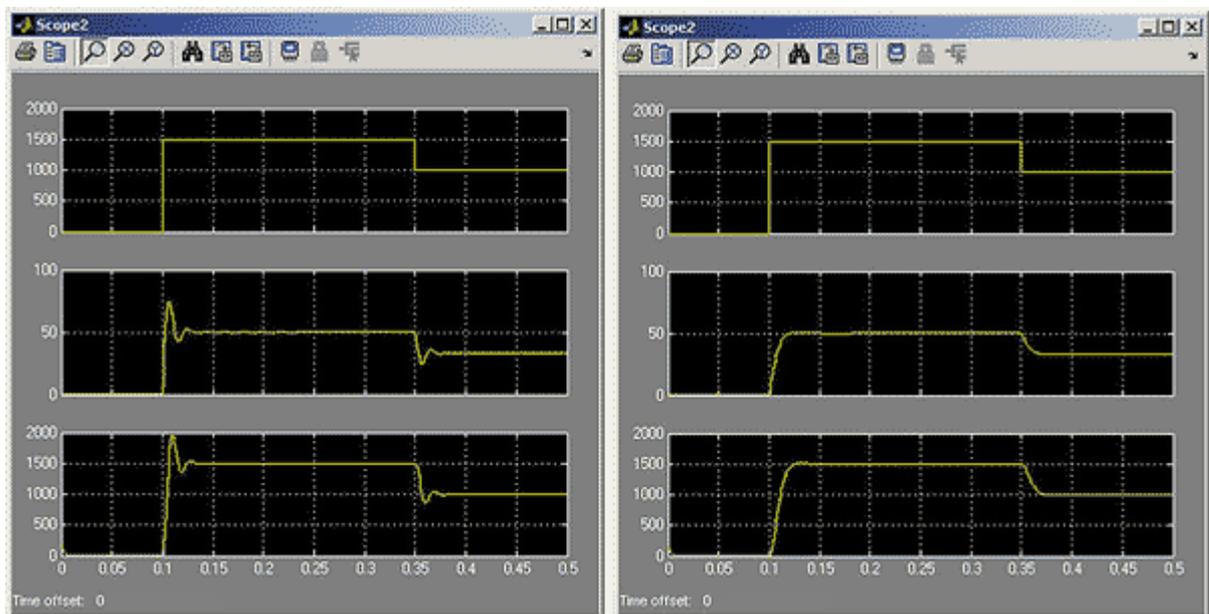


圖 4：經由重複的參數修改（右圖）獲得 PID 控制器（左圖）的最初反應與性能改善

如上所述，以傳統設計方法從浮點切換至固定點實作不僅複雜困難、浪費時間而且容易出錯，為了使此過程簡化與流線化，DSP 廠商可提供處理器特定的固定點程式庫，如圖 5 所示 Texas Instruments 公司的 C28x IQmath 程式庫。

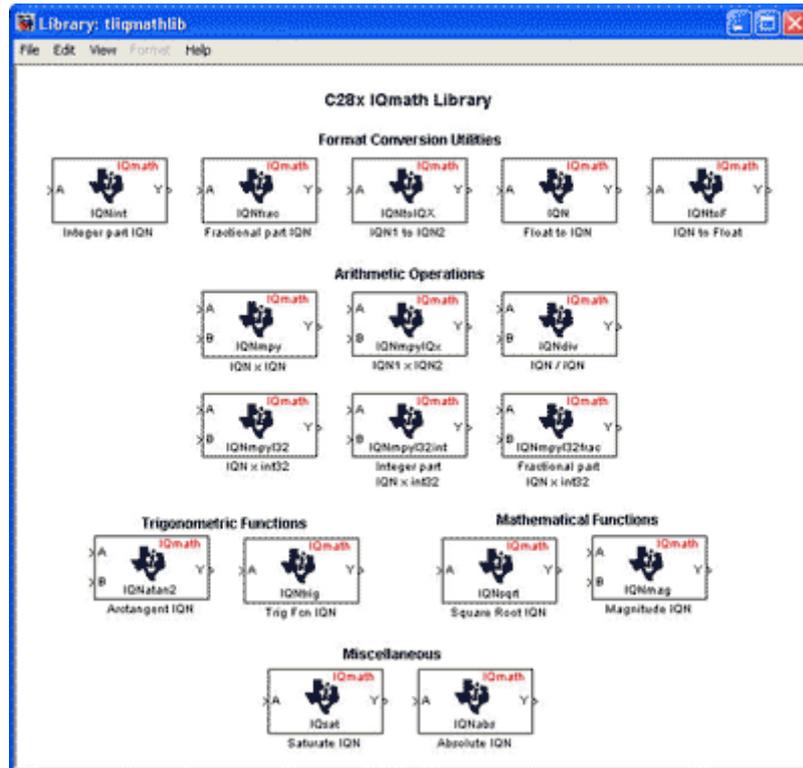


圖 5：Texas Instruments 公司的 C28x IQmath 程式庫

這些特殊化的處理器特定程式庫，可為運算密集的即時應用程式特別提供最佳化的執行速度與有效率的記憶體利用，其所獲得的執行速度遠超過以標準 C 語言寫成的同等碼，因此可大幅縮短代碼最佳化的應用程式研發時間。模型基礎設計可以模塊形式提供此類程式庫，以進一步協助使用。而更重要的是，模型基礎設計可於主電腦上模擬此類程式庫的位元真（bit-true），使 DSP 實作配合最低有效位元（LSB, least significant bit）。

當控制系統設計於模擬中表現得當時，工程師即可自動產生 C 碼並於嵌入式硬體系統上執行設計，這意味著設計師能即時評估硬體原型。在本範例中，設計目

標即鎖定於 Texas Instruments 公司的 TMS320F2812 DSP 與 Code Composer Studio 整合開發環境 (IDE)。



## 經由自動碼的產生直接實作

MathWorks 適用 TI C2000 DSP 的 Real-Time Workshop®與 Embedded Target，以 Simulink 為 TI C2000 DSP 提供固定與浮點碼的產生，而所產生的原始碼將自動被置入 Code Composer Studio 的項目中。除了裝置驅動程式與控制演算法外，所產生的代碼並包含：即時排程器、連結器命令檔與項目設定。

在本範例中，我們利用一塊估測板將目標連接一部真實的馬達，並且利用 Code Composer Studio 的連結，在 Simulink 與 Code Composer Studio 之間傳遞資料。由於具備 Code Composer Studio 的連結，因此可延伸 MathWorks 技術運算專用的核心平台 MATLAB®，以提供下列功能：程式載入、執行與停止等管理、偵錯點、資料操作、硬體迴路模擬系統、同時模擬支援（co-simulation support）與 RTDX 支援。此外，此應用程式會在測試與偵錯時取得 Code Composer Studio 的控制，並於目標應用程式尚在執行時允許即時交換。

鎖定 TI DSP 時，有一項步驟為改變驅動器以使 Texas Instruments 公司的即時資料交換（RTDX, Real Time Data Exchange）模型最佳化，其可提供主機端客戶與目標應用程式之間的雙向通訊。Code Composer Studio 的連結則是用以促進 MATLAB 與在目標上執行的應用程式之間的 RTDX 溝通。此外，相同產品不僅可產生 Code Composer Studio 項目與設定編譯器及連結器選項，還可建立、載入與執行應用程式。

## 達成目標碼的驗證

利用傳統設計程序來執行前述最佳化工作，可能需要大量的重複作業，而每次的重複均涉及改變控制系統演算法與參術數、重新編譯與重新執行應用程式。使用模型基礎設計以可即時調整的參數進行時，僅需數秒即可完成設計重複，以其他參數進行則需要數分鐘的時間。

舉例而言，工程師可於螢幕上檢視真實馬達電流與電壓的測量值，同時監看控制系統的變數（例如相同參數的測量值）。擁有即時檢視實際測量值與比較控制系統變數的能力後，即可大幅減少研發時間。圖 6 顯示以 Simulink 為基礎的模型基礎設計工具鏈（tool chain）的即時監視能力，並提供測得馬達轉速的數據與產生的 PWM 波形的工作週期；這些數據是利用 RTDX 從在真實硬體上執行的應用程式而取得。在本範例中，RTDX 也被用以使所需的馬達轉速即時產生變化。

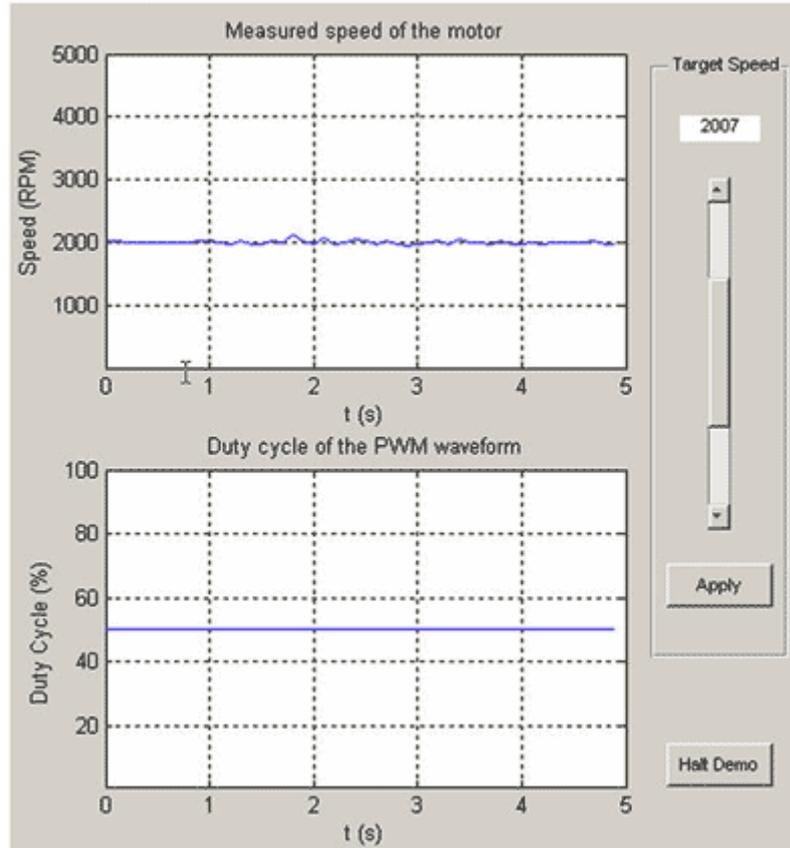


圖 6：馬達轉速與 2007 rpm 目標轉速的 PWM 工作週期

### 加入進階級設計功能

新增的控制系統能力可免去數星期的編碼時間；如欲將其加入系統設計中，只需從其他模塊程式庫中拖曳及放下模塊。例如，分散式控制系統設計師可加入一個模塊，以將控制區域網路（CAN）網路連結功能提供給控制器架構（如圖 7 所示）。

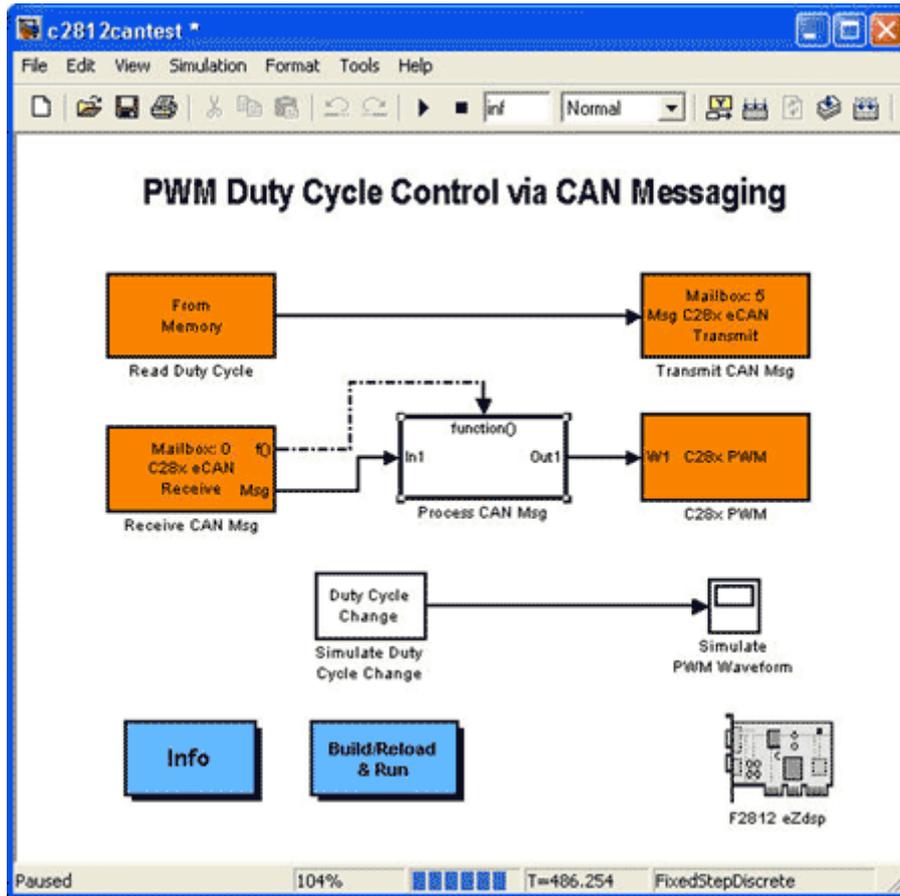


圖 7：將 CAN 的訊息傳遞支援功能併入馬達控制器設計中

處理所接收的 CAN 訊息與形成所產生控制決定等所需的邏輯運算，可經由自動碼的產生進行原型化、模擬與執行（與圖 8 所示控制器設計的其餘功能相同）。

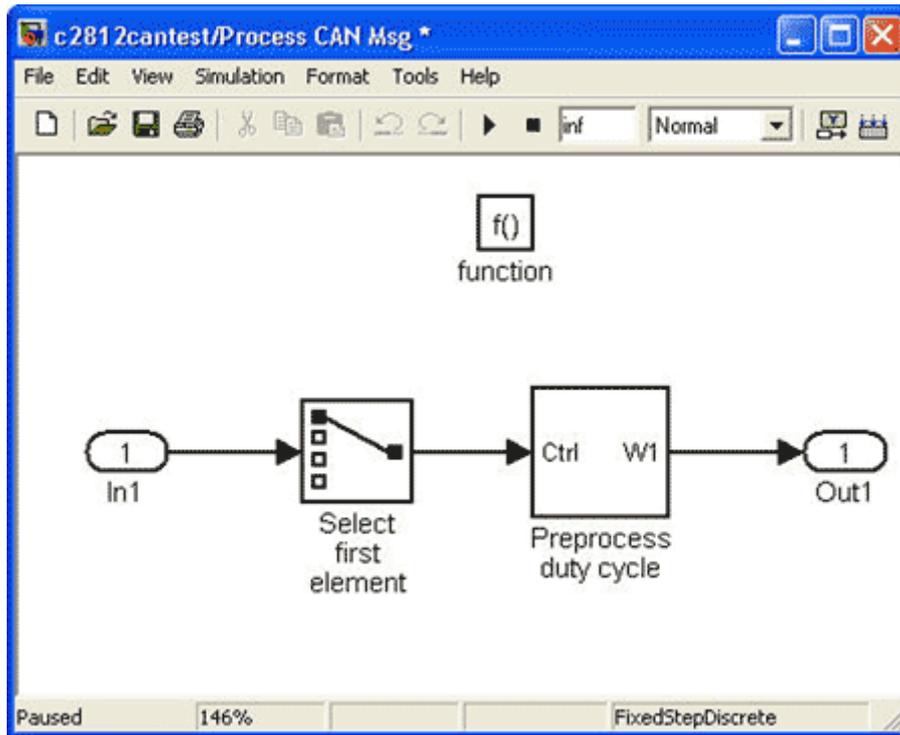


圖 8：CAN 訊息的處理邏輯

控制器的網路連結能力，可利用附加卡（add-on card）輕鬆進行模擬，其可為電腦提供 CAN 支援功能（如圖 9 所示）。

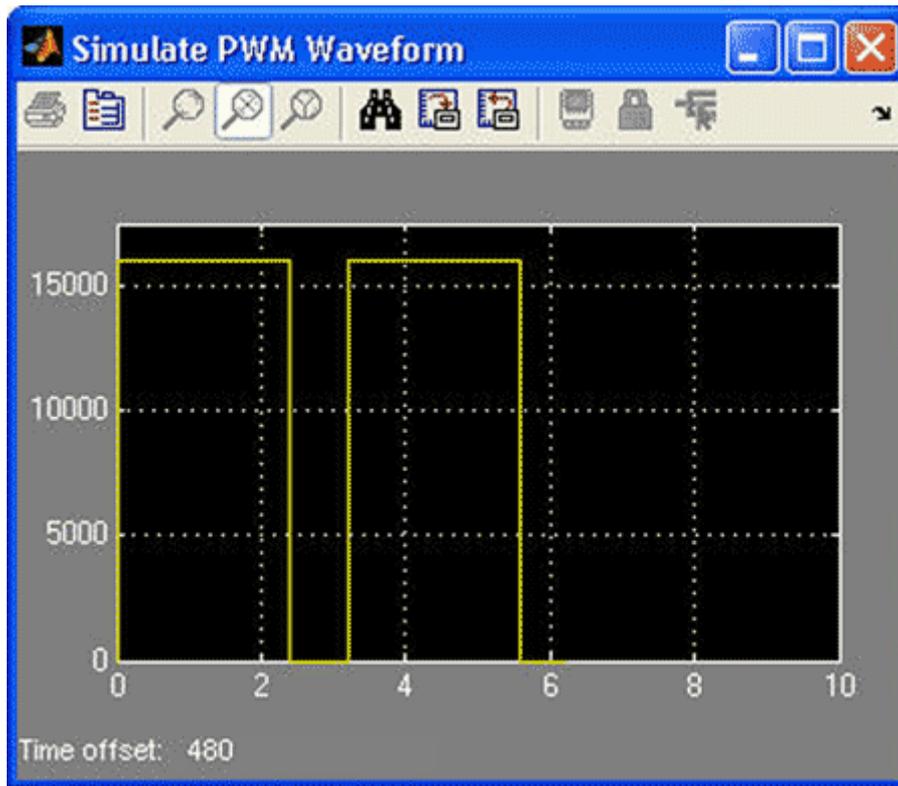


圖 9：於桌面型電腦上模擬 CAN 基礎控制器網路的功能

當代表模型的應用程式在真實的 DSP 硬體上執行的同時，相同功能即可用以調整模型參數並獲得模型資料。

## 結論

模型基礎設計可協助日益精密的嵌入式馬達控制器的研發，在其所提供的環境中，不僅可利用模擬以快速評估替代設計概念的性能，並可自動將模型轉換成有效率的 C 碼進行硬體迴路模擬。此方法可產生高性能，既可評估大量的替代設計，同時又能降低工程成本。

## 參考資料

- Wong, William. March 2004. Tool Speeds TI DSC Application Development. Electronic Design Online – Article ID#7663
- EE Times ACE Ultimate Products of the Year. San Francisco, CA. March 10, 2005.

MathWorks 公司 Arun Mulpur 博士與  
Zijad Galijasevic 博士

2006 年 8 月 8 日

### 按一下此處可列印 PDF

(按一下此連結即表示您同意 Embedded Technology Journal 的 PDF 檔使用條款。) PDF 檔僅供本公司的讀者私人使用，未經 Techfocus Media, Inc. 書面許可，嚴格禁止重新發行、連結或任何其他散布此 PDF 檔的行為。

## 作者簡介：



**Arun Mulpur**，自 2002 年開始為 MathWorks (位於麻薩諸塞州納提克市) 公司工作，現職為訊號處理產品行銷經理。1994 年至 2002 年間，Arun Mulpur 任職於 Visual Solutions 公司 (Westford, MA)，最後擔任的職位為產品工程主任。

Arun Mulpur 於 1989 年與 1994 年分別取得麻薩諸塞大學 (University of Massachusetts) 的碩士與博士學位，學士學位則於 1986 年在印度的歐斯馬尼亞大學 (Osmania University) 取得，三個學位均為電機工程學。

Mulpur 博士已撰寫了多篇技術論文與文章，並於研討會上發表，範圍涵蓋非線性控制系統、非線性動態、訊號處理、嵌入式系統與硬體實作及驗證。



**Zijad Galijasevic** 自 2001 年起開始為 MathWorks (位於麻薩諸塞州納提克市) 公司工作，現職為首席嵌入式 DSP 工程師。Zijad Galijasevic 目前參與 Texas Instruments 公司 DSP 模型基礎設計與部署工具的研發。加入 MathWorks 前，Zijad Galijasevic 於德州農工大學 (Texas A&M University) 擔任研究人員。

Zijad Galijasevic 於德州農工大學 (德州大學城) 取得博士學位，而碩士及學士學位則於塞拉耶佛大學 (University of Sarajevo) (波士尼亞赫塞哥維納) 取得，三個學位均為電機工程學。

Galijasevic 博士已撰寫了多篇技術論文並於研討會上發表，範圍涵蓋了模型基礎設計嵌入式系統部署及電力系統應用的智慧型計算。

您對本文是否有任何意見？請來信至：[comments@embeddedtechjournal.com](mailto:comments@embeddedtechjournal.com)

本文著作版權屬 The MathWorks™ 公司，請勿任意轉載