

使用模型化基礎設計(Model-Based Design) 開發世界上最先進的義肢手臂

James Burck, Michael J. Zeher, Robert Armiger, and James D. Beaty, Johns 約翰斯霍普金斯大學應用物理實驗室

鮮少人瞭解神經元、機械與感知系統之間複雜的相互作用，即使是執行一個簡單的任務，像拿起一個球。如何製作一個義肢能夠自然的運動，且必須要模仿上述複雜的系統、之間複雜的相互作用，並利用先進的促動器(actuators)、感應器(sensors)、微處理器和嵌入式控制軟體，這是我們在著手國防先進研究計劃局(DARPA)的革命性修復技術計劃時所面臨的挑戰。

約翰斯霍普金斯大學應用物理實驗室 (APL) 是一個全球領先的團隊，包括政府機構、大學和私人公司，其使命是開發出一個凌駕當今任何義肢的義肢手臂。我們最後呈現出來的手臂版本，是由神經元輸入驅動控制算法，使穿戴者能隨著速度移動，靈巧的使用以及出力，就如同一隻真正的手臂般。先進的感知反饋技術，可輸入身體的知覺如壓力、力量和溫度。最關鍵性的里程碑是我們發展出一個虛擬整合環境 (Virtual Integration Environment, VIE)，一個使用 MathWorks 工具與模型化基礎設計概念所建立出來的完整肢體系統模擬環境。藉由標準化的架構和定義良好的界面，這個虛擬整合環境 VIE 可使包含來自超過 20 多個夥伴組織在內的自各領域專家，擁有一個共同合作的研發平台。MathWorks 工具之模型化基礎設計也被應用在其他關鍵性階段的發展，包括肢體力學模型、試驗新的神經元解碼演算法，以及開發和驗證控制算法等。

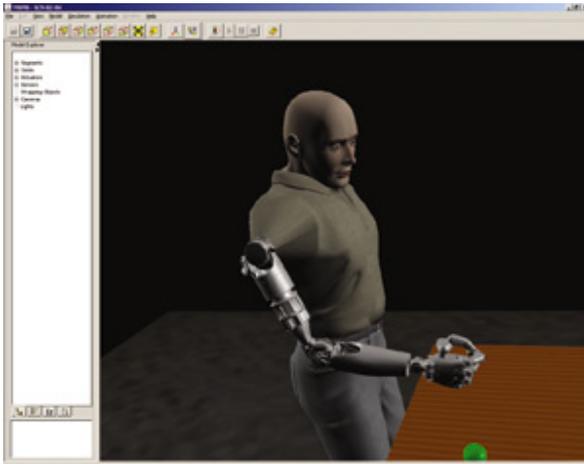
虛擬整合環境架構 VIE

虛擬整合環境由 5 個主要模組組成：輸入、訊號分析、控制、受控體和呈現。

輸入模組包括所有的輸入設備，使患者可以使用來表明他們的意圖，包括表面肌電圖 (肌電信號 EMGs)、皮層和周圍神經植入物、植入式肌電感應器 (IMESs) 以及更為傳統的開關、操縱桿和其他臨床使用的控制來源之數位和類比輸入。

訊號分析模組則進行訊號處理及過濾。更重要的是，該模組適用於型式(pattern)辨識演算法，能詮釋原始的輸入訊號以設法了解使用者的意圖，並將該意圖傳遞至控制模組。在控制模組中，這些命令會與馬達訊號相對映，進而去控制個別的馬達，制動肢體、手和手指進行活動。

受控體模組則由一個肢體力學分析的物理模型所組成。呈現模組最後可產生一個三維 (3D) 的動畫以展示手臂的運動。



圖一 義肢手臂的 3D 展示動畫圖

與神經系統的接合界面

Simulink[®]以及虛擬整合環境 VIE，對於發展神經系統的接合界面的開發，無疑是相當重要，它們能使義肢系統的控制更為自然與直觀。研究者記錄從植入神經元設備得到之數據時，當對象執行一些任務，如在虛擬環境中觸碰球體時，該虛擬整合環境模組即會將接收到的數據輸入系統，並進行 MATLAB[®]解碼演算，利用型式 (pattern) 辨識演算法以及對象運動相互關聯的神經活動，來了解主對象的意圖 (圖 2)。而結果會再整合回虛擬整合環境中，該實驗環境也能夠即時性 (Real-time) 的來執行。像這樣的同樣工作流程已被用來開發所有類型的輸入設備，其中有一些也已經在芝加哥康復研究所內被義肢穿戴者測試過。

建立即時 (Real-Time) 原型控制器

虛擬整合環境內的心臟控制系統，即訊號分析與控制模組，最終將會被轉檔並在義肢手臂上執行。在約翰斯霍普金斯大學應用物理實驗室 (APL)，我們自行開發這些模組的軟體。我們在 MATLAB 中使用嵌入式 MATLAB (Embedded MATLAB[™]) 子集開發出個別的演算法，然後再整合到 Simulink 系統模型中做為函數模塊。

爲了要建立一個即時控制系統的原型，我們利用一些產品來產生整個完整系統的程式碼，包括 Simulink 和嵌入式 MATLAB 組件，搭配 C 程式碼產生器 (Real-Time Workshop)，並將這些程式碼轉檔在 PC 環境即時控制模塊組中 (xPC Target[™])。這種方法帶來了許多好處。使用模型化基礎設計和 Simulink，我們將整個系統建模並進行模擬、優化及設計驗證，因此能夠在完成特殊硬體平台之前，迅速地開發

和測試虛擬原型系統。透過嵌入式 C 程式碼產生器(Real-Time Workshop Embedded Coder™)，可以產生適合目標處理器的特殊程式碼，由於程式碼是來自 Simulink 的系統模型，且已安全通過模擬測試和驗證，不需任何人工編碼步驟，因此不會設計錯誤或是那些不在計劃內的行為不會產生。因此，我們有高度信心，模塊化的義肢將會依據預期的效果和設計執行出來。

物理建模與視覺化

爲了執行控制系統的封閉迴路(closed-loop)模擬，我們設計出一個受控體模型來代表肢體系統的慣性性能。首先從 CAD 組件肢體組成部分開始，我們的合作夥伴是在 SolidWorks®進行設計，接著我們利用這些 CAD 組件，在機構模擬模塊組 (SimMechanics™)中自動產生一個肢體模型，然後再將此模型連接到 Simulink 下的控制系統。最後在南加州大學，我們將受控體模型與 Java™三維顯示引擎連結在一起，在模擬環境中呈現虛擬肢體的運動。

臨床應用

由於虛擬系統建構的非常強大，我們還能夠爲系統條件的配置以及未來培訓，建立一個有用與直觀的臨床環境。臨床醫生可以在虛擬整合系統間重新配置參數，以及利用我們在 MATLAB 建立的使用者界面（如圖 3）與志願受試者進行管理測試實驗。

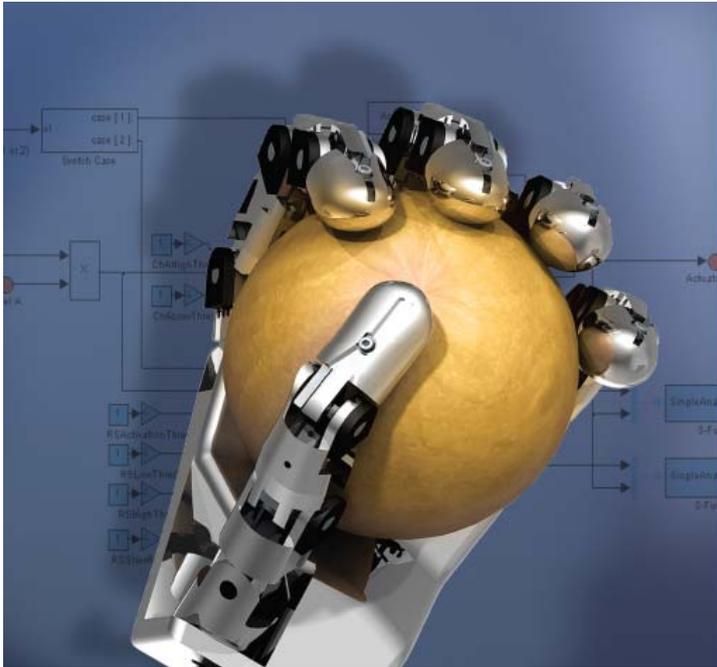
臨床醫生可以與主機電腦上的應用進行互動，而該主機電腦另一端是與 PC 環境即時控制系統(xPC Target)連結，用來執行控制軟體的即時(Real-Time)性工作。而第三台電腦則用來顯示虛擬肢體的三維呈現與表現。因此當進行實際肢體測試，目標穿戴者移動時，我們就可以互動地將控制訊號視覺化顯示出來。

展望未來

使用模型化基礎設計，義肢團隊已經發展出且交付出原型一號、原型二號義肢出來了，且開發出遠超過計劃時程的虛擬整合環境 VIE 的第一個版本。目前，我們正處要開發更爲詳細設計的義肢模組的階段，這個新版本未來將會提供給國防先進研究計劃局(DARPA)。

我們的許多合作夥伴機構已使用這個虛擬整合環境作爲他們的試驗床，因爲他們也想不斷提升自己的系統，我們希望這個虛擬整合環境能繼續作爲一個平台，爲未來義肢及神經科學的發展貢獻心力。我們的團隊已經建立了一個發展流程，讓我們可以使用一個快速的組裝系統，從可重複使用的模型和可實現的原型化硬體加速研發速度，這不僅將爲義肢研究，也將爲相關方案帶來革命性的突破。

我們迎接挑戰，矢志建立一個可模擬自然運動的機電整合系統，並配合毅力和決心，為我們的志願受試者和廣大截肢民眾，日日繼續努力。



圖為 DARPA 目標肌肉神經再支配使用計劃所開發出的兩款原型義肢，本技術由芝加哥康復研究所 Todd Kuiken 博士率先提出。這項技術是把斷肢的剩餘神經移轉，改植入到病患靠近傷口未用到的肌肉周圍。在臨床評估中，我們的第一個原型可使病人完成各種功能的任務，包括從口袋中拉出信用卡。

Mimicking Nature on a Deadline

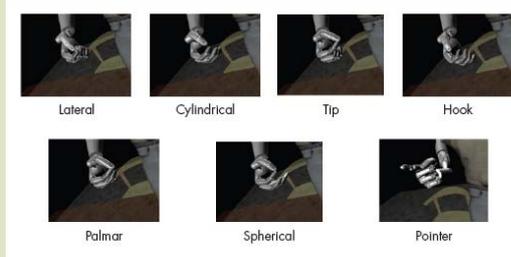
Developing a mechatronic system that replicates natural motion and preparing it for clinical trials in just four years, as mandated by DARPA, requires breakthroughs in neural control, sensory input, advanced mechanics and actuators, and prosthesis design.

State-of-the-art prosthetic arms today typically have just three active degrees of freedom: elbow flex/extend, wrist rotate, and grip open/close. Proto 1, our first prototype, added five more degrees of freedom, including two active degrees of freedom at the shoulder (flexion/extension and internal/external rotation), wrist flexion/extension, and additional hand grips. To emulate natural movement, we needed to go far beyond the advances in Proto 1.

Proto 2, which was developed as an electromechanical proof of concept, had more than 22 degrees of freedom, including additional side-to-side movements at

the shoulder (abduction/adduction), wrist (radial/ulnar deviation), and independent articulation of the fingers. The hand can also be commanded into multiple highly functional coordinated "grasps."

The Modular Prosthetic Limb—the version that we will deliver to DARPA—will have 27 degrees of freedom, as well as the ability to sense temperature, contact, pressure, and vibration.



Proto 2 hand grasps.

在期限內模仿自然

要在 4 年之間開發出一個模仿自然運動的機電整合系統、為臨床試驗做準備，且完全依照國防先進研究計劃局(DARPA)的規定，實非難事，這需要神經控制、感官知覺輸入、先進的機械與傳動裝置以及義肢設計等突破性的設計。

目前國家最先進的義肢手臂上一般只有三個主動自由度：肘關節彎曲/伸展，手腕轉動，以及抓緊打開/關閉等動作。原型一號(Proto 1)，我們的第一個原型，則加入了更多 5 個自由度進去，包括兩個肩膀的主動自由度（彎曲/伸展和內部/外部旋轉）、2 個手腕部份的屈曲/伸展，以及一個手部抓緊動作。若要模擬自然的運動，我們還需要比原型一號更為先進的設計。原型二號，是用來證明機電整合的概念，有超過 22 個自由度，包括肩膀從左到右側的運動（外展肌/內收肌）、腕部（徑向/尺骨繞向）以及獨立關節的手指手也可以被定義為多個功能強大的指揮協調的“抓手”(grasps)。

而我們現在即將要提供給 DARPA 的模組化的人工義肢，不僅將會有 27 個自由度，它還能夠感知溫度、接觸、壓力和振動。

Proto 2 Hans Graps 原型二號的手部抓力動作

Lateral-側向活動

Cylindrical-圓柱體的

Tip-輕觸

Hook-倒鉤

Palmar-手掌反射

Spherial-球形

Pointer-指向



圖二 *New Brunswick* 大學之 MATLAB 應用開發，用來記錄型式(pattern)辨識的運動數據。



圖三 利用 MATLAB 開發出來的使用者界面，用來重新配置義肢的各項參數。