

國 立 清 華 大 學

工 業 工 程 與 工 程 管 理 研 究 所

碩士論文

以人機系統協同為基礎的數位人模擬方法

所 別：工業工程與工程管理研究所

組 別：工業工程組

學生姓名：謝守澤

學 號：9834551

指導教授：王茂駿 博士

中 華 民 國 一 百 年 七 月

摘要

近年來因為電腦以及圖學技術的快速發展，產業界都紛紛開始使用數位模擬的技術，在設計或製造端上進行輔助。另一方面數位人體模型的發展也逐漸成熟，產業開始利用電腦輔助來建構具真實人體外觀的數位人體模型，並產生擬真的數位人體動作，藉此來進行設計與評估。但因為真實作業現場的模擬作業中，常涉及人機系統的協同作業。因此幫助模擬人員產出人機系統協同的模擬動畫，以便進行相關的工作站評估，就成了一個重要的研究議題。

本研究旨在建立一套符合人機系統協同的數位人模擬方法，首先選擇適用人機系統模擬的數位模擬平台，並建立在不同動作產生方法，均可一致使用的數位人體骨架系統，讓數位人體模型的運用上更加有彈性。接著建立動作產生機制及動作產生策略，包括符合現場作業型態的行走策略，使得數位人體的動作產生，於數位模擬的上更有效率。在完善數位人體動作產生後，進一步建立人與機械協同的模擬方法，包括工作單元的設置、人機互動模組，讓數位人體所產生的動作能快速的被利用在人機系統協同的模擬程序當中。

本研究選擇在Visual Components的模擬平台下，以Python程式語言進行客製化程式開發。首先完善數位人體的動作產生方法，並建立人與機械設備協同的模擬方法。透過數位人工作單元的設置，作為人機系統協同模擬的基礎。並利用人機互動模組，結合數位人工作單元與機械設備的模擬參數，實踐人機系統協同模擬動畫的產生。本研究產出的模擬動畫，可以進而被應用在人機協同作業的工作站評估，包括進行新的工作站設計，人因評估等。藉此提升整體設計規劃的品質。

關鍵詞：數位人體模型、人機協同模擬、數位人模擬、動作模擬

Abstract

As the technology of digital human modeling gradually becomes mature, the industry starts to use computer to construct the human-like digital human modeling, and to produce the realistic digital human simulation for layout design and production planning. Since manufacturing system often involves the man-machine system, it's an important issue to produce the simulation of man-machine interaction to evaluate the design of workstation.

The study aims to develop a digital human modelling system that supports the evaluation of a man-machine system. First, a digital human skeleton that supports different motion generation methods was built. Second, the motion generation mechanism and motion strategy including walking strategy was developed to make the digital simulation more efficient. After completing the motion generation, the study built the simulation scenario about man-machine interaction including setting the working unit and providing the module of man-machine interaction. These methods generate the animation of man-machine system.

This study chose Visual Components as the simulation platform, and used the python language to develop the customized system. Combining the digital human's working units and machine's simulation parameters to generate the simulation of the man-machine system, and to evaluate workstation design and ergonomics job design to promote the quality of working life.

Key words: digital human model, motion simulation, man-machine system simulation.

誌謝

研究所這兩年中，我在迷惘中成長，在不同的道路上嘗試並成長，首先感謝 王茂駿老師的悉心教導，老師讓我知道在學術上嚴謹的精神與態度，並在老師的教誨之下，一路從起初的概念，一步一步地完成本研究。

感謝本研究室的成員，感謝 Jeff、Peter，他們是我碩士生涯中兩本最好的教科書，啟發我在學業和興趣上的方向。感謝德鴻、月齡、阿奇這些學長姊在各方面給予我協助。感謝 CJ、RJ、Tf、EJ 這些碩二的夥伴，不論是一起修課瞎搞，還是開會討論，都是最好的夥伴，感謝馨文、又嘉、阿柳、曾子，有你們研究室總是充滿了歡樂。令我的碩士生活增色不少。



目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.3 研究目的.....	2
1.4 研究流程.....	3
第二章 文獻探討.....	4
2.1 數位人體模型的發展與應用.....	4
2.2 數位人體模型的外觀建立.....	6
2.3 數位人體模型的動作產生.....	7
2.3.1 關節運動學.....	7
2.3.2 動作擷取.....	8
2.3.3 以資料為基礎的動作模擬方式.....	9
2.4 數位模擬.....	10
2.4.1 數位工廠.....	10
2.4.2 數位工廠的模擬應用.....	10
2.4.3 數位人模擬.....	11
第三章 研究方法.....	14
3.1 系統架構設計.....	14
3.1.1 問題定義.....	14
3.1.2 系統架構.....	16
3.2 模擬平台與數位人體骨架.....	17
3.2.1 模擬平台.....	17
3.2.2 數位人體模型的骨架定義.....	18

3.2.3 數位人體模型的參數化建構.....	20
3.3 數位人動畫產生方法.....	21
3.3.1 模擬動畫產生機制.....	21
3.3.2 動作編輯機制.....	22
3.3.3 步態模擬模組.....	26
3.3.4 模擬物件輔助設置.....	28
3.4 人與機械協同的模擬方法.....	29
3.4.1 工作單元的設置.....	29
3.4.2 人機互動模組.....	31
3.5 系統評估.....	32
第四章 研究結果.....	34
4.1 介面設計.....	34
4.1.1 數位人體參數化面板.....	34
4.1.2 動作產生面板.....	35
4.1.3 模擬物件輔助設置面板.....	40
4.1.4 人機互動面板.....	41
4.2 動畫模擬.....	42
4.2.1 動作產生模式.....	42
4.2.2 人機互動模式.....	44
4.3 系統評估.....	46
4.3.1 動畫驗證.....	46
4.3.2 系統比較.....	49
4.4 系統限制.....	51
4.5 系統應用.....	52
第五章 結論與建議.....	55
5.1 結論.....	55
5.2 建議.....	56
參考文獻.....	58

表目錄

表 3-1 數位人模擬系統問題定義	14
表 3-2 研究問題與對應的系統模組	15
表 3-3 數位人體模型肢段個數	19
表 3-4 數位人體模型肢段自由度	19
表 4-1 主要動作產生面板	37
表 4-2 工作單元相關面板	38
表 4-3 人機互動面板	39
表 4-4 系統比較	50



圖目錄

圖 1-1 研究流程	3
圖 2-1 軍事用途人體模型	4
圖 2-2 數位人體模型	6
圖 2-3 H-Anim 骨架模型	7
圖 2-4 同一末端位置的 IK 動作呈現	8
圖 2-5 動作擷取運用在生活動作	8
圖 2-6 數位工廠的流程	10
圖 2-7 事件模擬應用	11
圖 2-8 數位工廠模擬架構圖	11
圖 2-9 人機互動模擬	12
圖 2-10 數位人模擬	13
圖 3-1 系統架構	16
圖 3-2 Visual Components 操作介面	17
圖 3-3 數位人外觀模型	19
圖 3-4 數位人體模型參數化尺寸示意圖	20
圖 3-5 關鍵影格的產生	21
圖 3-6 數位人動作編輯機制	23
圖 3-7 不同作業高度的比例值區域	25
圖 3-8 不同蹲/跪蹲姿區域的初始動作姿勢	25
圖 3-9 關鍵動作的萃取	26
圖 3-10 行走路徑策略	27
圖 3-11 行走路徑策略的流程	28
圖 3-12 工作單元概念圖	30
圖 3-13 工作單元時間變異	31
圖 3-14 人機互動模組架構	32
圖 4-1 數位人體模型參數化面板	35
圖 4-2 動作產生面板	36
圖 4-3 模擬物件輔助設置面板	40
圖 4-4 開啟動作產生面板	42

圖 4-5 產生數位人動畫影格	43
圖 4-6 儲存工作單元	43
圖 4-7 讀取工作單元	44
圖 4-8 工作單元時間型態的調整	45
圖 4-9 人機互動面板	45
圖 4-10 Visual Components 系統與本系統之動畫比較	47
圖 4-11 MGS 系統與本系統之動畫比較	49
圖 4-12 系統應用分類圖	53



第一章 緒論

1.1 研究背景

近年來因為電腦以及圖學技術的快速發展，產業界都紛紛開始使用數位人體模型並利用其來產生擬真的人體動作，舉凡：電影產業、工廠模擬、數位娛樂等等。在工廠上的應用如利用數位模擬的技術，在設計階段模擬工廠的作業流程和人員的工作姿勢，即可在設計初期就運用數位環境進行評估並修正，這樣一來可以減少後期變更所需的大量成本。進而使整個生產流程最佳化且自動化。

數位人體模型的快速發展，數位人體模型建立和評估的方法開始日漸完備，也有許多市面上的套裝軟體，提供數位人體模型的動畫產生和評估模式。但真實人體的動作十分複雜，在擬真動畫的呈現上，往往需要模擬人員依靠自身的經驗，但隨著數位人體模型的發展，數位人體模型動畫產生也應該提供更直覺的方式，並趨向自動化與最佳化，以利模擬人員作相關的模擬評估。

在當今現代的製造系統當中人員仍是生產線上的重要因子。人員與機械設備的能力與特色彼此互補。若能結合人員的靈活性、資訊處理能力與機械設備的速度和力量，將會是最佳的生產系統。因此如何擬真的模擬人機系統的協同作業也是其中一個重要的議題，

1.2 研究動機

市面上有許多數位模擬的套裝軟體，均有各自的數位人體模型，但數位人體模型的動作產生，往往還是需要動畫師或模擬人員手動調整，不僅十分耗時，更需要長時間的經驗才能完成。另外市面上的套裝軟體產生數位人動畫的方式，一般還是採用個別動作元素的組合，常常會造成動作的不自然以及不真實，因此一種能快速並符合實際人體動作的數位人動作產生系統有其必要性。

在現今數位人體模型的動畫系統當中，大多都是採用結合單一動作元素，程序性的動畫產生方式。但這種動畫產生的方式，往往是基於單獨的動作或單

一的作業模式。在模擬流程當中，模擬人員往往需要作其他的調整，才能適用在現場作業的情況。因此使數位人體模型的動作產生，與整體的作業環境更緊密契合，是數位模擬中一個重要的環節。

因為人體的動作複雜擬真呈現困難，加上數位人體模型的動畫產生步驟十分繁雜。因此在過往的自動化模擬的系統當中，鮮少考量到人的因素，數位人模擬的系統當中，又往往只利用靜態模擬的方式。如何考量人機系統的協同作業，將數位人模擬和機械設備模擬的特性同時納入考量，客製化人機系統協同模擬的工具，是數位模擬上一個重要的議題。

1.3 研究目的

本研究目的是建立一套以人機系統協同為基礎的數位人模擬方法，主要欲先完善數位人的動作產生，並進一步讓數位人的動作產生能夠納入人機系統協同的模擬程序當中，進而產出擬真的模擬動畫。因此本研究開發一個數位人模擬的輔助工具，為一套建立在數位模擬平台上的客製化程式，其研究目的包括以下兩點：

目的一：基於人機系統的協同為基礎，完善數位人的動作產生

- (1) 參考不同的動作編輯方式，如關節運動學和即時控制，並依據國際標準，建立可用一致的數位人骨架系統。
- (2) 建立數位人參數化機制與其動作產生機制在數位模擬平台上。
- (3) 建立數位人的動作產生模組以及模擬物件的設置模組。
- (4) 透過模擬工作單元的設置，將數位人的個別動作，集成符合模擬活動的概念。

目的二：讓數位人模擬系統能夠納入人機系統的模擬程序中

- (1) 建立人機系統模組，將數位人的工作單元，納入人機系統的模擬程序中。

1.4 研究流程

本研究基於以上的目的與動機，從蒐集文獻中開始確立目標，搭配研究問題的剖析，定義出對應的系統模組。從建立合適的數位人體模型開始，依序建構數位人動作產生機制、數位人動作產生模組與人機系統協同的模擬方法，進而整合出數位人模擬的客製化系統，並進行實際模擬與驗證。最後完成此系統。

研究流程如圖1-1所示：

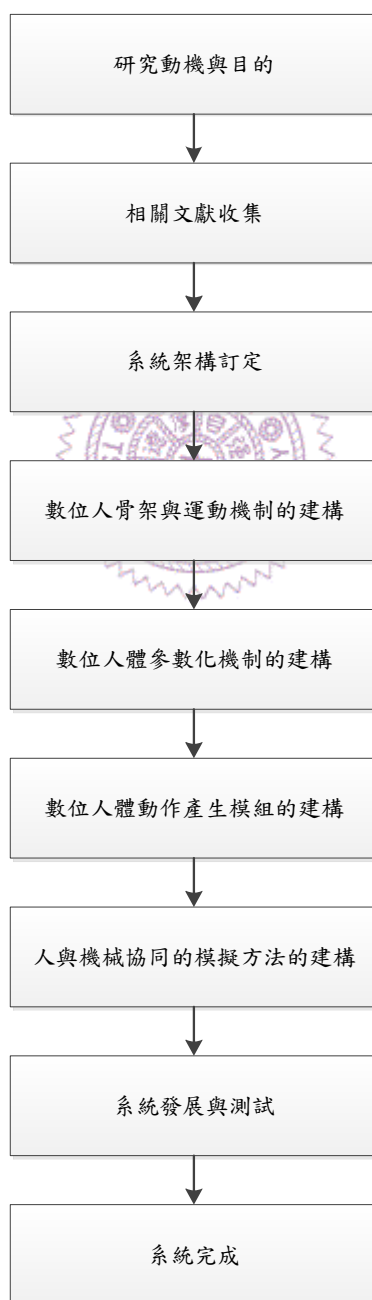


圖 1-1 研究流程

第二章 文獻探討

2.1 數位人體模型的發展與應用

數位人體模型是在電腦虛擬的環境下，以真實人體的參數為依據，所建立的一個幾何模型。數位人體模型因為具有真實人體的外觀與尺寸，因此在產品設計和系統評估的領域中，廣泛的被使用。如(Chaffin, 2007)利用數位人體模型來模擬人體的動作，用來幫助在汽車和工作站的設計。

隨著數位人體模型的發展，越來越多的產業開始應用數位人體模型在各個領域，包括航太(Silva et al., 2007)、汽車(Brazier et al., 2003)、建築(Steinfeld, 2004)、娛樂(Hertzmann et al., 2009)、醫學(Terada et al., 2008)、軍事(Yang et al., 2007)。如美國IOWA大學與軍方合作VSR計畫(Virtual Soldier Research)自2003年開始建構數位人體模型SantosTM，用於進行人與新型的軍事設備的模擬與軍事任務的模擬，支援人因分析，軍事任務的模擬分析、動作預測(Rahmatalla et al., 2009)等。

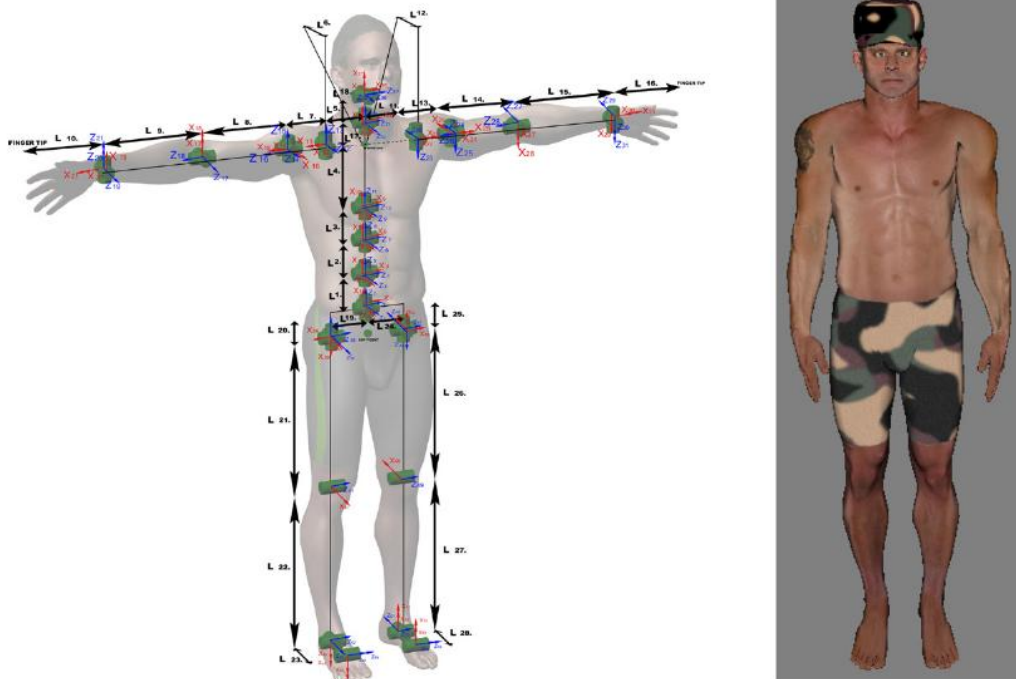


圖 2-1 軍用途人體模型(Rahmatalla et al., 2009)

利用數位人體模型輔助設計，有助於產業縮短產品從設計到上市的周期時間，並幫助設計師確認以人為主的中心設計理念，開發符合使用者需求的產品。另外數位人體模型可以視作真實人體在虛擬環境下的一個化身，進而去評估人的安全性及績效(Demirel & Duffy, 2007)。

3D數位人模型在設計與評估上的應用，從六零年代開始(Roebuck et al., 1975)，之後陸續有輔助產業進行設計的數位人體模型系統推出，SAMMIE™為最早被推出的數位人體模型來輔助設計的系統，之後有許多的產品開始陸續的被發展，如、BHMS™、RAMSIS™、SAFEWORK™和Jack™提供一個數位模擬的平台，讓數位人可以與3D虛擬物件互動，以進行產品空間與人的互動評估。RAMSIS™是專門應用在汽車及飛機產業，除了廣泛的人因評估工具外，更提供了專用的汽車模擬工具例如H-Point (http://www.human-solutions.com/index_en.php)；BHMS™則以飛機相關的駕駛艙設計及保養維修的分析為其特色(<http://www.boeing.com/assocproducts/hms/>)；Jack™內建人因評估模式，用以評量人員的動作，應用在組裝現場、產品設計及教育訓練上(<http://www.ugs.com/products/efactory/jack/>)，SAFEWORK™提供擬真的數位人體模型，可以針對作業環境以數位人體模型進行相關的作業評估另外也有如Poser™不像傳統的數位模擬平台，它主要提供包括詳細臉部表情擬真度高的數位人模，以滿足更精細外表的數位人模需求。(<http://poser.smithmicro.com/poser.html>)。下一小節將探討，數位人體模型外觀建立的相關標準與方法。

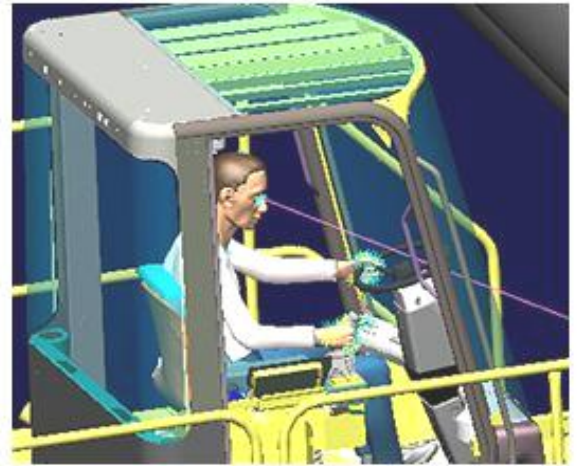
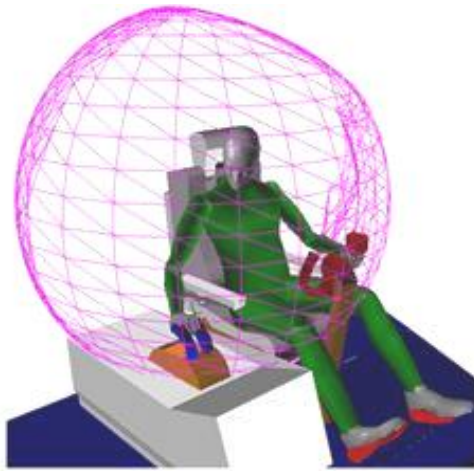


圖 2-2 數位人體模型
(圖片來源：RAMSIS 與 BHMS 網站)

2.2 數位人體模型的外觀建立

目前數位人體模型大都是以鏈結式骨架(articulated bone)所建立，再利用骨架與其它的功能結合進行實際應用。雖然鏈結式骨架跟真實人體的骨骼活動還有些差異，不過仍然是目前數位人體模型最普遍的建構方式。

Web3D Consortium 是一個為了建立 Web3D 規格標準的協會，Humanoid Animation (<http://www.h-anim.org>)是其中一個工作群組。因為數位人體模型的需求與種類逐漸變多，不同的資料格式往往使交換與傳輸變得困難，Humanoid Animation (www.h-anim.org)開始建立許多有關於數位人體模型的標準，包括骨架的名稱及其結構定義，定義不同的 LOA(Level of articulation)下的數位人體骨架的結構與命名方式。

建立鏈結式骨架的數位人體模型骨架，主要必須考量動作的細膩度和應用的範圍，所對應的關節精細程度(LOA、Level of articulation)越高，動作動畫的呈現就越有彈性越完整。一般來說 LOA 在 14 以下稱作”low level of articulation”，超過 72 的話則為”high level of articulation”，針對應用層面的不同，數位人體模型骨架的設計者，則應採用不同的 LOA。

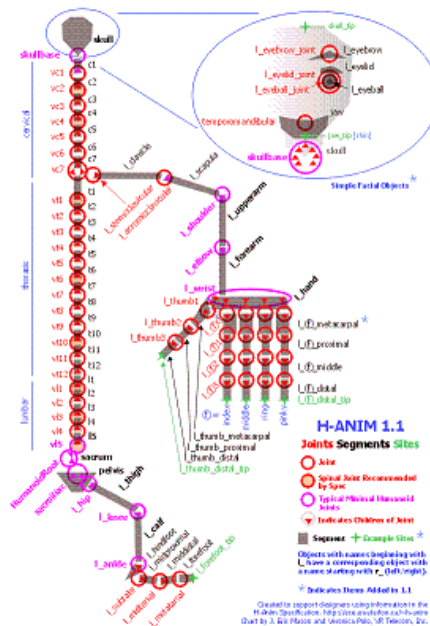


圖 2-3 H-Anim 骨架模型(<http://www.h-anim.org>)

2.3 數位人體模型的動作產生

2.3.1 關節運動學

在數位人體模型的動作產生上，有許多種不同的方式，例如：動畫師手拉動畫、利用動作擷取資料(Zordan et al., 2005)、動作預測(Abdel-Malek et al., 2001)和及時控制(Vlasic et al., 2007)等等。這些方式大多是以關節運動學的方式來驅動數位人體模型的鏈結式骨架，數位人體模型的關節運動方式主要有以下兩種，第一種為正向運動學(Forward Kinematics, FK)，第二種為反向運動學(Inverse Kinematics, IK)。正向運動學是利用階層架構的一種關係，從上而下調整關節角度，進而完成動作的產生，優點為可以呈現較準確的人體動作，但因為需要經過個別關節的角度調整，因此十分耗時。

反向運動學是利用末端點控制的方式，已知目標點進而牽動整個連桿系統。當連桿系統在空間中移動時，反向運動學即可由演算法估計出其他關節的角度(Tolani et al., 2000)。但人體動作的產生包含許多因素與限制，並非以連桿系統就可以呈現。因此在利用反向運動學產生數位人體動作時，肢段間常會有碰撞的情況產生(Gleicher, 2001)。

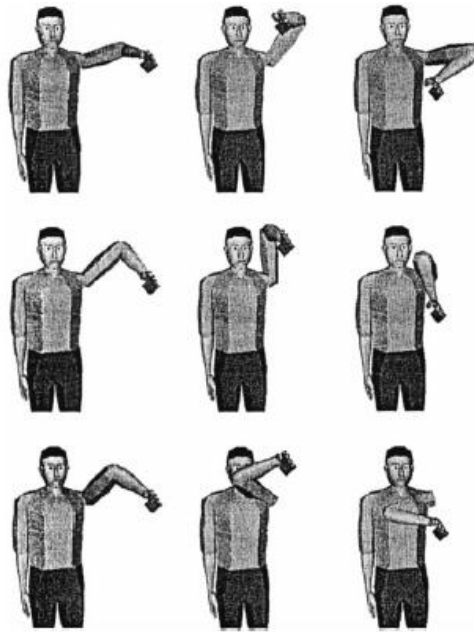


圖 2-4 同一末端位置的 IK 動作呈現(Tolani et al., 2000)

2.3.2 動作擷取

動作擷取技術可以記錄人的動作以及姿勢變化，捕抓細膩的肢體動作。可應用於電影動畫和姿勢分析等領域，一般來說動作擷取設備，可分為電磁式、光學式、機械式、聲波式和慣性感測式。藉由動作擷取設備，可以快速且準確的呈現人體的動作與姿勢變化。

已有許多研究利用動作擷取設備，呈現人體的動作，並進行運動分析等應用。Vlasic 等人(2007)用自行研發的微小化動作感測器及超音波感測來擷取人體動作，紀錄日常生活上不同活動間的動作。蘇晨豪(2010)建立一套利用慣性感測器，捕抓及時人體動作呈現的視覺化平台，並利用人體動作資料進行即時的生理負荷評估。但由於詳實記錄每一瞬間的資料特性，也造成往後資料要進行動作編輯及資料再利用時的不便。因此有許多研究便在探討如何利用不同的演算法，加強動作擷取資料的應用範疇。詳細的內容會在下一小節詳加論述。



圖 2-5 動作擷取運用在生活動作(Vlasic et al., 2007)

2.3.3 以資料為基礎的動作模擬方式

Chaffin (2005)指出合理的數位人體模型的動作產生，必須要建立在真實人體動作資料的基礎上。因此資料基礎的動作產生方式，關鍵就在動作資料庫的建立，利用動作資料庫中已知的資料和使用者的身體計測數值，透過統計方法(Faraway, 1997)、以資料基礎反向運動學的動作預測(Zhang & Chaffin, 2000)和其他動作模擬的模型(Park et al., 2004)去進行數位人體模型動作的產生。Faraway (2003)總結以資料為基礎的動作模擬方式有三個主要的元素，多樣化的動作資料庫、動作預測方法，特別的動作表達方式。

Faraway (1997)利用動作資料庫資料，以統計迴歸的方式去建立一種迴歸功能模型(Functional Regression Model)，藉由輸入一系列的共變數，包括性別、身高、體重及目標位置快速的去預測人的觸及動作。經研究驗證此迴歸功能模型有將近百分之八十的準確度在預測人的觸及動作。Faraway (1999)進一步對迴歸模型進行改進，利用終點的限制條件，允許產生的姿勢有些微的偏移量。但該方法建立在龐大的資料庫基礎上，如果要延伸出其他類型的動作可能會導致效果不佳。

Zhang 等人(1998)利用動作資料庫資料，利用一種具差別性的反向運動學(Differential Inverse Kinematics)，用來建立動作模型預測人坐姿時的觸及動作，這個模型假設反向運動學中手的動作權重優於其他關節來進行動作產生，這種具差別性的反向運動學被利用在產生難以被其他模型解釋的特定動作類型。

MBMS (Memory-based motion simulation)是一種模型，利用系統化方式採樣進而修正人體動作資料，產生新的動作情節(Park et al., 2004)。MBMS 模型主要由四個部分組成，動作資料庫，基礎動作的定義，動作變異的分析，動作修正演算法，利用動作資料庫的實際人體動作資料作為模板，進而修正成需要產生的新動作。

2.4 數位模擬

2.4.1 數位工廠

數位工廠為先期產出製造計畫的方法，整合各種數位模型與方法，目標以數位化方式進行生產規劃，以數位模擬的方式進行，確保產品設計時就考量生產時期的需求。數位工廠的主要優點為可增加安全度與可靠度，在設計的早期就可以提升產品的成熟度。Kuhn (2006)指出數位工廠幾項特點：(1)整合 CAD 以及 CAE 的資訊，(2)同步化價值鏈(Value Chain)上的相關工程，(3)設計人員可以跨越地理位置在同一平台上作業，(4)讓設計團隊與生產製造團隊更緊密合作，(5)讓產品架構可重複使用，這些特點使得數位工廠可以加速生產的規劃時間、簡化系統的複雜度、降低後期修正的成本，進一步提升整體規劃與設計品質。

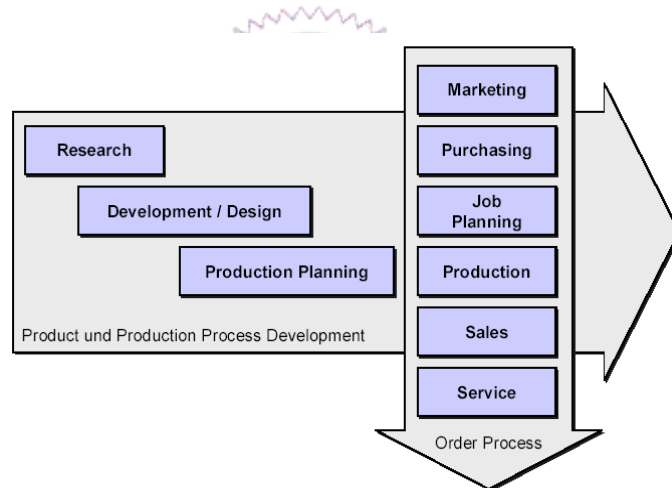


圖 2-6 數位工廠的流程(Kuhn, 2006)

2.4.2 數位工廠的模擬應用

數位工廠的模擬應用共可分三大部分：事件模擬、資源模擬、人因工程模擬。事件模擬又可稱之為流程模擬，目的為降低規劃風險，透過此模擬技術可進行人力需求分析、庫存分析、物流分析、生產流分析等，目標為追求系統最佳化，使決策者不再於資訊不足的狀況下進行決策。



圖 2-7 事件模擬應用(Ramis et al, 2008)

資源模擬主要是進行設備或資源上的規劃如機構分析、機械手臂和產品組裝順序確認等。用來提升設備的運用率及資源間互動的穩定性。人因工程模擬在於利用 3D 人體模型來模擬作業人員在各階段的作業動作。透過這種方式，利用不同的作業環境與不同尺寸的數位人體模型，來模擬分析作業環境、機器設備與人員的互動，可減少人員的危害，並增加作業的生產力。

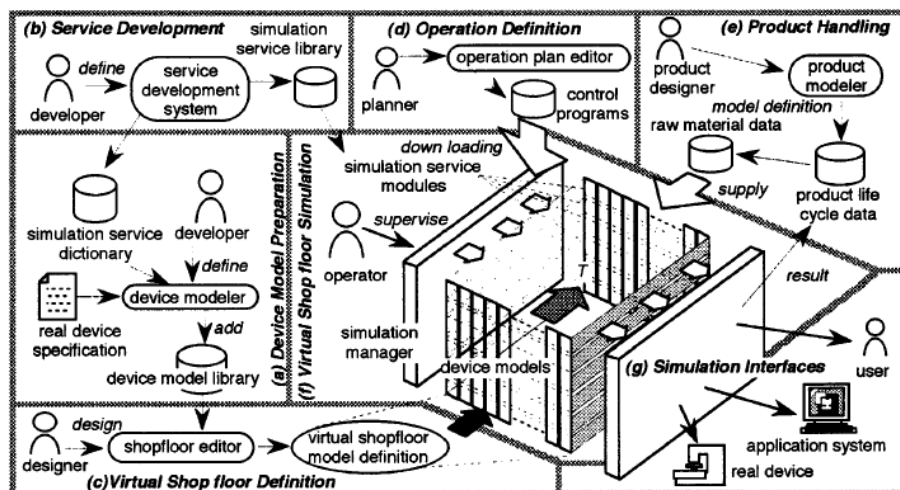


圖 2-8 數位工廠模擬架構圖(Iwata et al., 1995)

2.4.3 數位人模擬

數位人模擬一直是產品設計和系統設計領域中一個重要的評估工具，因為

人的各項因素影響著整體系統，人因的議題必須在早期就被列入考慮。數位人體模型和模擬技術的發展，快速地幫助我們進行評估，評估包括工作姿勢與工作負荷和視覺化呈現及分析如視野，觸及範圍(Reach Envelopes)和可及性(Accessibility)，以及人的績效和認知的評估。

Sisbot 等人(2007)在數位模擬環境下考量人與動態的機械，最佳化人與機械的互動包括路線與動作。數位人體模型一直以來是人與產品和作業環境之間一個重要的評估工具，但近年來模擬應用不只進行數位人與作業環境的評估，更進一步開始考量更多人與機械設備互動的行為。

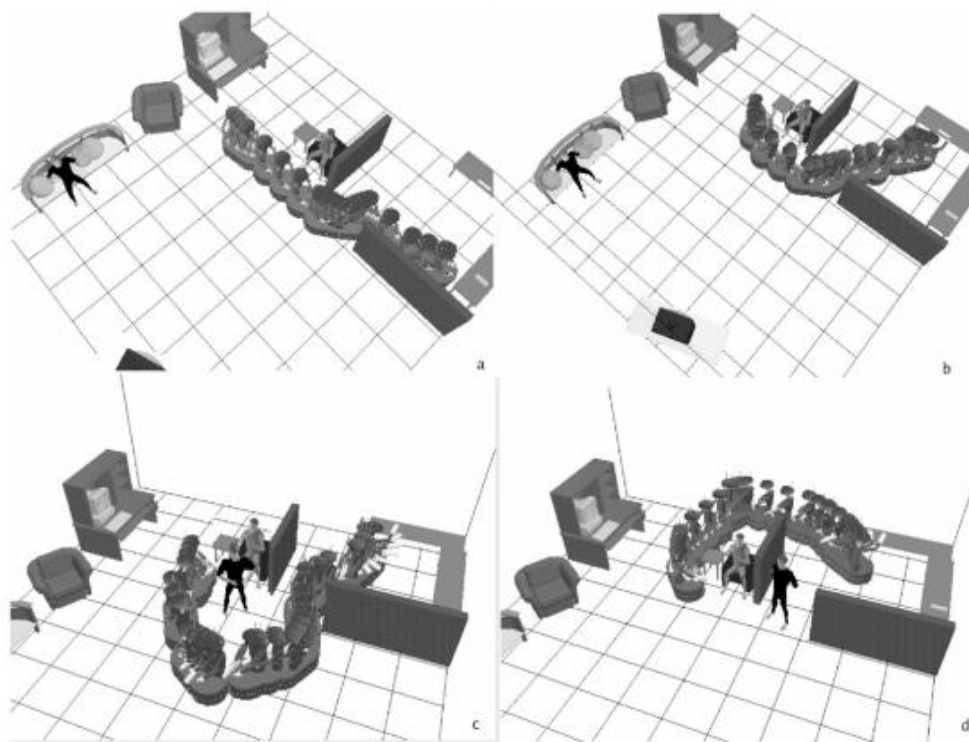


圖 2-9 人機互動模擬(Sisbot et al., 2007)

Lind 等人(2009)指出在現代生產系統中人員作業和自動化設備在工廠中有互補的功能，最好的生產系統是結合人員的靈活性和自動化設備的速度與力量。因此人在現代生產系統中依然占有十分重要的位置，加上數位人體模型的快速發展，將人加入數位模擬上的應用範圍也越來越廣，從產品的前端到後端，包括設計輔助及驗證、工作與生物力學分析，維修應用(Abshire & Barron,

2002)、訓練(Dong et al., 2008)等。Helin 等人(2007)提出一套工具利用數位人體模型，協助在設計早期讓使用者與設計團隊進行參與式設計(Participatory Design)，數位人體模型不只利用在產品設計後的評估，更利用在設計早期的概念設計，貫穿運用在一整個產品流程中。Lind 等人(2008)提出一個在現代生產系統下的一個架構，將人因資訊、環境資訊與自動化程度三個層面，一併整合進入製造模擬系統當中。



圖 2-10 數位人模擬(Lind et al., 2008)

整體而言數位人模擬已經開始被廣泛運用在整個製造系統當中，並且在現代製造系統中人與機械設備均是生產線上重要的角色，許多人與機械之間互動的行為與作業也廣泛的被探討，因此如何快速且擬真的在模擬平台上視覺化呈現人機系統協同的作業，就成為一個重要的議題，因此本研究希冀可以在基於人機系統協同的基礎上，滿足模擬人員在數位模擬上的需求。

第三章 研究方法

3.1 系統架構設計

3.1.1 問題定義

本研究以建立一套人機系統協同為基礎的數位人模擬方法為目的。透過文獻探討和資料搜尋，進一步定義兩個細部的研究問題分別為，(1)以人機系統的協同為基礎，如何完善數位人的動作產生，(2)如何讓數位人模擬系統能夠納入與機械協同的模擬程序中。針對如何完善數位人的動作產生。本研究以現今數位人模擬軟體與系統模擬軟體的兩個角度，分別對系統的三個要素資源(Resource)、活動(Activity)、控制(Control)進行探討。如表 3-1 所示。

表 3-1 數位人模擬系統問題定義

	數位人模擬	系統模擬
資源(Resource)		數位人體模型簡單，難以表達人體動作
活動(Activity)	1. 數位人動作產生耗時 2. 數位人動作複雜且細微，難以被組作一個模擬程序上的活動	數位人體缺乏動作產生機制，難以產生擬真動作
控制(Control)	人的動作邏輯複雜	

本研究發現現今數位模擬系統，在資源方面，系統模擬軟體的數位人體模型往往較為簡單，難以準確表達人體動作，在活動方面，系統模擬軟體的數位人體往往缺乏完善的動作產生機制，難以產生擬真動作，數位人模擬系統的數位人骨架和動作產生較為擬真，但產生數位人體動作耗時且步驟繁複，並且因為人體動作複雜且細微，故系統產生的數位人動作，較難以被描述成一個模擬

程序中的活動，最後在控制方面，因為人的動作邏輯複雜且彈性，其較難被數位模擬系統忠實呈現，這三方面中，在控制部分，因為要模型化人的控制和派工法則，需要嚴謹且複雜的數學邏輯來實踐，超過本研究的研究範圍。因此，本研究將針對數位人模擬系統的資源和活動兩方面，進一步提出對應的系統模組。如表 3-2 所示。

表 3-2 研究問題與對應的系統模組

研究問題	本研究對應的系統模組
以人機系統的協同為基礎，如何完善數位人的動作產生？	
1. 數位人體模型簡單，難以表達人體動作。	擬真的數位人體模型
2. 數位人體缺乏動作產生機制，難以產生擬真動作。	動作產生機制
3. 數位人體動作產生耗時。	動作產生模組
4. 數位人動作複雜且細微，難以被組作一個模擬的活動。	工作單元的概念(符合模擬活動的動作集合)
如何讓數位人模擬系統，納入與機械協同的模擬程序中？	人機互動模組

針對以上的研究問題，本研究選擇相對應的系統模組，透過在數位模擬平台建立擬真的數位人體模型，替代原先過於簡單的數位人體模型，建立數位人體的動作產生機制與動作產生模組，讓數位人的動作產生可以更快速及擬真。並提出工作單元的概念，將數位人個別動作的動畫彙整，建立符合模擬程序中活動的概念，最後建立人機互動模組，將數位人的模擬系統可以被快速納入人機系統的模擬程序當中，希冀可以擬真的模擬人機系統的協同作業。

3.1.2 系統架構

綜合以上研究問題與對應的系統模組，本研究提出以下的系統架構如圖 3-1 所示，選擇一個符合人機系統協同的數位模擬平台，在此數位模擬平台上，建立一彈性的數位人體骨架，並進行數位人體參數化機制的建構，接著建構數位人動作產生機制，利用運動學機制來驅動數位人體骨架，並進一步建立數位人動作產生模組，其包含數位人動作與步態產生的策略，透過物件輔助設定，以介面設定的方式，簡化模擬物件參考座標系設置的麻煩。總和以上最後開發人與機械協同的模擬方法，透過工作單元的設置將數位人的動作動畫彙整，並開發人機互動模組，讓數位人工作單元與人機系統的模擬程序作結合。實踐一套符合人機系統協同的數位人模擬方法。

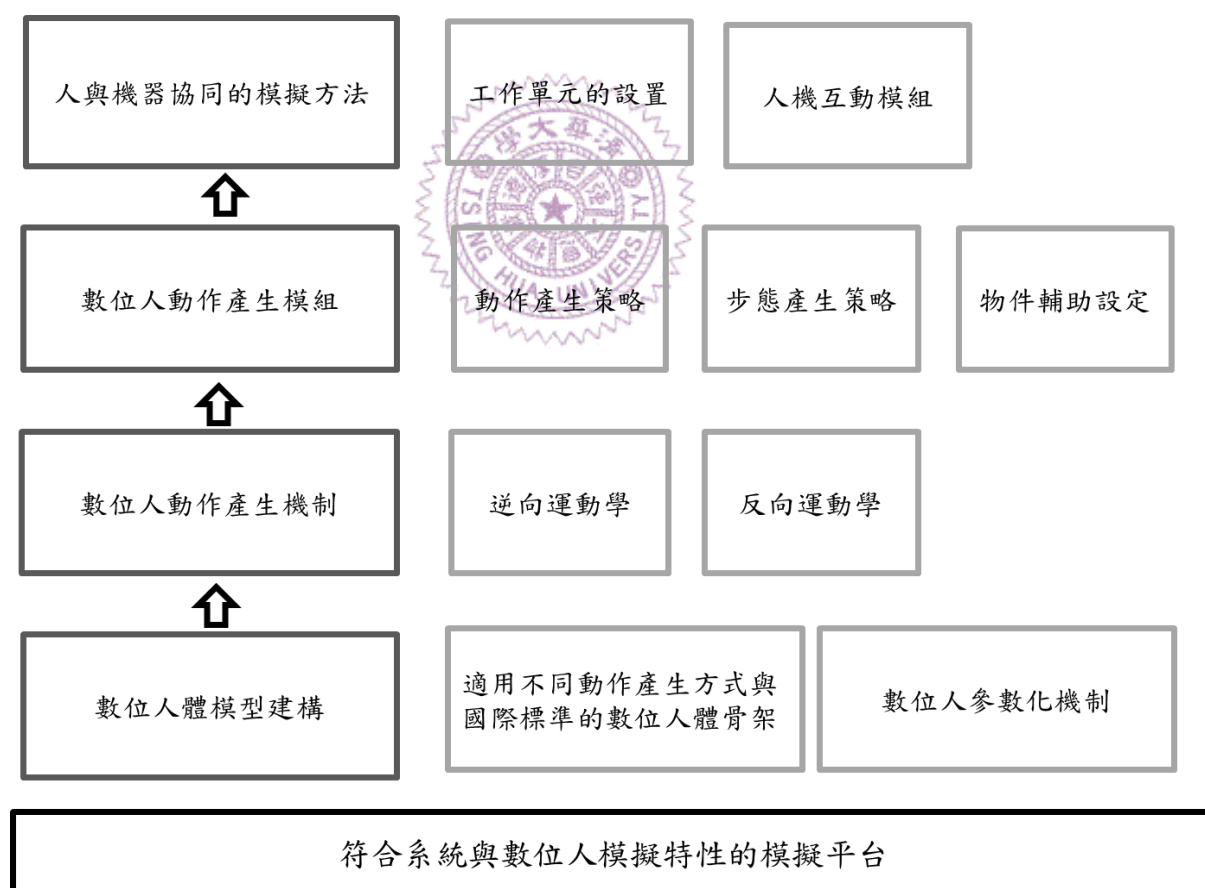


圖 3-1 系統架構

3.2 模擬平台與數位人體骨架

3.2.1 模擬平台

芬蘭廠商 Visual Components 是一個基於現代製造系統設計的模擬平台，可用來開發在外觀與行為上，和真實世界工廠相近的數位模型，且有大量可重複使用的模擬元件，操作介面直觀容易操作，即使不是資深的工程師依然可以輕易上手。Visual Components 的優點在於輕量化的模擬並提供離散事件導向的視覺化引擎以及開放式的系統開發架構。Visual Components 離散事件導向的模擬特性可以作為本研究在開發人機協同模擬的動畫產生方式上的基礎，開放式的系統開發架構則適用於本系統作為模擬引擎以及使用者介面的開發。

因此，本研究選定以 Visual Components 中的 3DCreate 平台來進行數位人體模型的建置，並利用的 Python 程式語言進行客製化程式的撰寫，本研究所使用的 Visual Components 其操作介面。如圖 3-2 所示。

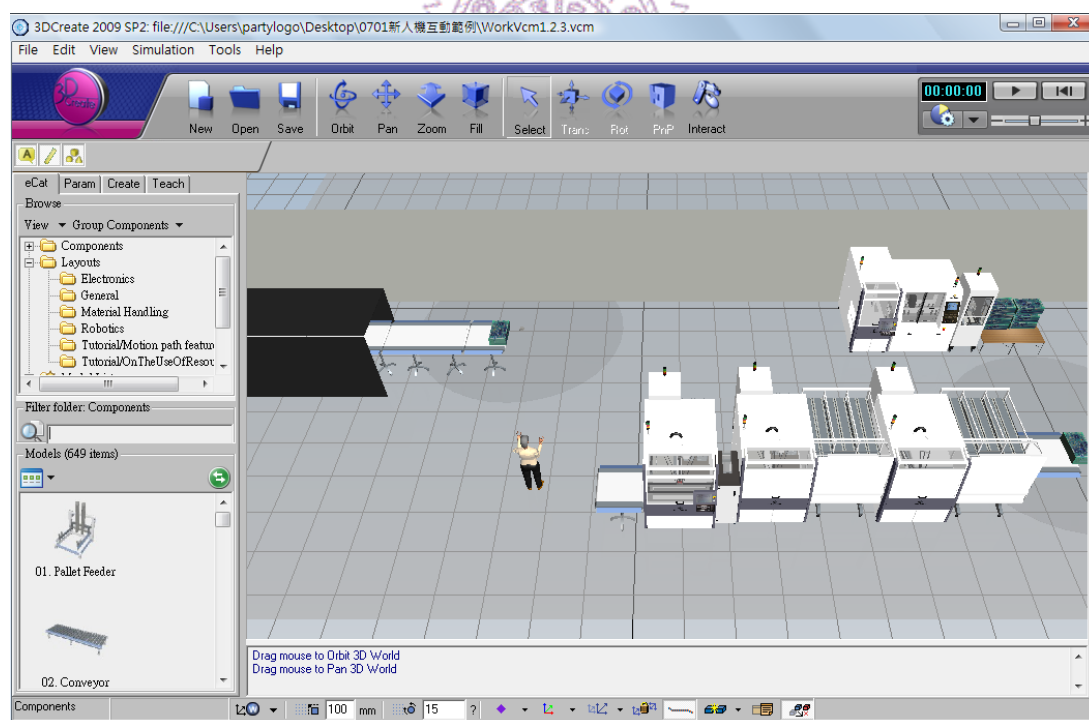


圖 3-2 Visual Components 操作介面

3.2.2 數位人體模型的骨架定義

本研究在建置數位人體模型的骨架定義上，除了考量動作精細度，更希望滿足不同模擬評估的需求和不同動作產生方式，建立一致可行的數位人體模型，因此主要考量之四個層面：包括模擬應用層面、人因評估方法、動作資料庫和關節精細度。在應用層面的方面，考量實際在真實現場的需求，以組裝作業和手工作業(Wanger et al, 2008; Hoffan, 2008)為首要考量。人因評估法方面重點以滿足生物力學評估與工作姿勢評估如 RULA (McAtamnet and Coelett, 1993)、OWAS (Kathu et al, 1981)等應用，動作資料庫的方面則參考 Michigan 大學 HUMOSIM (Human Motion Simulation)實驗室，自 1998 年起收集的人體動作資料庫，與 Carnegie Mellon 大學 Graphic Lab 所收集的人體動作資料庫，並參考 Humanoid Animation 所訂定的關節精細程度(level of articulation-LOA)設定介於 14 到 72 之間(一般來說 LOA 在 14 以下稱為”low level of articulation”，超過 72 則稱”high level of articulation”)。總結以上四個部分，本研究的數位人體骨架的肢段個數及自由度整理如表 3-3、表 3-4 所示，數位人體模型的外觀如圖 3-3 所示。

表 3-3 數位人體模型肢段個數

部位	肢段	數量
軀幹	頭部	1
	頸部	1
	胸椎第八節	1
	胸椎第十二節	1
	腰椎第三節	1
	腰椎第五節	1
	骨盆腔	1
上肢	肩胛骨	2
	上臂	2
	前臂	2
	手部	2
下肢	大腿	2
	小腿	2
	足部	2
	全部	21

表 3-4 數位人體模型肢段自由度

部位	肢段	自由度
軀幹	頭關節	3
	頸關節	3
	胸椎第八節關節	3
	胸椎第十二節關節	3
	腰椎第三節關節	3
	腰椎第五節關節	3
	骨盆腔關節	6
上肢	肩胛骨關節	3*2
	肩關節	3*2
	肘關節	1*2
	腕關節	3*2
下肢	髖關節	3*2
	膝關節	1*2
	腳關節	3*2
	全部	58



圖 3-3 數位人外觀模型

3.2.3 數位人體模型的參數化建構

本研究所建置的數位人體模型，共有 21 個關節，所有關節的自由度總共有 58 個，但數位人體模型的外觀除了考量關節數與自由度外，還需考量肢段長度的影響。本研究參考(林昱呈, 1997)歸納的 20 項人體體型具代表性的關鍵尺寸，並綜合本研究所建立的數位人體骨架結構，排除數位人體骨架無法定義的尺寸，訂定出本研究數位人體模型參數化的 19 種尺寸，如圖 3-4 所示。

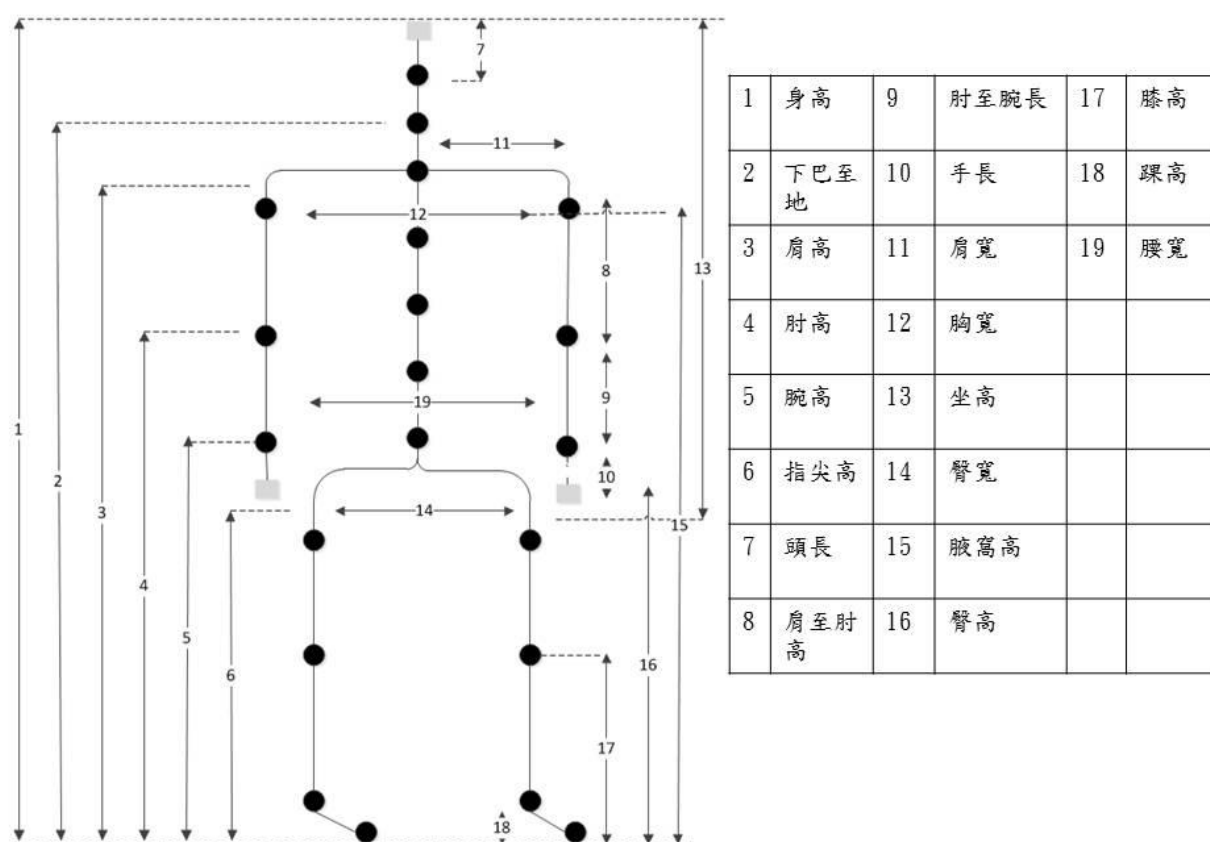


圖 3-4 數位人體模型參數化尺寸示意圖

根據以上 19 個數位人體參數化尺寸，本研究參考台灣地區人體計測資料庫手冊(王茂駿等, 2002)及國人勞工各肢段長度對身高比例的資料(林昱呈, 1997)，作為建立數位人體模型肢段長的依據。以男性成年國人人體計測資料，建立第 5%位數、第 50%位數及第 95%位數的泛用數位人體模型，讓使用者可以先從三種符合人體計測資料百分位的數位人體模型進行選擇，再透過數位人

體模型參數化機制，以系統介面功能微調數位人體模型的各肢段長。建構參數化的數位人體模型。

3.3 數位人動畫產生方法

3.3.1 模擬動畫產生機制

本研究的動畫產生機制主要利用 Visual Components 內的 Controller 和 Executor 工具建立正向運動學機制，Python Kinematics 工具進行反向運動學機制的程式撰寫，總共在人體模型上建置了五個主要的反向運動學機制。並命名為 IK-C7、IK-RightHand、IK-LeftHand、IK-RightFoot、IK-LeftFoot，負責控制軀幹、右上肢、左上肢、右下肢、左下肢的動作。利用 Action Script 工具撰寫行為動作的產生程式產生如抓握的行為，其後再運用 Python 程式語言撰寫，客製化程式控制 Motion Tech 的功能如圖 3-5 所示。產出動畫的關鍵影格(Key Frame)，經由 Visual Components 進行動畫內插演算而產生連續的數位人體動作。

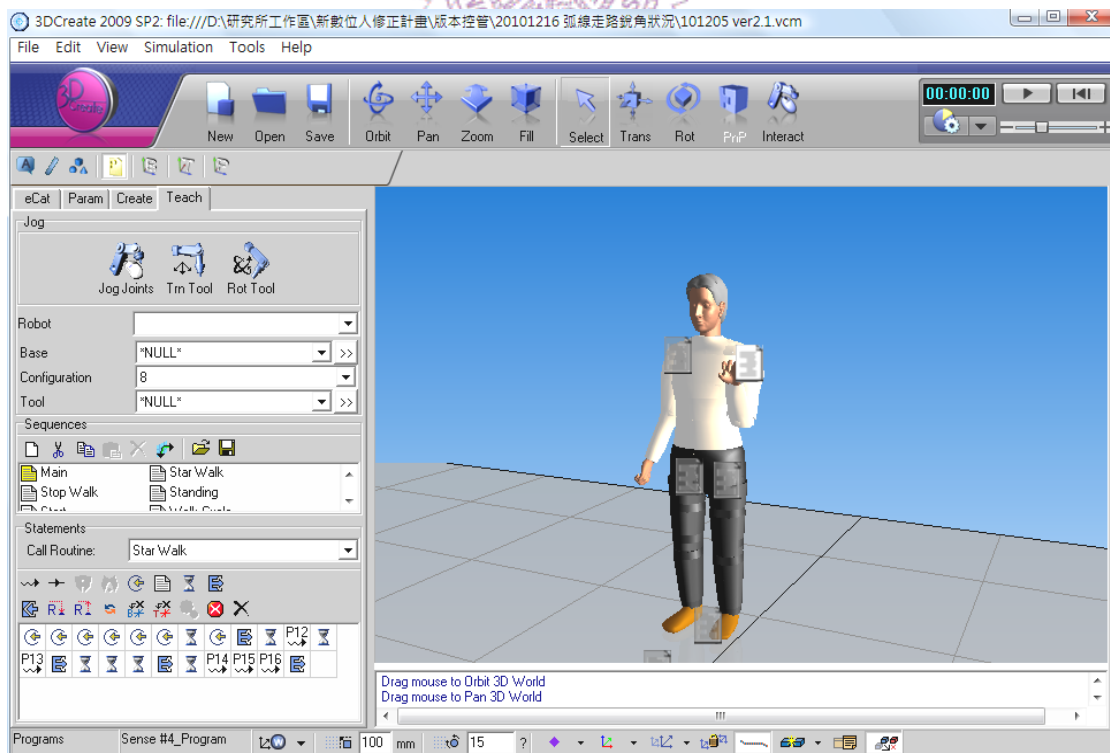


圖 3-5 關鍵影格的產生

3.3.2 動作編輯機制

在大多數的動畫模擬系統當中，數位人體模型的動作產生都是依靠正向及反向運動學來驅動數位人體的骨架，進而產生人體動作的姿勢。正向運動學的動作產生較為真實但耗時耗力，反向運動學的優點是能夠快速地產生動作，但容易有肢段相互穿透的問題。故本研究的動作編輯機制如圖 3-6 所示，先利用特徵區域的判斷，針對反向運動學容易產生不合理動作的特徵區域，先以正向運動學方式產生初始的動作姿勢，在利用反向運動學達到實際的作業動作，以減少只利用反向運動學造成的動作不合理。並透過人體實際動作的分解找出作業的關鍵動作，作為反向運動學關鍵影格產生的依據，希望能藉此產出擬真的數位人體模型的動作。



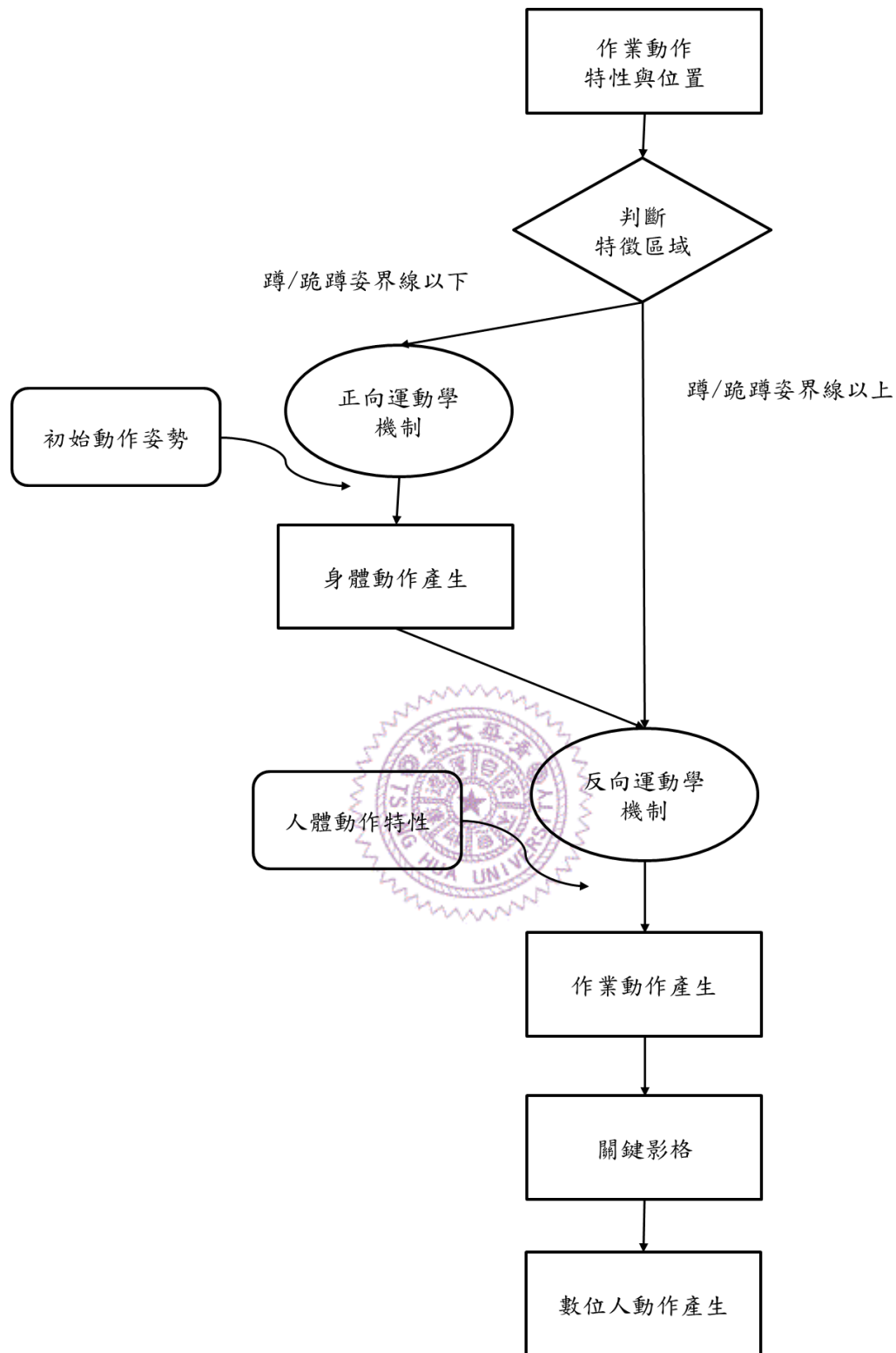


圖 3-6 數位人動作編輯機制

本研究參考(陳信男, 2009)將物體的不同高度對應到人體計測高度的方法, 根據人體的特徵高度身高、肘高、臀高、膝高、踝高高度, 利用台灣地區人體計測資料庫(王茂駿等人, 2002)得出, 台灣勞工的人體計測資料。並根據

不同的計測高度算出對應身高的比例如表 3-5、表 3-6 所示，以符合不同身高的需求，並將此比例值對應到數位人體模型上，當作不同高度下數位人身體動作產生的依據。

表 3-5 本國男性人體尺寸比例值

名稱	平均數 (mm)	Ratio
身長	1687.08	1.000
眼高	1585.35	0.943
肩高	1383.37	0.821
肘高	1048.96	0.621
臀高	730.90	0.433
膝高	445.84	0.264
踝高	119.15	0.070

表 3-6 本國女性人體尺寸比例值

名稱	平均數 (mm)	Ratio
身長	1687.08	1.000
眼高	1466.12	0.943
肩高	1280.43	0.823
肘高	1048.96	0.621
臀高	730.90	0.433
膝高	445.84	0.264
踝高	119.15	0.070

由於特徵比例值為單一的數值，故利用相鄰的特徵比例值平均，以得到特徵高度的區域。並選定臀高的區域上限為蹲跪姿的界線高，將作業特徵區域分作，眼高區域、肩高及肘高區域、臀高區域、膝高區域、踝高區域五個特徵區域如圖 3-7 所示。針對蹲跪姿的界線高以下的區域，結合產生彎腰、蹲姿、跪蹲姿等姿勢，先利用正向運動學在數位人體模型上產生初始的動作姿勢，建立不同區域的初始動作姿勢如圖 3-8 所示，接著對作業屬性進行判斷，一般的搬運動作採用蹲姿，需要專注的操作作業則採用跪蹲姿。最後依作業動作的位置，以反向運動學完成作業動作。

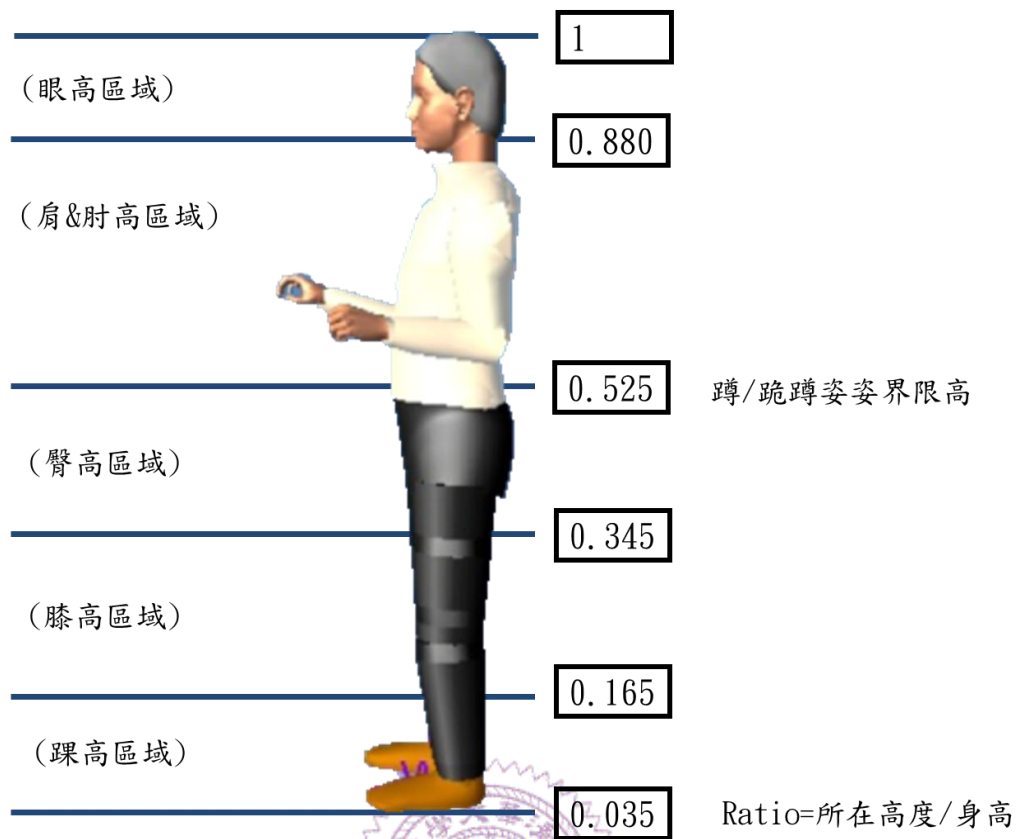


圖 3-7 不同作業高度的比例值區域



圖 3-8 不同蹲/跪蹲姿區域的初始動作姿勢

在利用反向運動學產生作業動作時，依照本系統的動作類型，根據個別動作特性，進行人體的作業動作分解。利用動作分解選擇作業動作的轉折點，將這些動作的轉折點視為關鍵動作，套用到數位人產生作業動作時的關鍵影格中，利用關鍵影格來進行動畫的線性內插如圖 3-9 所示，去增加作業動作的真實度。

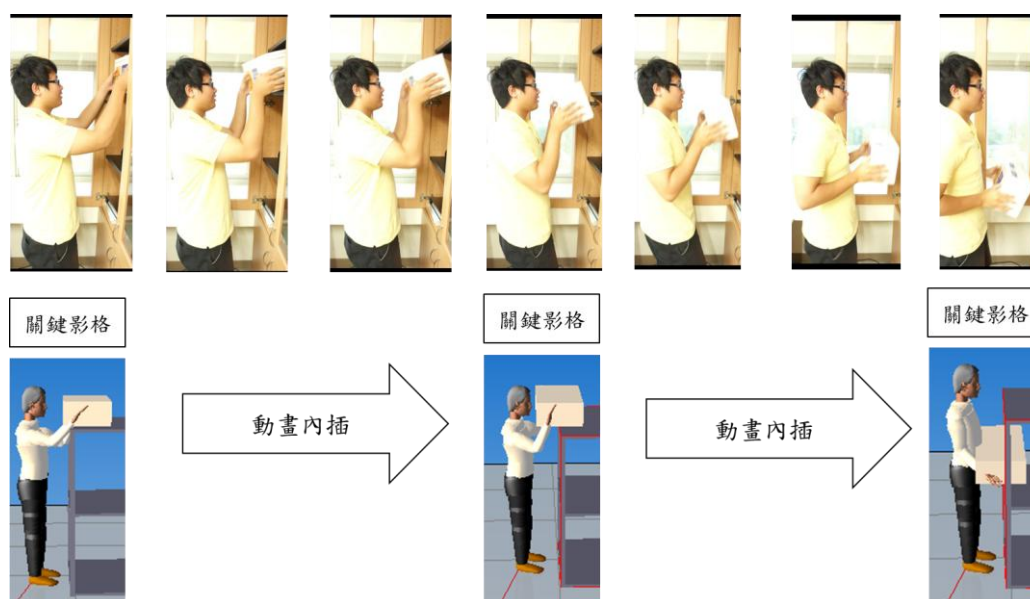


圖 3-9 關鍵動作的萃取

3.3.3 步態模擬模組

走路在數位人模擬裡是一個很重要動作行為，人工的作業常會有位置的移動。關於不同的步態行為和步態風格的相關研究十分多，但本研究注重在擬真表現作業現場人員的步行行為，個人及步態間的差異則不納入本研究考量的範圍內。在步行動作的產生上，本研究建立進行三種的標準步態包括動作起始步伐、行走步伐和結束步伐，並參考(陳志豪，2006)利用 MTM 步態定義計算步行的距離與步態的方法，建立數位人行走判斷法則。並進一步產生行走軌跡、行走距離與時間。

因為一般數位模擬軟體所產生的數位人走路動作只考慮直線行走，但在實際作業現場的許多工作，均有特定朝向的需求例如鎖附螺絲。若只使用直線行走的方式來組成行走動畫，會使數位人體的動畫過於僵化不自然，故本研究推論人體在不同作業模式下的行走路徑，目標在反映真實人體在靠近不同方向的作業目標時，所會呈現的行走動作。如圖 3-10 所示。

專注行走動作策略

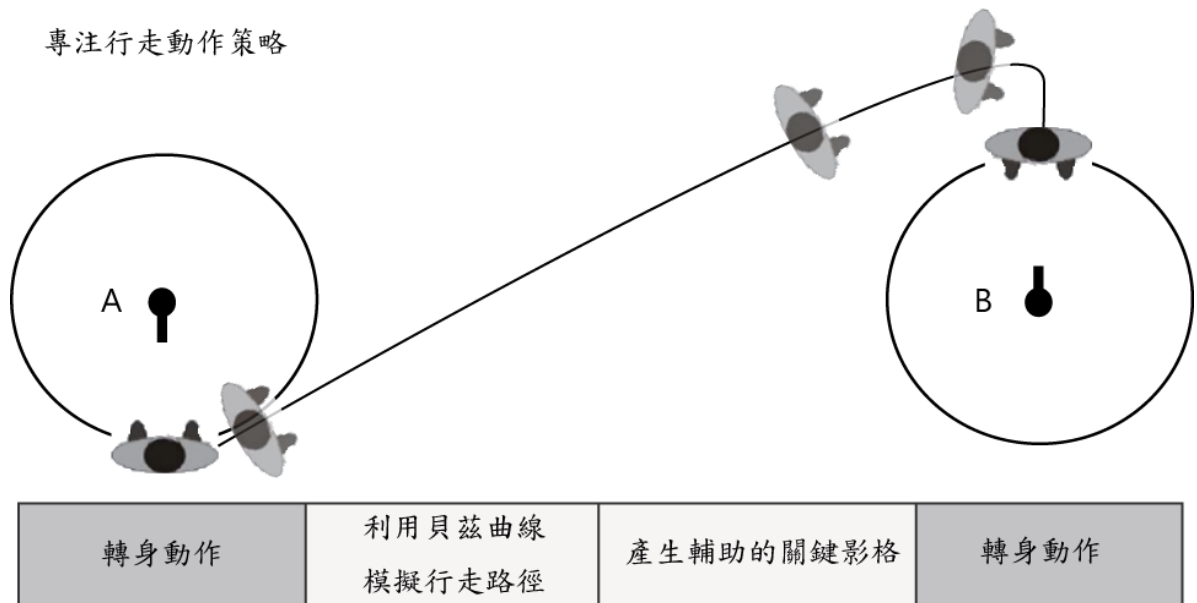


圖 3-10 行走路徑策略

本研究利用貝茲曲線來近似人體走路的路徑，貝茲曲線的特性為曲線的開始點和結束點均會落在曲線上，因此可以用來對應人體行走的開始與目標點，再利用調整控制點的方式產生平滑的曲線近似實際人體的行走路線。首先參考(李旭, 2007)針對不同作業的特性所訂定的不同步態類型，共分兩種，需要在特定方向面對的專注步態，以及不需要在特定方向面對的過渡步態。當行走動作產生時，先判斷作業型態是否需要專注步態，需要時則進行相互關係的判斷，利用物體與人相互的距離與角度，判斷行走的路徑上，是否會與目標物體產生碰撞，決定進行控制點的修正與否。接著產生模擬行走路徑的貝茲曲線，在貝茲曲線上取數個關鍵影格，利用多個關鍵影格的內插去近似真實人體的行走動作。行走路徑策略的流程如圖 3-11 所示。在產生行走路徑後，更可以對行走路徑作進一步的資訊產出，包括視覺化的行走路徑軌跡，行走路徑距離與速率的計算。

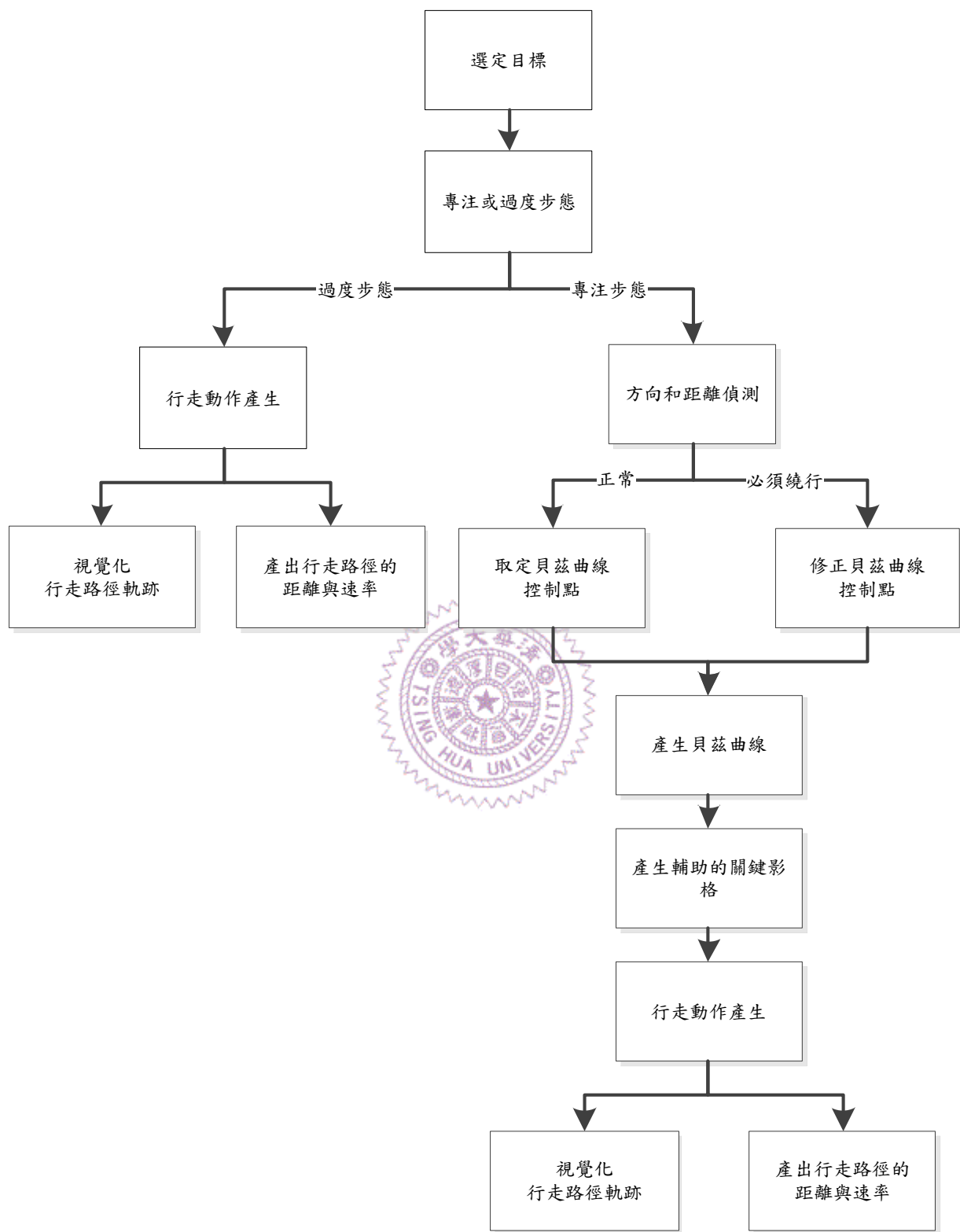


圖 3-11 行走路徑策略的流程

3.3.4 模擬物件輔助設置

考量數位人模擬的流程中，模擬物件的設置上常需要利用到參考坐標系來

輔助動畫的產生，但一般數位模擬平台的設置方式往往費時且不易上手。因此希望以更直覺的操作的方式，簡化參考坐標系的設置。故本研究根據數位人模擬設定中，參考座標系所提供的模擬資訊與數位人模擬動作產生的特性進行連結，將參考坐標系各個設置的步驟包括位置設置、方向的調整，簡化成使用者進行動畫產生的需求描述如：作業的步態、單雙手操作，並透過介面點選的方式，讓使用者能夠快速地設置，數位人模擬所需的參考座標系。

3.4 人與機械協同的模擬方法

3.4.1 工作單元的設置

考量數位人動畫設置再利用的需求，以及人的作業動作細微，動畫產生的個別數位人動作較難被組合成一個模擬程序中的活動。因此本研究提出工作單元的概念，由動作產生模組將動畫影格集結成數位人動作的動畫，再根據模擬作業的需求，將這些不同的數位人動作動畫彙整，組合成一個適用在人機系統模擬程序下的活動。

工作單元主要將同一模擬活動中的數位人動畫集結，並進一步從其中萃取模擬相關的資訊。包括時間資訊、物件資訊、位置資訊、作業順序，結合這些不同的數位人動作動畫及其相關的模擬資訊，完成一個工作單元的設置如圖 3-12 所示。透過工作單元模擬人員可以重複利用產生的數位人動畫，增加數位人模擬的彈性和效率，更以此概念作為人機系統協同模擬的基礎。

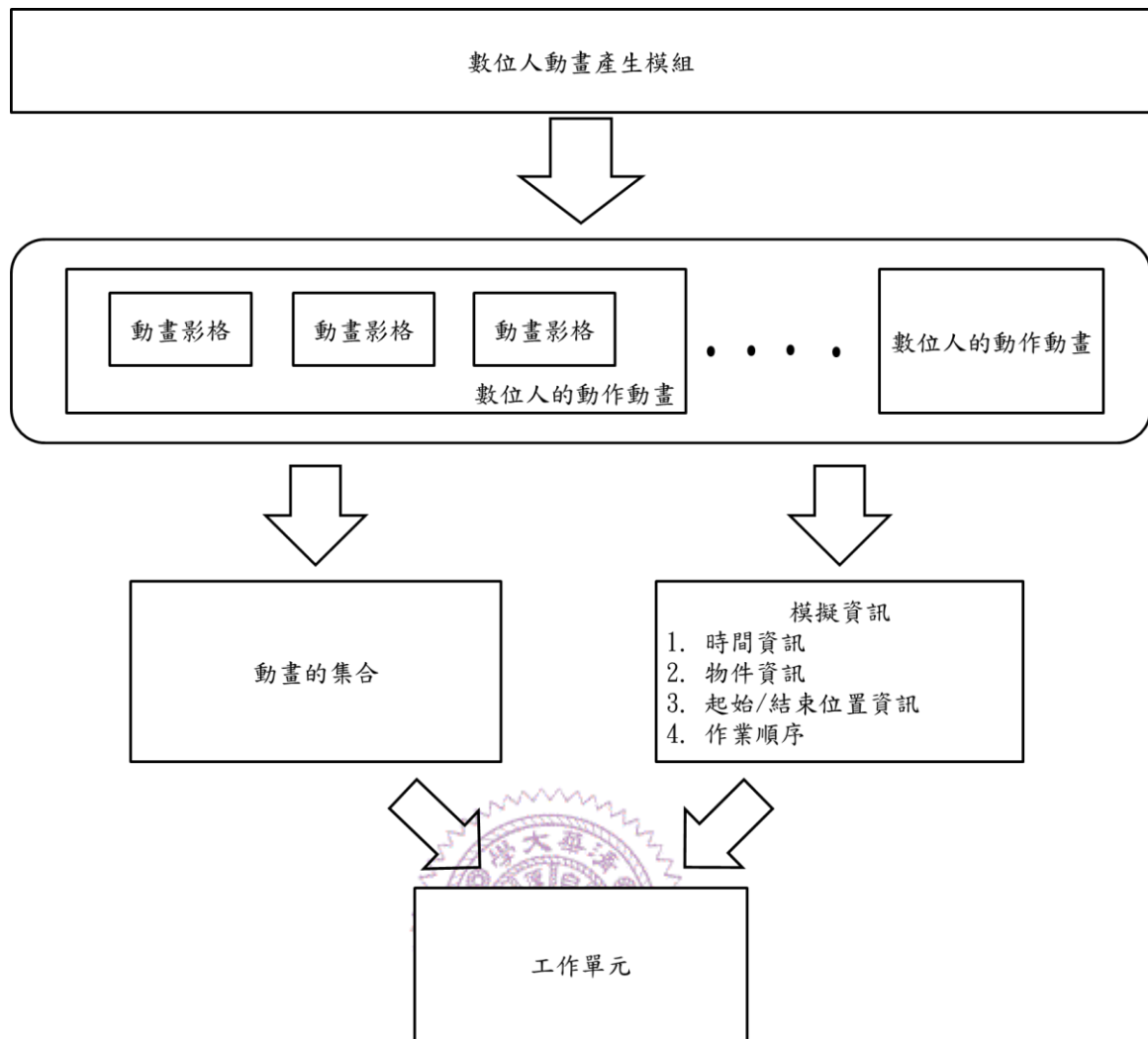


圖 3-12 工作單元概念圖

從數位人的動作動畫中萃取的這些模擬資訊中，物件資訊的提取，可以了解一個工作單元中所涉及的物件；位置資訊和作業資訊的提取，將用於工作單元和動作產生模組的銜接，起始位置可以將原有動作產生模組所設置動畫的結束位置與工作單元的起始位置的空隙，產生自動行走的銜接。結束位置讓動作產生模組可以接續工作單元的最後動作繼續生成動畫；作業資訊則用來判斷，工作單元內的依存的模擬特性(Ex:是否持物)，使接續產生的動畫可以呈現合理的數位人體動作；時間資訊的提取，則作為整體工作單元時間調整的基礎。

本研究也將系統模擬中作業時間變異的概念導入工作單元中，將工作單元的時間可以透過變異函數進行調整，包括固定型、常態分配、三角分配、均勻分配、珈瑪分配、指數分配，然後將作業時間的變更轉換成比例值，平均分配

在工作單元內每一個動畫影格當中如圖 3-13 所示，使得工作單元的時間能因應不同作業情況進行調整。總結以上透過這些模擬資訊的提取，將有助於提高工作單元的效用，並使其貼近系統模擬程序中活動的概念。

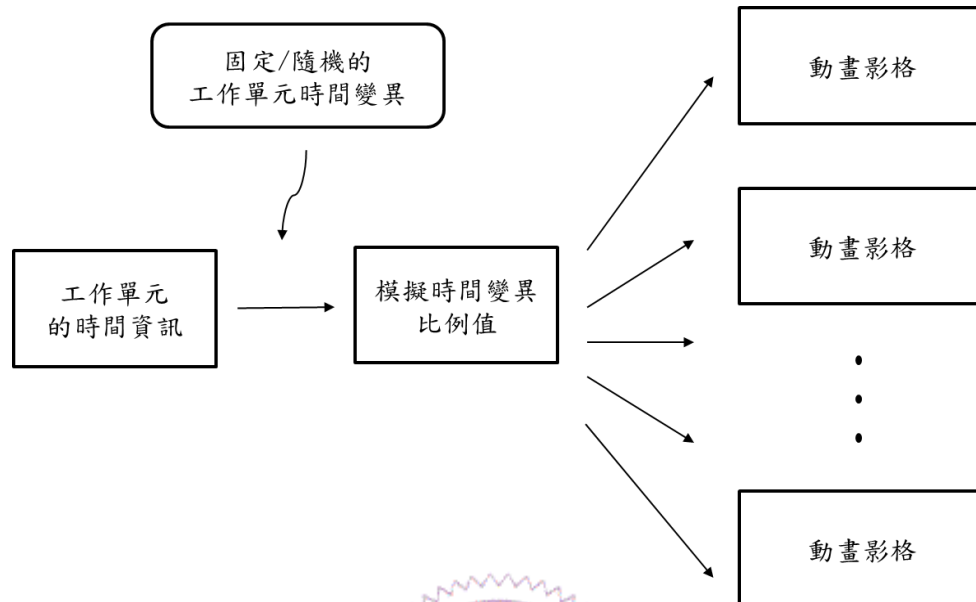


圖 3-13 工作單元時間變異

3.4.2 人機互動模組

本研究的人機互動模組，為了讓數位人產生的動作與機械設備的模擬參數配合，建構出人機系統協同的模擬動畫，主要考量系統模擬程序中之時間、活動和事件三種因素。首先透過完善數位人動作產生以及工作單元的設置，建立數位人模擬活動，並以機械設備的模擬參數，例如：前置時間、物件來到時間、作業時間等來定義模擬程序中的事件。

利用以上模擬程序中的各項元素，使用人機互動模組，將機械設備模擬參數轉譯成人機系統模擬時間軸上發生的事件，隨著時間上個別模擬事件的觸發，再依序執行所排定的數位人的工作單元。將數位人模擬的活動整合進人機系統的模擬程序當中，藉此將數位人動作產生與模擬系統中其他機械設備作一個結合。如圖 3-14 所示。

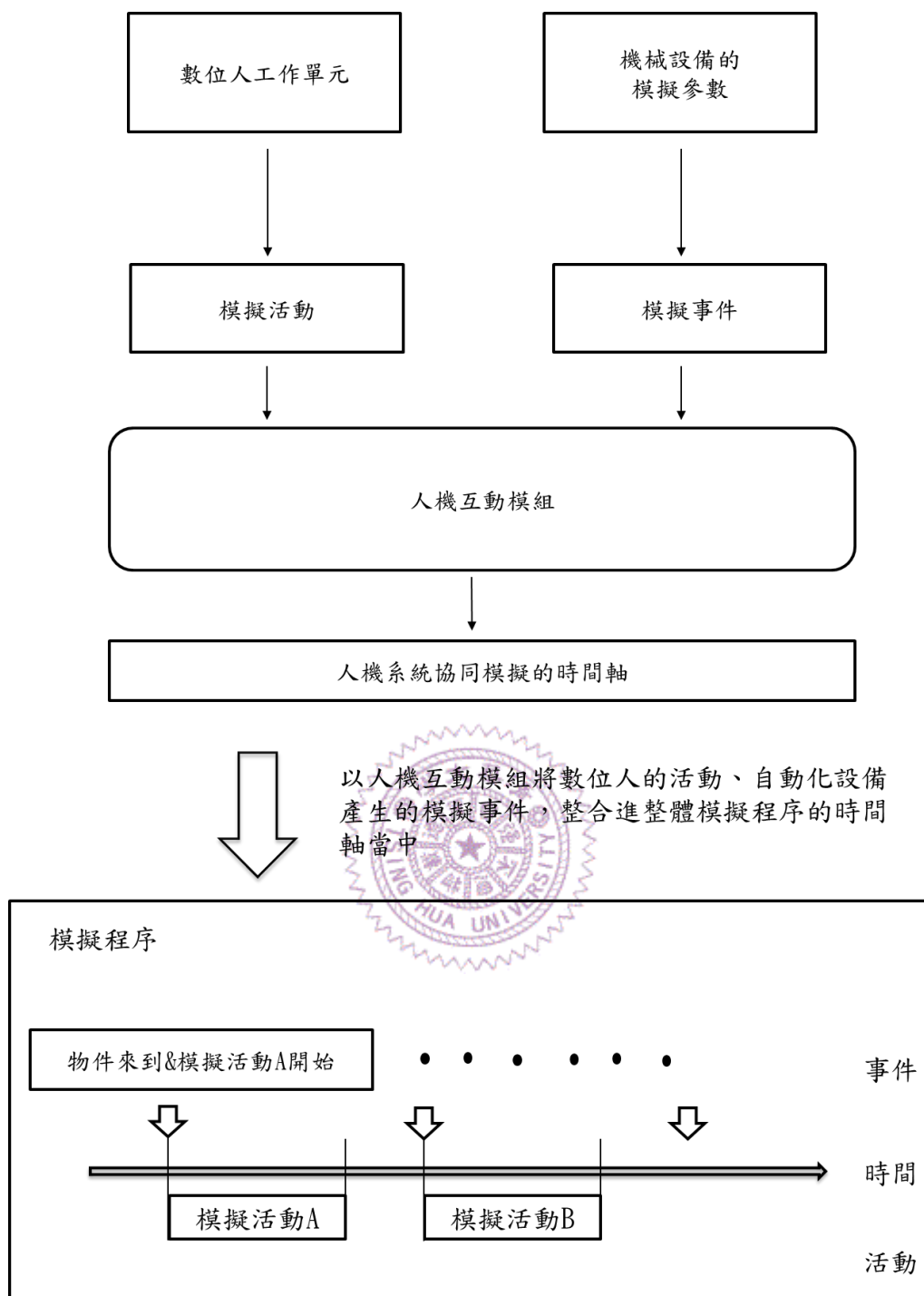


圖 3-14 人機互動模組架構

3.5 系統評估

本研究系統評估將分作兩部分，動畫的驗證以及系統的比較。第一部分動畫的驗證，將會分別與數位人模擬軟體與系統模擬軟體所產生的數位人動畫

進行比較。數位人模擬軟體將選定 MGS 系統作為比較，MGS (Motion Generation from Semantics)是一套開發在 Delmia 平台上，以自然語言為輸入，進而產生數位人體模型動作的客製化程式(李旭, 2007)，該系統利用反向運動學機制進行為數位人的動作產生，旨在提升工廠動畫模擬的速度；系統模擬軟體則以 Visual Components 軟體本身所產生數位人動畫來進行比較。本研究所開發的動畫模擬系統，會以這兩系統作為動畫驗證的對象。利用同類型的作業，比較數位人體模型在進行作業動作時的動作姿勢。驗證本研究開發的客製化程式，其數位人體動畫產生的真實度。

第二部分為系統的比較，會與兩套協助數位人體模型進行動作產生的客製化程式進行比較。分別為 MGS 系統及陳信男(2009)所開發的一套以物件特徵為基礎在 Delmia 平台上，以拿取與放置動作為主的動作產生系統。會從數位人體模型、數位人動作產生和系統的整體功能三個方面去進行比較，探討本研究開發的客製化程式，能否夠幫助模擬人員更快速的產生擬真的動畫，並滿足模擬人員在數位人模擬時產生的需求，且進一步協助產生人機系統協同的模擬動畫。

第四章 研究結果

本研究的研究產生，主要為建立一套客製化程式與操作程式的介面，程式的主要功能分為三部分。其一為數位人的參數化模組，可對本研究所建立的數位人體模型，進行參數化的設置。其二為數位人的動作產生模組，包含結合正向與逆向運動學的動作產生邏輯、步態路徑的動作產生策略、模擬物件的輔助設置以及工作單元設置。其三為人機互動模組，透過工作單元，將數位人的動作產生與機械模擬參數整合，將數位人模擬納入人機系統的模擬程序當中。

4.1 介面設計

本研究發展的程式介面主要分作四部分，數位人體模型參數化面板，動作產生面板、模擬物件輔助設置面板，人機互動面板。以下個別介紹其主要功能及介面。

4.1.1 數位人體參數化面板

數位人體參數化模型面板如圖 4-1 所示，共有 11 個人體計測參數可以透過界面進行調整，左下角為其他類型的人體計測參數，當介面上的參數進行調整後，可以反應其他人體計測參數的改變。當完成數位人體模型參數化後，可以透過按鈕觀看參數化後的數位人體外型，確定無誤後，進一步修正數位人體的運動機制去符合新的數位人體肢段長，以便進行後續的動作產生。





圖 4-1 數位人體模型參數化面板

4.1.2 動作產生面板

動作產生面板分做三個部分如圖 4-2 所示，第一部分為動作產生模組，主要進行數位人與物件參考點的互動選取，進一步產生動畫影格形成個別的數位人動作。第二部分為系統功能及工作單元的儲存與讀取，可以將動作產生模組產生的數位人動作儲存再利用，或是進一步產生人機系統協同的模擬動畫。第三部分為功能呈現區，各種被選取的功能會在此作細部的呈現。

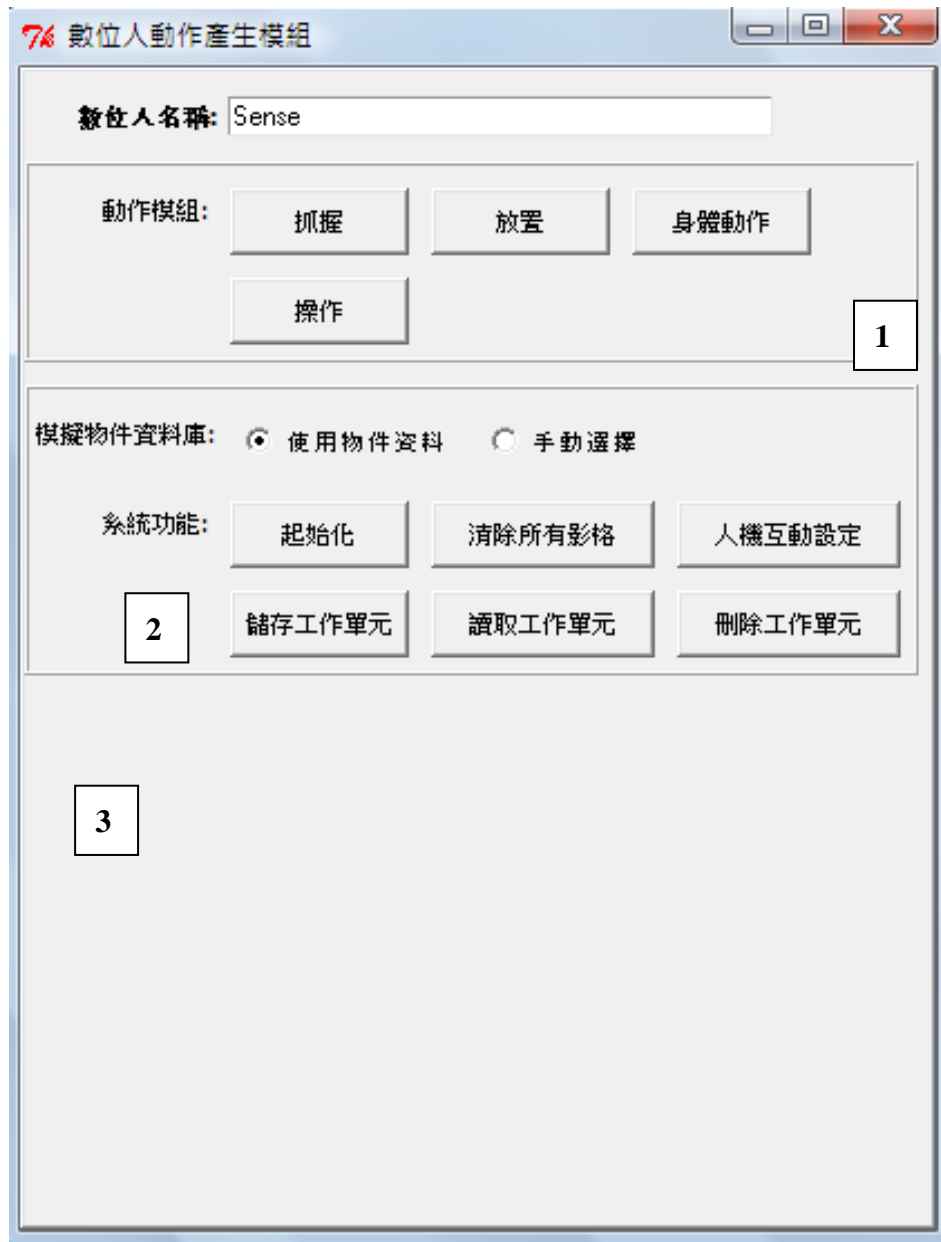



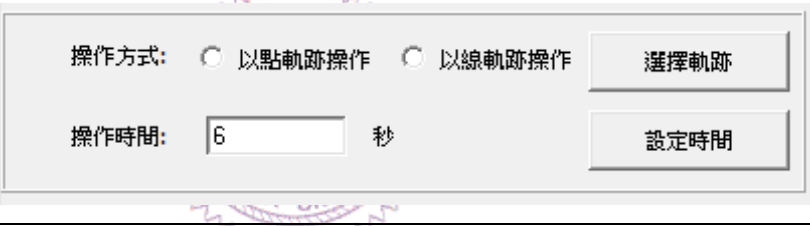


圖 4-2 動作產生面板

第一部分動作產生模組，針對不同的動作模組，包括拿取、放置、身體動作、操作四種動作產生類型，透過不同按鈕的點選後，各種動作模組的細部功能會呈現在功能呈現區中，使用者可以根據不同動作類型的動畫產生需求，進一步設定產生數位人動作，各個動作類型其詳細功能介紹如表 4-1 所示。

表 4-1 主要動作產生面板


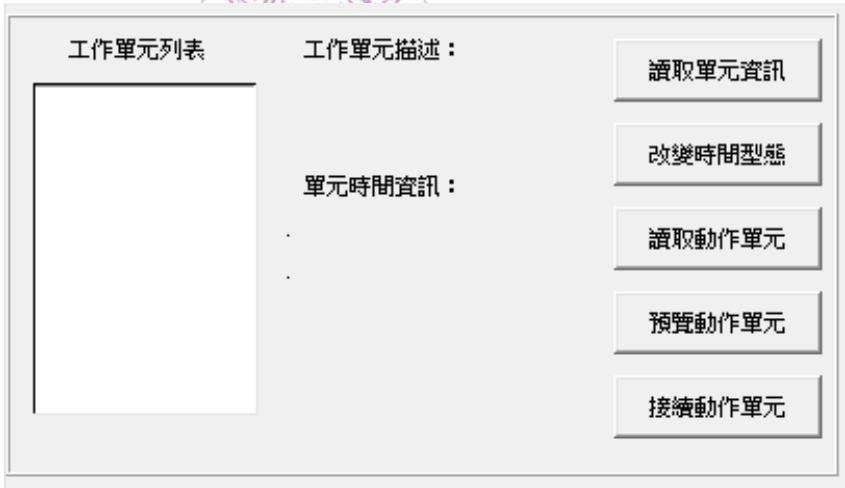
面板一	拿取面板
面板外觀	
面板功能	<p>在拿取面板中，透過選取單雙手拿取的方式及行走的步態及空間上的參考座標系、使數位人手部與物件參考坐標系產生連結，並伴隨數位人的移動產生行走，完成拿取動作。</p>
面板二	放置面板
面板外觀	
面板功能	<p>在放置面板中，透過選取行走的步態及空間上的參考座標系，解除數位人手部與物件的連結，並伴隨數位人移動產生行走，完成放置動作。</p>

面板三	身體動作面板
面板外觀	
面板功能	在身體動作面板中，可對數位人進行身體動作的設置，包括行走、跪下、蹲下、彎腰、回復站立、坐下，與停留查看的動作。
面板四	操作面板
面板外觀	
面板功能	在操作面板中，透過選擇以線或點的方式，串聯空間上的參考坐標系，讓數位人以所持握的工具，在設定的作業軌跡上完成操作的動作。

第二部分系統功能與工作單元，在系統功能的部分，包括數位人動作初始化、清除所有影格、人機互動模組。動作初始化用於在實際進行數位人模擬前，進行數位人相關模擬參數的初始設置，讓產生的數位人動畫影格能夠順利的被執行。清除所有影格，則用來清空數位人體中目前所有的動畫影格，人機互動模組會在之後的章節進一步作詳細的介紹。

在工作單元的部分共有工作單元儲存、工作單元讀取、時間修正三個子面板。透過面板的操作進行工作單元的設置以及工作單元的讀取兩個主要功能，並且在讀取工作單元時，可以進一步利用時間修正面板對工作單元的時間進行修正，其介面設計及詳細功能如表 4-2 所示。

表 4-2 工作單元相關面板

面板一	工作單元儲存面板
面板外觀	
面板功能	<p>當數位人作業動畫產生後，可以透過此面板將動畫儲存成一個工作單元。首先輸入工作單元的名稱，並可對此工作單元的細節進行描述。最後按下儲存工作單元按鈕，完成儲存的作業。</p>
面板二	工作單元讀取面板
面板外觀	
面板功能	<p>在工作讀取面板上，使用者可以於工作單元列表上，選擇欲使用的工作單元。透過右方的操作按鈕，可以讀取工作單元的相關資訊，並進一步讀取工作單元到數位人體的動作步序中。另外也可選擇改變工作單元的時間型態，開啟時間修正面板，或點選接續動作單元，讀取工作單元的最後位置，作接續的數位人動作產生。</p>

面板三	時間修正面板
面板外觀	<div> <input type="radio"/> 固定型 <input checked="" type="radio"/> 常態分配 <input type="radio"/> 均勻分配 <input type="radio"/> 指數分配 <input type="radio"/> 伽瑪分配 <input type="radio"/> 三角分配 平均值：<input type="text" value="0.0"/> 秒 標準差：<input type="text" value="0.0"/> 秒 <input type="button" value="設定單元時間"/> </div>
面板功能	透過時間修正面板，可以選擇並輸入不同時間變異函數所需的參數，進而調整該工作單元的時間。

4.1.3 模擬物件輔助設置面板

模擬物件輔助設置如圖 4-3 所示，透過介面選擇作業為單雙手操作，再以滑鼠點選模擬平台中的空間位置，決定設置的參考坐標系位置。最後以人站立位置的選擇，決定參考坐標系的方向，快速產生且設定物件上輔助的參考坐標系，以配合數位人在不同步態下的動作產生需求。

圖 4-3 模擬物件輔助設置面板

4.1.4 人機互動面板

人機互動面板如表 4-3 所示，主要有兩種模式，作業模式主要適用於數位人作業所需的工件，來至於機械設備的供給與運輸，但數位人本身的作業為單獨完成。協同模式則適用於作業時需與機械設備協同完成，因此需將機械設備的作業時間納入考量。面板的呈現主要分作四部分，第一部份為工作單元的列表，顯示目前數位人已儲存的工作單元，第二部分主要為機械設備模擬參數的輸入。第三部分為工作單元的設定，用來讀取不同階段的所需的工作單元，第四部分為動畫接續模式的設定，決定後續的數位人動作產生是否仍要與該機械設備互動。

表 4-3 人機互動面板

面板名稱	介面設計
人機互動模組 _作業模式	

人機互動模組
_協同模式



4.2 動畫模擬

4.2.1 動作產生模式

以下將以圖示解說，本系統動作產生模式的使用方法與步驟。

1. 首先開啟動作產生面板如圖 4-4 所示，並從動作模組中選擇要產生的動作類型，進而開啟個別動作的詳細功能操作。

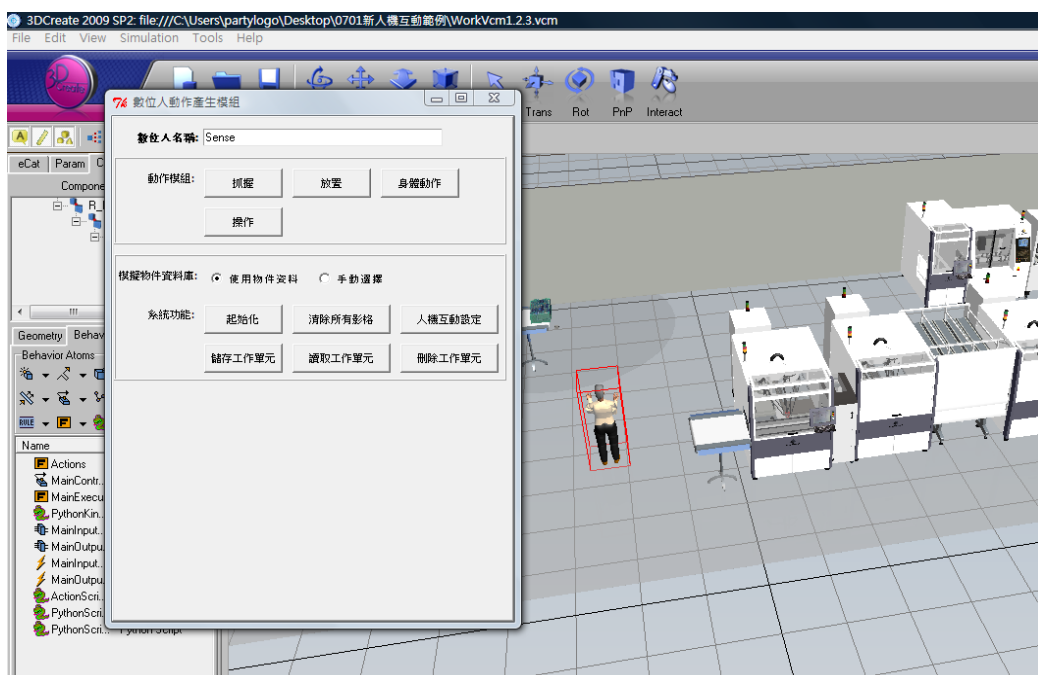


圖 4-4 開啟動作產生面板

2. 藉由動作模組中的按鈕，開啟個別動作的功能操作如圖 4-5 所示，選擇數位人動作產生的不同需求，並選擇空間中與數位人體模型互動的參考座標系，產生動畫影格，建立數位人體的動作。

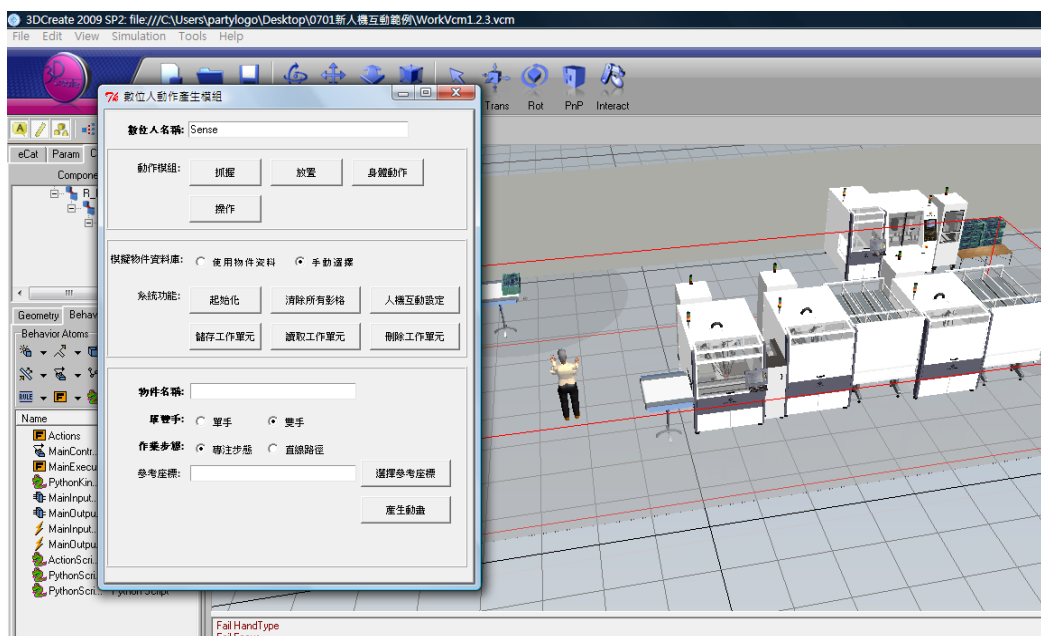


圖 4-5 產生數位人動畫影格

3. 在產生數位人體模型動作之後，可以在系統功能列表中，點選儲存工作單元按鈕，開啟儲存工作單元的功能操作如圖 4-6，輸入儲存的工作單元名稱以及工作單元的描述。完成工作單元的儲存。

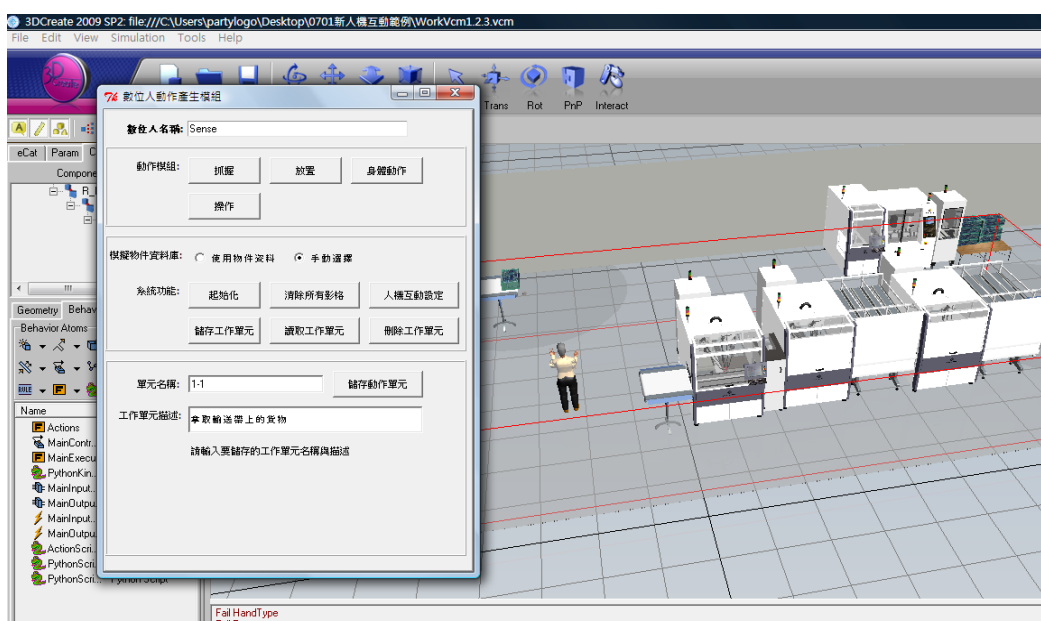


圖 4-6 儲存工作單元

4.2.2 人機互動模式

以下將以圖示解說，本系統人機互動模式的使用方法與步驟。

1. 在利用以上動作產生模式的步驟產生並儲存所需的工作單元後，當需要再利用工作單元時，點選讀取工作單元按鈕，開啟讀取工作單元的功能操作如圖 4-7 所示。可以觀看到所有已儲存的工作單元，接著可對工作單元進行讀取、改變工作單元時間型態或接續特定工作單元的結束位置產生新的數位人動作。

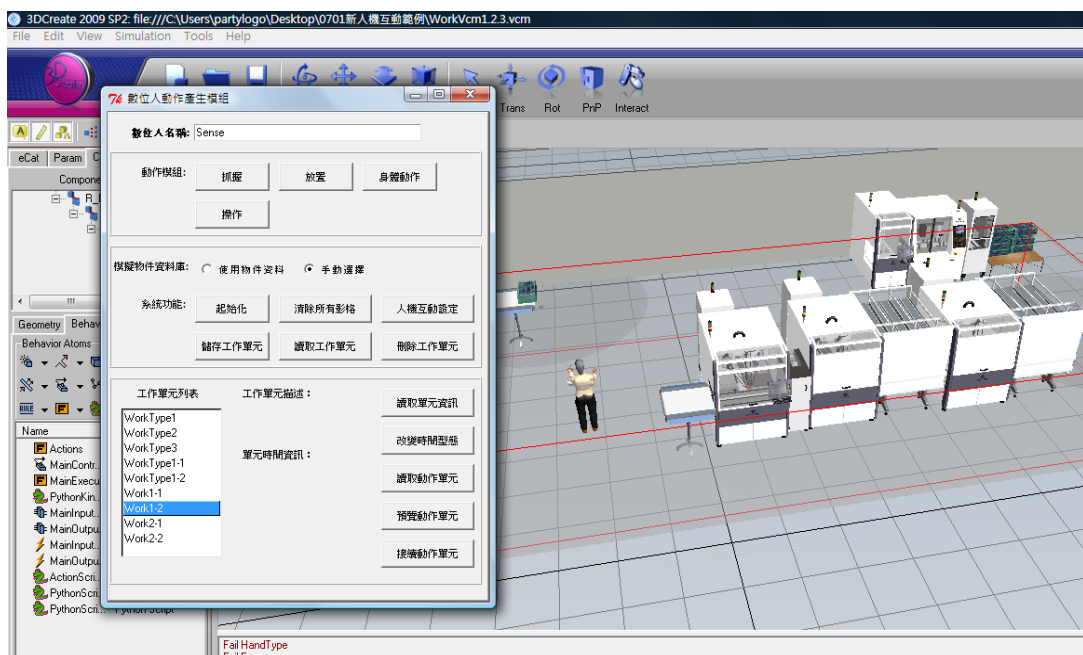


圖 4-7 讀取工作單元

2. 在儲存工作單元右邊的功能操作中按鈕中如圖 4-8 所示。可點選改變時間型態按鈕，開啟時間修正面板，選擇時間的型態，輸入所需的參數，進而調整該工作單元的時間。

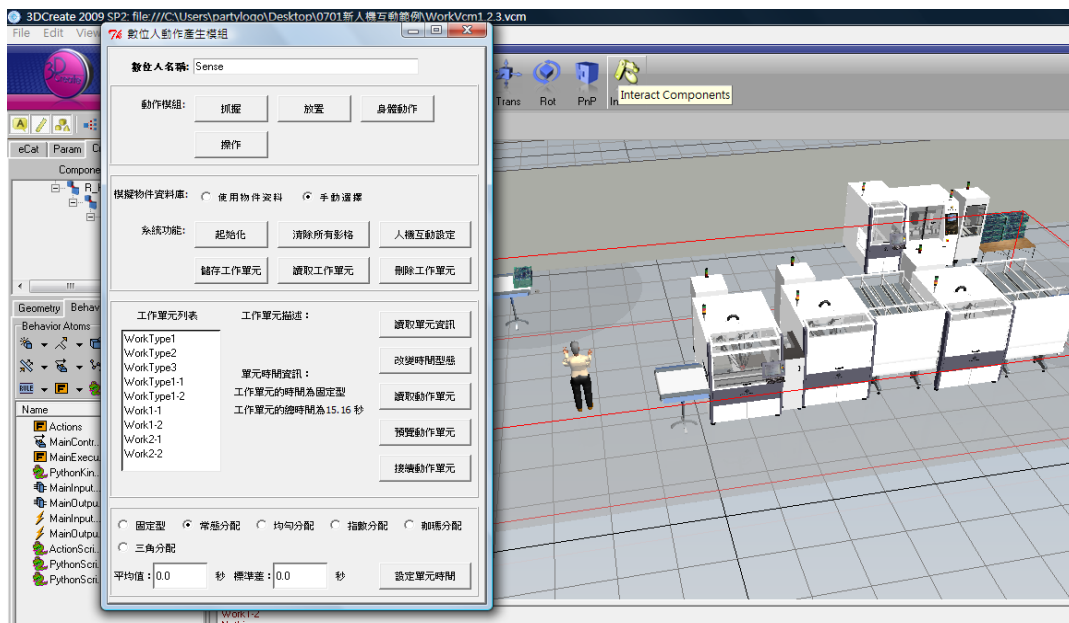


圖 4-8 工作單元時間型態的調整

3. 圖 4-9 為人機互動面板，首先需選取互動的模式，然後輸入欲互動機械設備的模擬參數，接著讀取各階段所需的工作單元，最後設定接續動作模式，進而產生人機互動的模擬動畫。

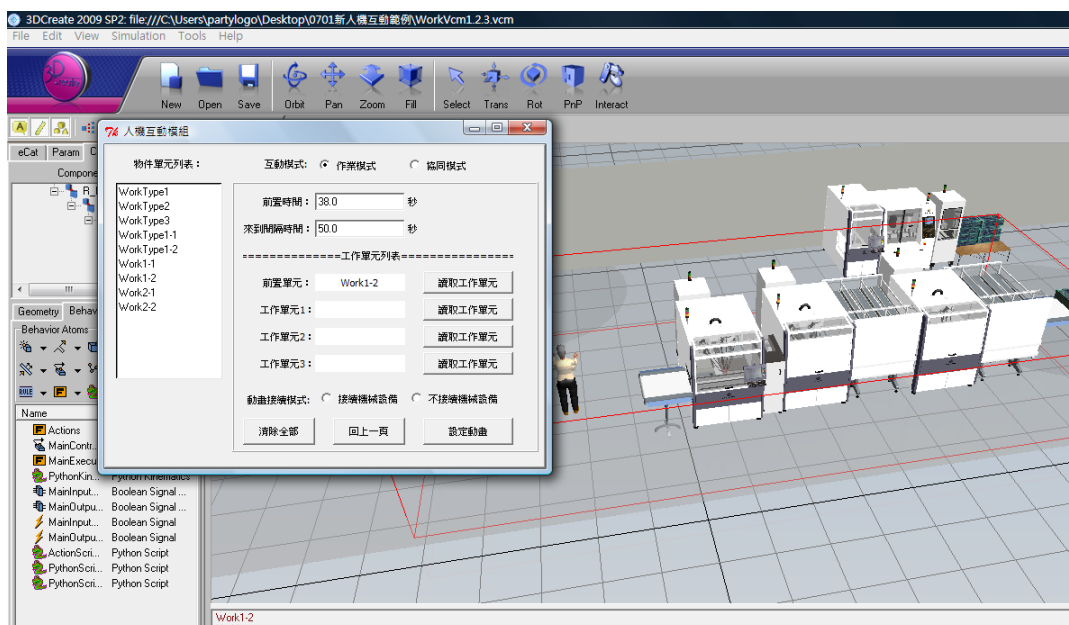
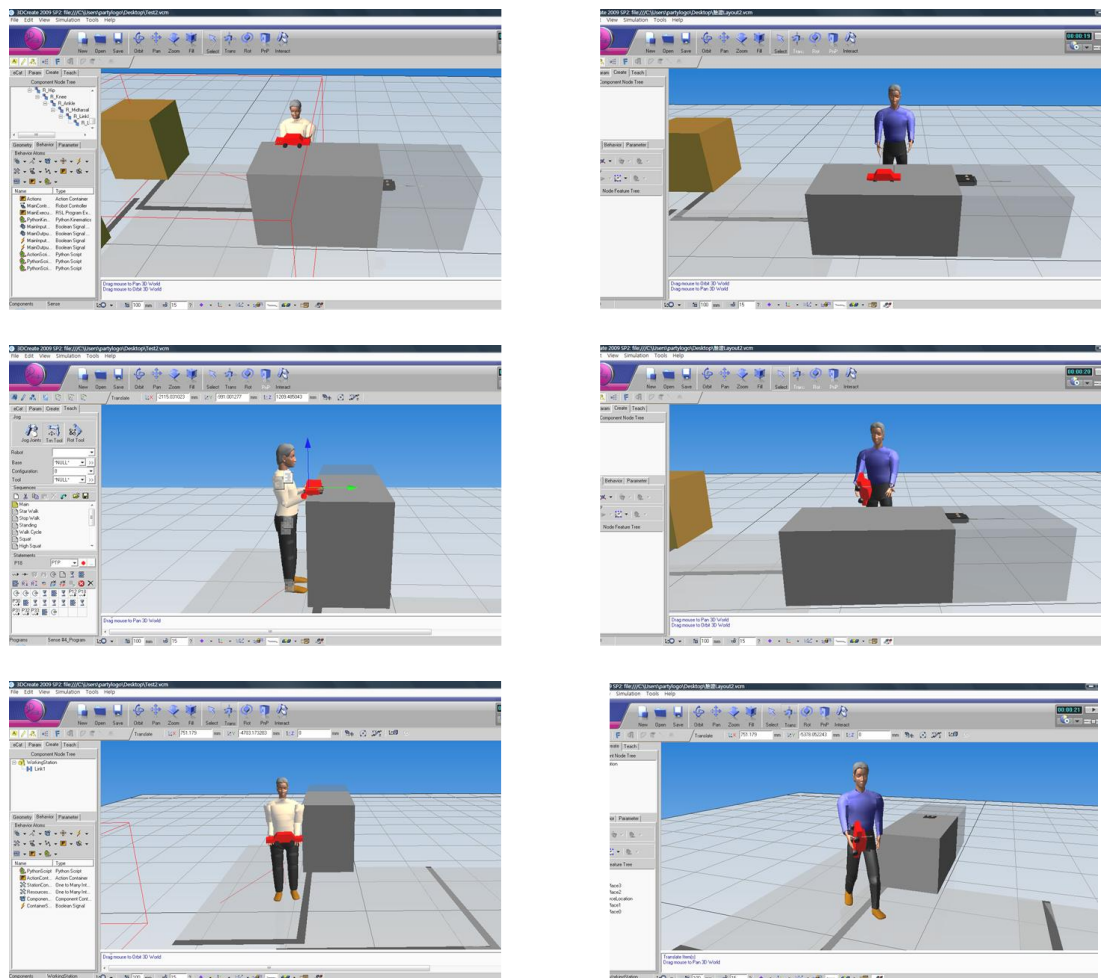


圖 4-9 人機互動面板

4.3 系統評估

4.3.1 動畫驗證

在動畫驗證的方面，本研究將與 MGS 系統與 Visual Components 系統所產生的數位人動畫進行比較。首先是 Visual Components 系統，場景為一個人工工作站，比較作業類型為搬運作業，產出內容如圖 4-10 所示，圖片左列為本系統所展生的動畫，右列為 Visual Components 系統所產生的動畫，兩者在動畫呈現上有顯著的差異。Visual Components 系統的數位人體模型，並沒有完整的動作產生機制，並不會產生拿取與放置的實際動作，動作的產生只是讓物體移動附著在手上。本系統則透過反向與正向運動學機制，讓數位人體模型產生實際的拿取與放置的動作，更符合真實人體產生的動作。



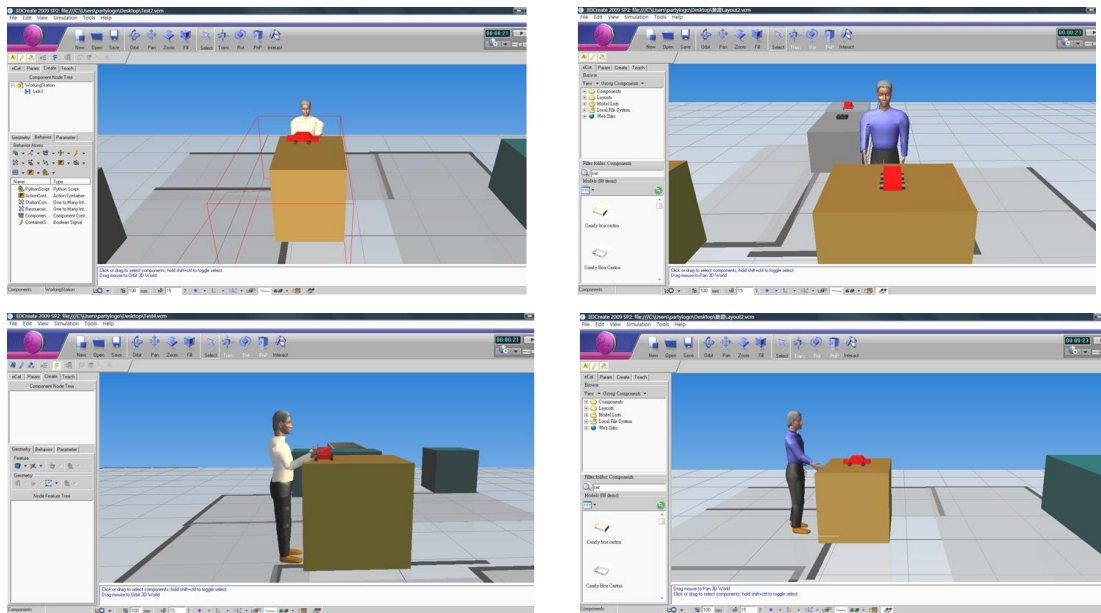
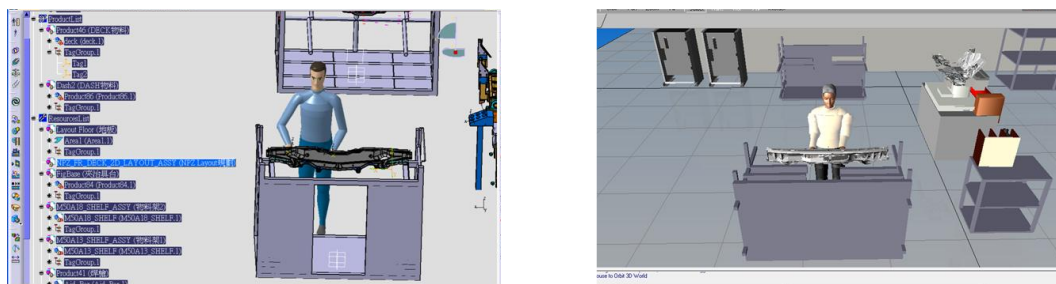
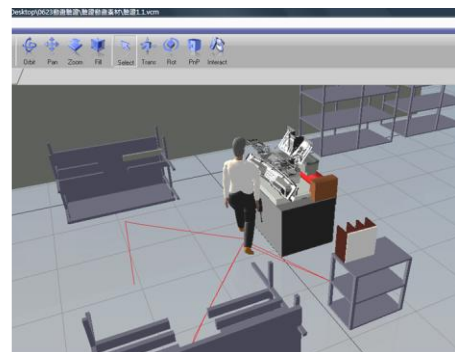
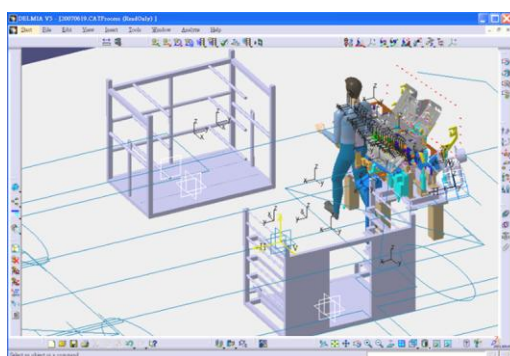
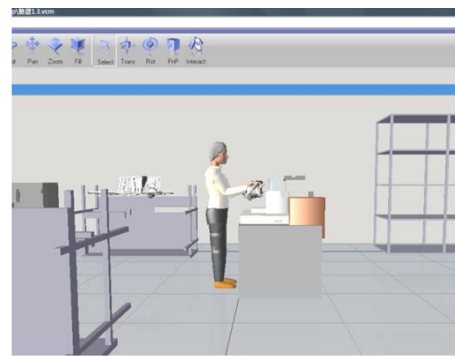
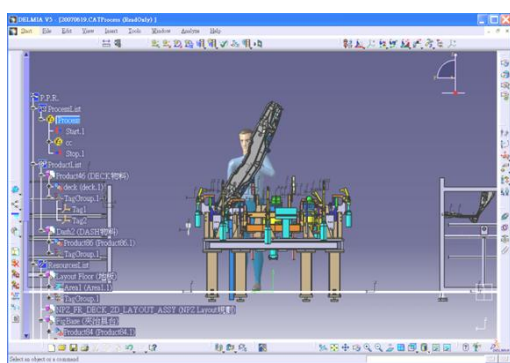
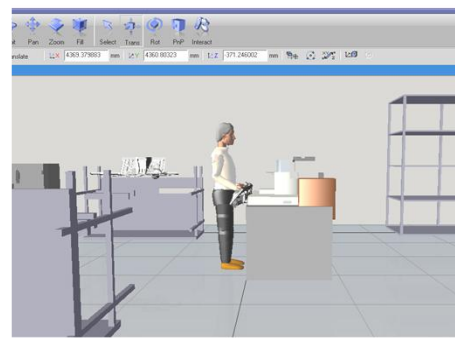
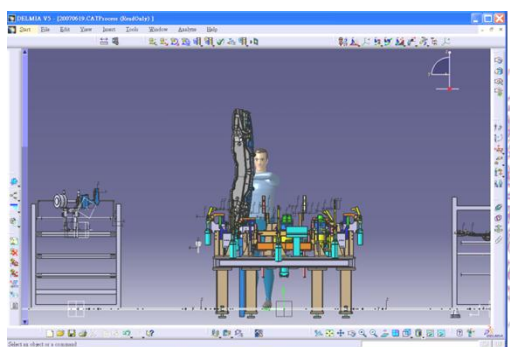
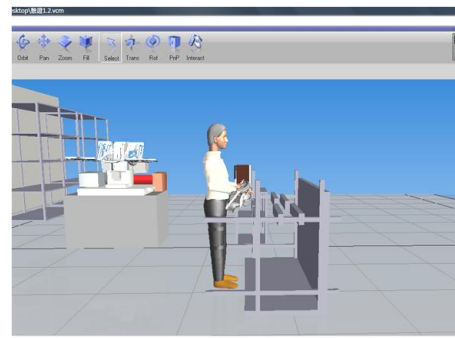
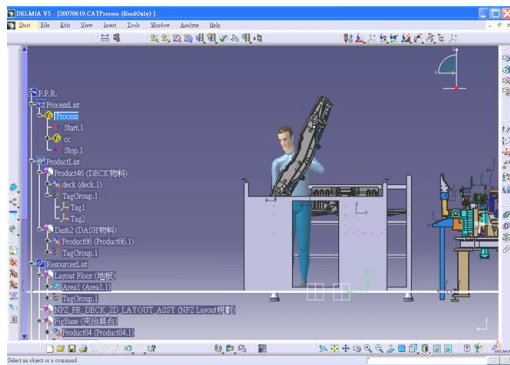
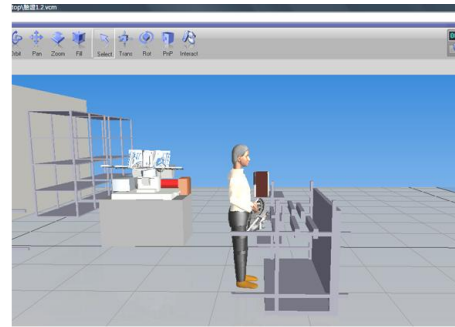
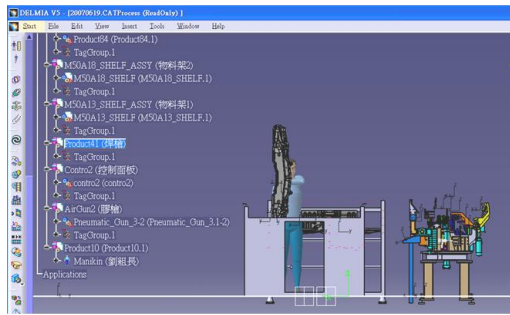


圖 4-10 Visual Components 系統與本系統之動畫比較

第二部分為與 MGS 系統的比較，場景為人工工作站，比較作業類型為搬運加操作作業，產生內容如圖 4-11 所示，圖片右列為本系統所展生的動畫，左列為 MGS 系統所產生的動畫。動畫主要產生差異的部份，在於 MGS 系統在拿取動作後欲進行物件搬運時，數位人會產生以直立方式搬運物件的不合理動作。本系統的數位人則在進行拿取與搬運動作時，先拿取物件到腰際，並以此姿勢搬運到目的地，再進一步完成放置動作，本系統透過符合真實人體動作的關鍵影格進行動畫內插，產生更符合真實人體的動作。





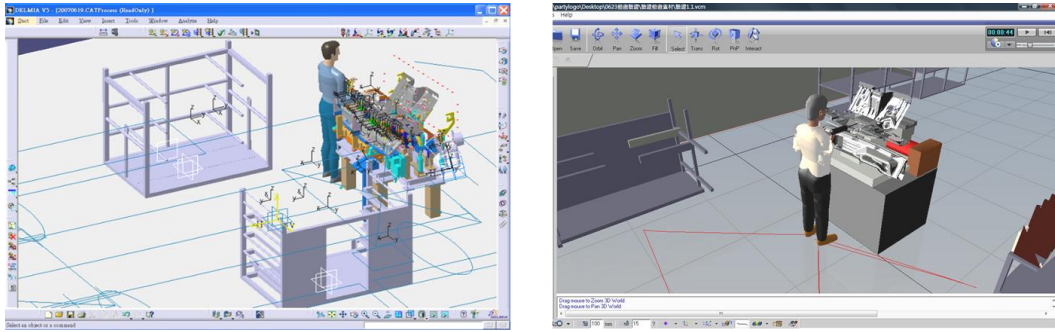


圖 4-11 MGS 系統與本系統之動畫比較

透過以上的動畫驗證，從與 Visual Components 系統的比較，發現本系統經由建立數位人體骨架到動作產生機制，補足原先系統，數位人體骨架粗糙，模擬動畫擬真度不足的問題。透過與 MGS 系統的比較，發現本系統透過動作產生模組和動作產生策略的建立，在本系統支援的動作類型下，已經可以快速產出與數位人模擬系統相比具擬真度的動畫，並在特定作業的動作姿勢上有更符合人體實際動作的動畫產生。

4.3.2 系統比較

本研究開發的主要為一協助數位人模擬的客製化系統，因此將與 MGS 系統、(陳信男, 2009)兩套發展在 Delmia 平台的數位人模擬客製化系統進行比較。主要針對數位人體模型、數位人體動作產生以及其他系統功能三項進行比較，如表 4-4 所示。在數位人體模型的部分，針對數位人體骨架與參數化機制進行比較，在數位人動作產生的部分，則針對動作產生機制、數位人行走策略與動作類型三項進行比較。其他功能的部分，則以參考坐標系的設置、工作單元的設置及人機互動模組來進行細項的系統比較。進而探討本研究開發的客製化系統，與其他相關研究的差異。

表 4-4 系統比較

系統功能	MGS 系統	(陳信男, 2009)	本研究開發系統
數位人體模型部分			
數位人體骨架	Delmia 平台上內建的數位人體模型	Delmia 平台上內建的數位人體模型	在 Visual Components 平台上，參考國際標準與各大動作資料庫建構而成
參數化機制	Delmia 內建共 16 個人體計測參數	Delmia 內建共 16 個人體計測參數	18 個人體計測參數
數位人動作產生部分			
動作產生機制	IK 機制	結合 IK 與 FK 機制	結合 IK 與 FK 機制
數位人行走策略	無	無	行走路徑的優化與行走軌跡的計算
動作類型	較多	僅拿取、放置	拿取、放置、身體動作、操作
其他功能			
參考坐標系的設置	無	半自動設置	半自動設置
工作單元的設置	有、僅儲存動畫	無	有、儲存動畫還加入隨機時間系統
人機互動的輔助	無	無	可針對人機系統協同作業進行模擬

本研究將針對數位人體模型、數位人動作產生以及其他的系統功能，比較與這兩套系統的差別，詳細將在以下進行說明：

1. 數位人體模型：

在數位人體模型的部分，MGS 系統與(陳信男, 2009)，均是使用 Delmia 內建的數位人體模型。本研究則是在 Visual Components 平台上，參考國際標準及各大學動作資料庫為基準建立的數位人體骨架，在利用其他的動作資料來源與其他動作擷取設備結合時會比 Delmia 系統的數位人較為彈性且開放。

2. 數位人動作產生：

在數位人的動作產生機制上，本研究與(陳信男, 2009)均結合 IK 與 FK 機制，透過 FK 機制減低 IK 機制所帶來的動作不合理。本研究更在行走的策略上，運用貝茲曲線的方式，模擬真實人體的行走路徑，增加數位人行走的擬真度。在動作類型的部分，MGS 系統的動作類型的表現上較為多變，包含拿取、放置、移動工具、操作、身體動作等七項基本動作，本研究的系統動作類型只涵蓋拿取、放置、身體動作與操作。相較起 MGS 系統能表現得作業動作較為貧乏。

3. 其他功能：

本研究建立工作單元的概念，並進一步透過工作單元與人機互動模組建立人與機械設備協同的動畫模擬，之前的系統在這類人與機械設備的協同模擬上，並無類似的輔助功能，僅有 MGS 系統有將動作動畫作儲存，以便之後再利用的功能。

4.4 系統限制

本系統旨為建立一套符合人機系統協同的數位人模擬方法，但系統仍然有些許限制與不足的地方，因此以下說明幾點系統限制。

1. 數位人動作的適用範疇

本研究的動作產生模組，主要針對拿取、放置、身體動作及簡單的器具操作。但根據這幾種動作類型的組合，對於要實際表現所有人在作業現場的作業類型，仍有不足。

2. 數位人參數化的計測參數

在數位人體參數化所適用的計測參數，本研究可供調整的參數是以影響單一枝段的參數為主。影響涵蓋多個肢段的計測參數，本系統只提供數值的參考與呈現，尚未對此類的人體計測參數提供可以調整的參數化機制。

3. 人機互動模組的限制

本系統提出的人機互動模組，主要針對單一機台進行互動，在使用模式的部分也僅考量作業與協同兩個作業模式，對於多個機台及更多不同與機械互動模式，未來仍有加強的空間。

4. 數位人體模型穿越障礙物

本研究所採用的動作產生邏輯和行走路徑的規劃，並沒有完善的物體碰撞的偵測機制。因此如果在動作產生或行走的直線上有任何的障礙物，數位人的動畫模擬會產生穿透障礙物的不自然動作產生。

4.5 系統應用

本系統的產出主要有兩大特點，首先建立可適用不同動作產生方法的擬真數位人體模型骨架，並進一步兼顧數位人模擬的擬真度與系統模擬需求，產生人機系統協同的模擬動畫。針對這兩部分可延伸進行以下相關應用如圖 4-12 所示。

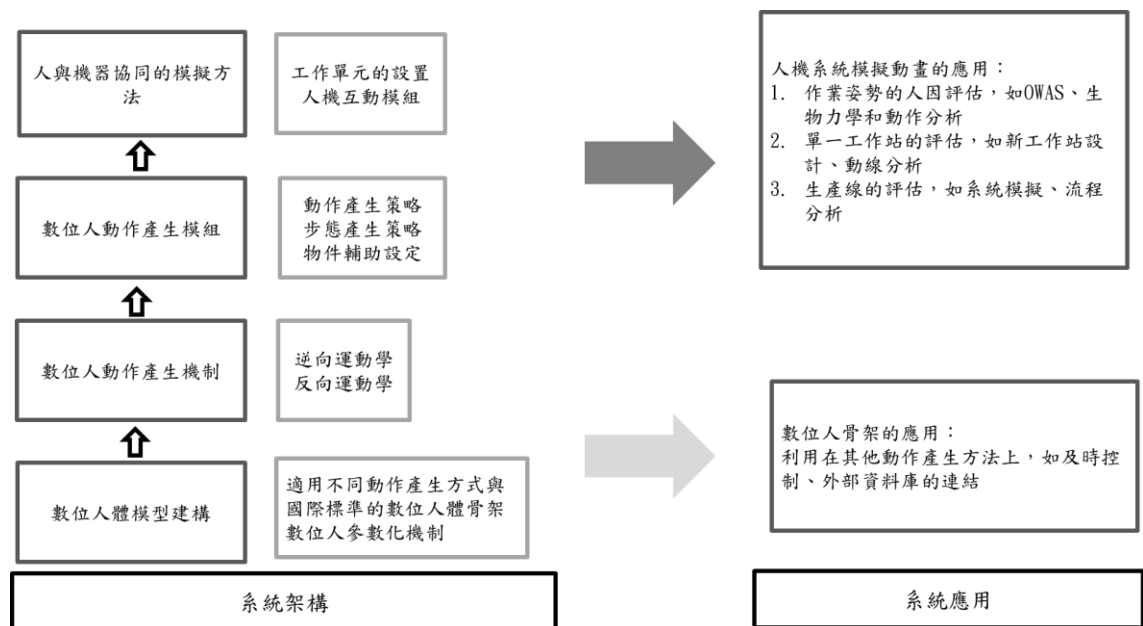


圖 4-12 系統產出應用分類圖

本系統的建立的數位人體模型骨架，因為參考國際標準與各大動作資料庫，並進一步建立動作產生機制。因此有應用在其他的數位人骨架驅動方式的彈性，例如可以利用動作擷取設備，進行即時的動作資料的擷取。或利用外部的動作資料庫，進行人體動作資料的分析。

不同的動作擷取設備，所輸出的初始資料類型不盡相同，包括位置、加速度值、角速度值等。但一般驅動數位人體骨架的方式，主要是利用關節角度的輸入。因此欲運用動作擷取設備作即時控制時，可先透過初始資料的擷取，經過即時的運算與轉換，輸出本研究數位人體骨架所需的關節角度值，即可以利用這些關節角度值，進而驅動數位人體骨架，產生及時的動作控制。

現今動作擷取設備的技術也漸完備，不同形式的動作擷取設備有不同的資料格式如 AOA(Adaptive Optics Associates)、C3D(Coordinate 3D)、TRC(Tracked Row Column) 與光學式動作擷取設備所支援的格式 ASF、AMC、C3D 等。

眾多不同的資料格式造成了動作資料交換與運用的不便，因此開始有許多研究發展了一致的動作資料格式，如 BVH、MCML 等資料格式。BVH 的動作資料格式為 Etou 等人於 2004 年，為了因應動作搜尋的問題，使用此種由 BioVision 公司所提出的動作資料格式，陸續也有許多研究沿用 BVH 格式，其

包括兩部分，骨架階層定義與動作資料。本研究所提出的數位人體骨架定義，即可以透過這種標準的動作資料格式定義，從不同動作擷取設備包括光學式、磁感應式，所擷取的動作資料中進行資料的轉換，轉換成標準的動作資料格式，進而讀取去驅動數位人體骨架。

本系統所產生的數位人模擬動畫，則可依不同目的進行相關的應用如：(1)針對人的作業姿勢可以進行如 OWAS、生物力學和動作分析。(2)針對作業環境的評估，則可以對單一工作站進行工作站分析、動線分析等。對整體生產線進行系統模擬、流程分析等。

過去數位人體模型已被廣泛的運用在數位平台上的預先模擬，進行新工作站設計的規劃與評估，但使用的情況大都較少著墨人與機械設備的互動，經由本研究的動畫產出，可以延伸針對人機協同的作業環境，模擬人與機械設備在不同的協同作業模式下的作業情況，進行評估與設計。更對過去系統模擬軟體中，人實際的作業情況，難以被納入整體生產線中考量的問題，提出一個解決的方向。



第五章 結論與建議

5.1 結論

現階段的模擬軟套裝軟體，在產生數位人體動畫的時候，採用手動拉取動畫影格耗時費力，並且往往在滿足數位人外型及動作的擬真與系統模擬的需求之間作取捨，難以滿足人機系統協同作業環境下的現場需求。故本研究提出一套方式，建構擬真的數位人體骨架在數位模擬的平台上，設置符合人機互動的動畫產生方式，產出擬真的數位人體動畫，並使數位人的動作產生，能與機械設備的模擬作配合，讓人與機械設備協同的作業環境，能夠擬真且快速地被模擬。

本研究的具體貢獻如下：

1. 建立可適用不同動作產生方法的擬真數位人體模型骨架：

本系統參考國際標準及各大數位人體動作資料庫的格式，訂定出本研究的數位人體骨架。此數位人體骨架除了於本研究中運用運動學機制產生動作外，更可適用於其他不同用途的彈性應用，包括利用動作擷取設備的即時控制及讀取其他外部動作資料庫的資料。

2. 以工作單元整合數位人的動作產生，作為人機系統模擬的基礎：

為了使數位人體產生的動作可以適用在人機系統協同的模擬上，本研究將個別的數位人動作動畫彙整並從中萃取相關的模擬資訊，進而提出工作單元的概念。使用者可以利用工作單元作動畫的再利用及工作單元時間的調整，更可進一步利用此概念作為數位人模擬與機械設備模擬的橋樑，產生人機系統協同的模擬作業。

3. 利用人機互動模組，產出人機系統協同的模擬動畫：

透過工作單元，系統產生的數位人個別動作被集結成一個模擬程序當中的活動。人機互動模組則透過視覺化介面的輸入，將數位人的工作單元與機械設備的模擬參數結合進人機系統的模擬程序中。產生數位

人與機械設備協同模擬的動畫。並在模擬參數進行改變的情況下，可以快速地對模擬動畫進行調整。

本研究與目前商用軟體比較，可以擬真的產出，人機系統協同的模擬動畫，動畫模擬的產出，可以延伸來進行人與機械設備協同作業時的評估，包括人因評估、工作站設計、生產線模擬的應用，增加數位人模擬應用的彈性。

5.2 建議

本研究奠基於人機系統協同的基礎上，提出一套適合的數位人模擬方法，作為數位人模擬與機械設備模擬上的銜接，但系統仍有許多可增進的地方，例如增加生物力學評估、生理學評估...等人因評估模組，可供生產規劃人員參考，以下提出幾點建議及未來發展方向，以作為後續改善系統時的參考：

1. 考量動作時間的相依性：

本研究所產生的數位人的工作單元中，往往由不同的動作所組合，但在一個作業當中的不同動作往往有不同的性質，例如重要精細的動作，相較其他動作的作業時間較不可壓縮，本研究把單一工作單元內的各個動作元素，假設為相同的，因此在工作單元的時間調整上，採用的是均分方式，但在實際的作業情況下，需進一步考量動作之間的相依性。

2. 考量機械設備作業位置的改變

本研究所產出的動作，主要是利用反向運動機制，依靠動作末端位置所產生。因此若機械設備上的作業高度或位置改變時，則需要進行重新的設置，未來可以考量以整體目標座標系，為動作產生的依據，即可以在機械作業位置與高度改變時，將目標座標系進行調整即可，節省動作重新設置的麻煩。

3. 更多樣的動作類型：

本研究的動作類型只有拿取、放置、身體動作和操作，人在作業現場的實際情況則十分多元，有限的動作類型使得能模擬出的現場作業情況仍受限

制，未來的研究方向可以增加更多樣的動作類型，以增加系統的使用範疇。

4. 人因評估模組

作業現場動畫模擬的優點，是能夠提早發現作業現場的潛在問題，進而提出改善，因此若能增加人因評估模組的話，就能在模擬階段評估作業現場人員的作業姿勢，提供資訊的回報，進而可以改善不良的作業姿勢及進行工作站的再設計。

5. 一次考量多機台的人機系統模擬

本研究的人機互動模組，主要專注在人與單一機械設備的協同作業，但實際作業情況下，可能涉及同時與多機台進行互動，如果能同時考量人與多台機台的互動，將可以提高人機系統模擬的實用度，



參考文獻

1. BHMS™ 網站 <http://www.boeing.com/assocproducts/hms/>
2. Jack™ 網站 <http://www.ugs.com/products/efactory/jack/>
3. Poser™ 網站 <http://poser.smithmicro.com/poser.html>。
4. RAMSIS™ 網站 http://www.human-solutions.com/index_en.php
5. Humanoid Animation 網站 <http://www.h-anim.org>
6. HUMOSIM 網站 <http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/HUMOSIM/>
7. Carnegie Mellon Graphic Lab 網站 <http://graphics.cs.cmu.edu/>
8. 王茂駿，王明揚，林昱呈，2002，台灣地區人體計測資料庫手冊。
9. 李旭，2007，使用自然語言進行多人作業編成之模擬，清華大學工業工程所碩士論文。
10. 林昱呈，1997，人體尺寸比例關係與預測模式之建立，清華大學工業工程所碩士論文。
11. 陳志豪，2005，作業導向之數位人體動作產生，清華大學工業工程所碩士論文。
12. 陳信男，2009，以物件特徵為基礎的動作產生機制，清華大學工業工程所碩士論文。
13. 蘇晨豪，2010，及時動作及生理負荷評估系統建立，清華大學工業工程所碩士論文。
14. Abdel-Malek, K., Yu, W., and Jaber, M. (2001). Realistic posture prediction. SAE Digital Human Modeling Conference. Arlington.
15. Abshire, K., and Barron, M. (2002). Virtual maintenance real-world applications within virtual environments. IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. 132-137.
16. Brazier, J., Tomko, B., and Brow, T. (2003). The car that Jill built. The 6th

- Annual Applied Ergonomics Conference. 11-15.
17. Chaffin, D. (2005). Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics* 48(5): 478-491.
18. Chaffin, D. (2007). Human motion simulation for vehicle and workplace design. *International Journal of Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 17(5): 475-484.
19. Demirel, H., and Duffy, V. (2007). Applications of digital human modeling in industry. In: Duffy, V (Ed.). *Digital Human Modeling*: 824-832.
20. Dong, W., Li, Z., Yan, J., Wu, X., Yang, Y., and Zheng, L. (2008). Adaptive interaction in a 3D product structure browsing system for maintenance training. *International Journal of Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 18(1): 14.
21. Faraway, J. (1997). Regression analysis for a functional response. *Technometrics* 39(3): 254-261.
22. Faraway, J., Zhang, X., and Chaffin, D. (1999). Rectifying postures reconstructed from joint angles to meet constraints. *Journal of Biomechanics* 32(7): 733-736.
23. Faraway, J. (2003). Data-based motion prediction. *International Journal of Passenger Cars Electronic and Electrical Systems* 112(1): 722-732.
24. Gleicher, M. (2001). Comparing constraint-based motion editing methods. *Graphical Models* 63(2): 107-134.
25. Helin, K., Viitaniemi, J., Montonen, J., Aromaa, S., and Maatta, T. (2007). Digital human model based participatory design method to improve work tasks and workplaces. In: Duffy, V (Ed.). *Digital Human Modeling*: 847-855.
26. Hertzmann, A., O'Sullivan, C., and Perlin, K. (2009). Realistic human body movement for emotional expressiveness. In: *Proc. ACM SIGGRAPH 2009*

Course. New York. 1-27.

27. Hoffman, S. (2008). Whole-Body Postures during Standing Hand-Force Exertions: Development of a 3D Biomechanical Posture Prediction Model. Ph.D. thesis (Industrial and Operations Engineering). University of Michigan. Ann Arbor. 2008.
28. Iwata, K., Onosato, M., Teramoto, K., and Osaki, S. (1995). A modelling and simulation architecture for virtual manufacturing systems. *CIRP-Annals Manufacturing Technology* 44(1): 399-402.
29. Karhu, O., Harkonen, R., Sorvali, P., and Vepsalainen, P. (1981). Observing working postures in industry: Examples of OWAS application. *Applied Ergonomics* 12(1): 13-17.
30. Kuhn, W. (2006). Digital factory: simulation enhancing the product and production engineering process. In: *Proc. Winter Simulation Conference*. 1899-1906.
31. Lind, S., Johansson, B., Stahre, J., Berlin, C., Fasth, A., Heilala, J., Helin, K., Kiviranta, S., Krassi, B., and Montonen, J. (2009). SIMTER-A Joint Simulation Tool for Production Development. *The 18th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*.
32. Lind, S., Krassi, B., Viitaniemi, J., Kiviranta, S., Heilala, J., and Berlin, C. (2008). Linking ergonomics simulation to production process development. In: *Proc. Winter Simulation Conference 2008*. New Jersey. 1968-1973.
33. McAtamney, L., and Corlett, N. E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics* 24(2): 91-99.
34. Park, W., Chaffin, D., and Martin, B. (2004). Toward memory-based human motion simulation: development and validation of a motion modification

- algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 34(3): 376-386.
35. Rahmatalla, S., Xiang, Y., Smith, R., Meusch, J., Li, J., Marler, T., and Smith, B. (2009). Validation of Lower-Body Posture Prediction for the Virtual Human Model Santos. In: *Proc. Digital Human Modeling Conference*, Goteborg, Sweden. 1-12.
36. Ramis, F. J., Baesler, F., Berho, E., Neriz, L., and Sepulveda, J. A. (2008). A simulator to improve waiting times at a medical imaging center. In: *Proc. Winter Simulation Conference*. 1572-1577.
37. Roebuck, J., Kroemer, K., and Thomson, W. (1975). *Engineering anthropometry methods*. John Wiley Publication. New York.
38. Silva, F., Miranda, M., and Reda, F. (2007). The impact of the digital human modeling on the aircraft interior projects. In: *Proc. Digital Human Modelling Conference*. Seattle. 200.
39. Sisbot, E., Marin-Urias, L., Alami, R., and Simeon, T. (2007). A human aware mobile robot motion planner. *IEEE Transactions on Robotics* 23(5): 874-883.
40. Steinfeld, E. (2004). Modeling spatial interaction through full-scale modeling. *International Journal of Industrial Ergonomics* 33(3): 265-278.
41. Terada, T., Ogata, M., Kikukawa, T., Hongo, S., Nagasaka, M., Takanami, K., Kajihara, K., and Fujino, M. (2008). Virtual Human Body using Haptic Devices for Endoscopic Surgery Training Simulator. In: *Proc. 4th IEEE International Conference on Mechatronics*. Kumamoto. Japan. 1-5.
42. Tolani, D., Goswami, A., and Badler, N. (2000). Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs. *Graphical Models* 62(5): 353-388.
43. Vlastic, D., Adelsberger, R., Vannucci, G., Barnwell, J., Gross, M., Matusik, W., and Popovi, J. (2007). Practical motion capture in everyday surroundings. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 26(3): 35.

44. Wagner, D., Rasmussen, J., and Reed, M. (2008). Assessing the Importance of Motion Dynamics for Ergonomic Analysis of Manual Materials Handling Tasks using the AnyBody Modeling System. In: Proc. Digital Human Modelling for Design and Engineering Conference. 12-14.
45. Yang, J., Rahmatalla, S., Marler, T., Abdel-Malek, K., and Harrison, C. (2007). Validation of Predicted Posture for the Virtual Human Santos TM. In: Duffy, V (Ed.). Digital Human Modeling: 500-510.
46. Zhang, X., and Chaffin, D. (2000). A three-dimensional dynamic posture prediction model for simulating in-vehicle seated reaching movements: development and validation. *Ergonomic* 43(9): 1314-1330.
47. Zhang, X., Kuo, A., and Chaffin, D. (1998). Optimization-based differential kinematic modeling exhibits a velocity-control strategy for dynamic posture determination in seated reaching movements. *Journal of Biomechanics*. 31(11): 1035-1042.
48. Zordan, V., Majkowska, A., Chiu, B., and Fast, M. (2005). Dynamic response for motion capture animation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24(3): 697-701.