

高精度流體特效模擬研究探析

連江祥¹, 郭嘉真², 黃文容³, 葉家宏⁴, 林恆億⁵, 鄭意璇⁶

1 國家實驗研究院國家高速網路與計算中心, 1103918@narlabs.org.tw

2 國家實驗研究院國家高速網路與計算中心, cckuo@narlabs.org.tw

3 國立中山大學電機工程學系, rong42782@gmail.com

4 國立中山大學電機工程學系, yeh@mail.ee.nsysu.edu.tw

5 國家實驗研究院國家高速網路與計算中心, 1503040@nchc.narl.org.tw

6 國家實驗研究院國家高速網路與計算中心, 1503010@narlabs.org.tw

摘要

隨著影視攝影設備及顯示技術的發展,高解析度影片已成為主流,其帶來高擬真與高精細特效的衝擊,使得特效模擬於計算上的門檻也隨之大幅攀升。本論文以常用於製作電影與商業影片之 3D 動畫、特效的流體模擬軟體 RealFlow 進行探討。RealFlow 發展至今已開發出多款適用於各種情況下的流體模組與模擬方法,可呈現多元的流體視覺特效。然而,在使用上仍一直存有計算效率及難以選擇適用之模組等瓶頸。因此,論文中將針對使用上可能遭遇的問題,依照流體模擬的製作環節分為三個部分進行探討。第一部分將介紹 RealFlow 所開發的模組以及其所對應的各種解算器,同時藉由案例運算實驗來分析不同模組與解算器之適用性與其優劣;第二部分,主要透過實作來說明網格引擎與算圖之運算效能;第三部分,則展示 RealFlow 之平行模擬與結合超級電腦打造的算圖農場,所得之高精度流體特效出圖結果。期透過此研究,具體提供運用 RealFlow 最新解算器、模組等演算流體特效之分析數據,以增進高精度畫面之製程效能,並從中探尋自主研發流體模擬之挑戰性課題。

關鍵詞: 3D 特效、RealFlow、GPU 解算器、算圖、超級電腦

A Study on High-resolution Simulation of Fluids for Visual Effects

Jiang-Siang Lian¹, Chia-Chen Kuo², Wen-Jung Huang³, Chia-Hung Yeh⁴, Heng-Yi Lin⁵, Yi-Hsuan Cheng⁶

1 National Center for High-performance Computing, 1103918@narlabs.org.tw

2 National Center for High-performance Computing, cckuo@narlabs.org.tw

3 Department of Electrical Engineering, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan, rong42782@gmail.com

4 Department of Electrical Engineering, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan, yeh@mail.ee.nsysu.edu.tw

5 National Center for High-performance Computing, 1503040@nchc.narl.org.tw

6 National Center for High-performance Computing, 1503010@narlabs.org.tw

ABSTRACT

With the development of cameras for cinematographic and display devices, high resolution movie becomes popular, and brings about not only the demands of realistic simulation and high quality animation effect but also the complexity of computation. In this paper, we delved into the simulation software called RealFlow, which is the popular software to make fluid special effects of movies and commercial films. Up to the present, various simulation tools and technologies have been developed on RealFlow, and could be used to make many kinds of fluid effects in different situations. However, there are some problems in the simulations such as the efficiency of calculation and selection of incorrect tools. In our study, we divided these problems into three parts according to the procedures of fluid simulations: first, analyze the advantage and performance of the fluid tools and solvers; second, introduce the algorithms of mesh and rendering tools; third, show the results of parallel simulations with RealFlow and the final rendering results by supercomputers.

Keywords: 3D Effect, RealFlow, GPU Solver, Rendering, Supercomputer

1 前言

視覺特效與電腦動畫產業最早始於 1980 年代，約在 2000 年之後，特效製作技術有了極大的躍進，現今已大量運用於電影、動畫、遊戲、廣告、視覺包裝及舞台展演，成為影片製作及視覺傳達相當重要且不可欠缺的一環。隨著模擬技術與運算設備的開發為動畫特效帶來更多的可能性，許多透過拍攝難以呈現的效果及各種壯麗震撼的大場景，例如海嘯、戰爭、星際及爆破等場面皆得以完成。其中流體模擬為動畫、特效中最常運用的技術之一，凡舉電影場景中的海浪，或者廣告影片中的飲料和果醬，都可以利用流體模擬來呈現不同特性的動態流體。動畫、特效製作過程中涉及許多軟硬體相互協同作業，要展現極高的擬真度與細節是一項艱鉅的任務。除了必須基於物理原理、電腦圖學與複雜的演算法之外，亦需仰賴足以乘載龐大運算量的超級電腦來模擬與計算。國內外亦有許多專家學者致力於流體模擬技術研發，例如 Ando、Thuerey 與 Wojtan 探討從洞口流出之流體模擬，以及 Thuerey、Wojtan、Gross 與 Turk 對液體張力模擬進行分析與改良。

同時隨著多媒體技術與顯示科技進步與大眾對視覺品質的需求提高，高解析度的電影已成為基本視聽設備規格。為此動畫、特效勢必將朝向細節強化與擬真度提升發展，其將成為模擬技術極大的挑戰。基於以上考量，本論文將以備受業界所青睞的流體模擬軟體 RealFlow，來探討高精度流體特效模擬之製作技術挑戰。

1.1 RealFlow 簡介

RealFlow 是由 Next Limit 公司所開發的流體動力學模擬軟體，具有強大的計算能力，常被運用於製作動態的水面，如海面、湖水、浪花，甚至是物體落入水中所濺起的水花與漣漪，此軟體都有相應的模組得以運用。基本製作過程為藉由粒子模擬流體產生流動或碰撞，運算出符合物理原理的運動軌跡，再由點與點之間互相連接來建構出平滑的多邊形網格。RealFlow 與 3D 動畫製作軟體具有良好的相容性，例如 Maya、3dmax、Lightwave、Cinema 4D、Houdini 及 Softimage，都可匯入流體模擬完的結果，再進行材質 (texturing)、打光 (lighting) 及算圖 (rendering) 程序。因此 RealFlow 的應用相當廣泛，尤其於電影《復仇者聯盟 2：奧創紀元》、《冰原歷險記 4》以及遊戲《Mass3》、《Crtsis2》中都有相當傑出的流體特效展示。除此之外，RealFlow 於 2007 年更獲得奧斯卡技術成就獎等多項大獎的殊榮。

1.2 困題與挑戰

為了因應各種流體需求，RealFlow 已發展出四種適用於不同情況的模組，提供使用者運用。然而對使用者來說，特效製作程序仍存有許多困擾與難題，其中計算效率低、模擬時間過長及如何選擇適用之模組是最常見的問題。另一方面，隨高解析度電影成為主流，所有畫面中的細節都會清楚地呈現在觀眾眼前，電影裡常用到的海浪與水花等大規模流體特效將面臨放大檢視，而上述製作過程中的難題也會加深高精度流體特效模擬的困難與複雜度。有鑒於此，本論文於最新版本的 RealFlow 2015 中，透過實作過程來分析各個模組的適用性與其優劣，並探討網格與算圖技巧，同時展示 RealFlow 之平行模擬與結合超級電腦所帶來的成效。

本論文其他章節之架構如下：第二章為流體特效體模擬探討之方法；第三章為 RealFlow 之案範例實作與分析；第四章則為結論。

2 方法

本論文由流體模擬實例來進行實際測試與剖析，以下主要依製作程序分為三大部分進行探究。第一部分為模組與解算器 (solver)，以最新版本之 RealFlow2015 來研討四大模組與解算器的適用範圍及其優劣，幫助讀者了解如何選擇適宜的工具。第二部分為網格與算圖，文中將解說藉由不同演算法導入網格的方式，以及其算圖模擬過程。第三部分為超級電腦與高精度模擬，本論文闡述了電影等級之高精度大規模流體特效製作流程，以及結合國家實驗研究院國家高速網路與計算中心 (國網中心) 算圖農場 (NCHC Render Farm) 之運算成果。

2.1 模組與解算器

RealFlow 至今已發展出四類流體模組，包含 Hybrido、Stander、RealWave，以及最新推出的 Dyverso 模組。其中 Hybrido 模組適用於大場景與大規模的流體，例如河流與海浪模擬。Stander 模組適合小範圍的流體，例如水杯與牙膏模擬。RealWave 模組是 RealFlow 內唯一的網格模擬，可應用於製作較平靜的水面與離鏡頭較遠的浪面。最新發表的 Dyverso 模組是提供小型到中型規模的場景模擬，運算速度較 Stander 模組快出許多；然而，相較於其他模組，Dyverso 模組的使用程序更為複雜。Dyverso 擁有兩種解算器演算法，分別為 SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) 與 PBD (Position Based Dynamics)，此兩種演算法皆可分別支援 GPU 演算功能，即共有四種製作方式得以運用，選擇流程如圖 1。因此，對於一般使用者而言，該如何選擇適用的演算法

與運算方式，亦有相當難度的門檻。本論文將透過兩個案例實作，分析模組的適用範圍與優劣之處，供使用者參考。

第一個案例為噴泉模擬，其屬於較為簡單的小型規模流體模擬。案例步驟中將會在相同實驗環境下測試 Dyverso 模組的 SPH 與 PBD 演算法，並比較兩者之運算效率與粒子運動模擬效果。同時將此兩種演算法分別於 GPU 執行，藉此分析四種運算方式的成效與優劣。第二個案例是較為激烈的流體模擬，類似河川或溪流的型態。依第一個案例的方式，分析其運用 Dyverso 模組的 SPH 與 PBD 演算法製作的成果，並分別於 GPU 上運算，再比較各種方法的效果。

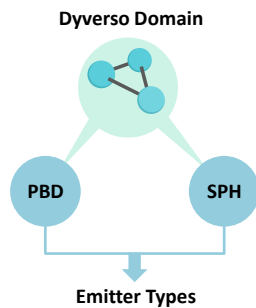


圖 1. Dyverso 模組之選用流程

2.2 網格與算圖

RealFlow 的網格生成器是於模擬完粒子運動與碰撞過程之後，用來產生流體外觀的功能，其主要是透過點與點之間相連結來形成多邊形網格，再由大量的網格來表顯三維的水流形態，同時藉由網隔間不斷的分離與結合來表現出水的各種動態效果。網格生成器包含 Particle Meshes 與 Hybrido Meshes (HM) 兩種形式。Particle Meshes 是計算單一個幀的網格，適用於測試流體效果。而 HM 又提供了標準模式與 OpenVDB 模式讓使用者選擇，其功能幾乎相同，差別在於後者提供了較快速的過濾器來產生網格。然而網格的製作並非簡單的操作便能生成擬真的流體，必須依實際的物理性質來調整網格生成器的各項模擬參數。本論文將用實例，來探討各個參數對網格型態的影響。

續模擬完流體的型態之後，可透過算圖來檢視真正的製作效果。算圖是電腦軟體在模擬自然界物理現象的過程，即是將物理現象轉為數學式，再藉由電腦進行演算，模擬出逼真的光影與材質特性。RealFlow2015 中所提供 Maxwell 算圖引擎是基於物理原理與光譜來進行著色，因此比一般 RGB 的著色方式可更接近真實的樣貌。

2.1 超級電腦與高精度模擬

由於 RealFlow 擁有視覺化的操作介面與強大的流體模擬技術，使得其在電影的流體特效製作上一直是特效師所青睞的軟體。特別是 Next Limit 公司於 ReallFlow 中加入擅長模擬大規模的流體 Hybrido 模組之後，其便成為特效師在製作大場景之高精度度流體模擬的首選。不過，Hybrido 模組在模擬的速度上，一直是待突破的問題。所幸，依 Next Limit 公司公布的訊息，得知最新發表的 Dyverso 模組因演算法的改進，模擬速度上加快了好幾倍。這方面的改進，對中小規模及廣告等級的液體模擬有顯著的幫助。基於此，本論文將藉由案例實作，進一步探究 Dyverso 模組對於製作電影等級的大規模之高精度度流體模擬是否有明顯的幫助，甚至有潛力以其高速模擬效能，以及優異的流體表現，取代 Hybrido 模組。

3 案例實作

本論文運用多個案例實作過程來分析 RealFlow 製作流體特效所遭遇的問題，並依製作流程分為三個部分進行探討，分別為模組與解算器分析、網格與算圖探討及超級電腦與高精度模擬。

3.1 模組與解算器

案例一為簡單的初步測試，類似模擬小型噴泉，模擬尺度約在 4×3 公尺。我們使用 Dyverso 模組之四種模擬方法來進行，藉此分析各解算器之適用性與其優劣；工作站之硬體說明如表 1 所示。在相同實驗環境與相同參數之下，PBD 演算法與 SPH 演算法模擬的成果如下圖 2，可看出在低流速之下，PBD 的粒子較為發散，SPH 的結果則擁有較多的流體細節，但整體而言兩者所呈現的流體效果差異不大。反而在運算效率上可以分出其優劣，如下表 2 所示，PBD 演算法運算速度較 SPH 演算法快約 40%。

表1. 工作站硬體設備

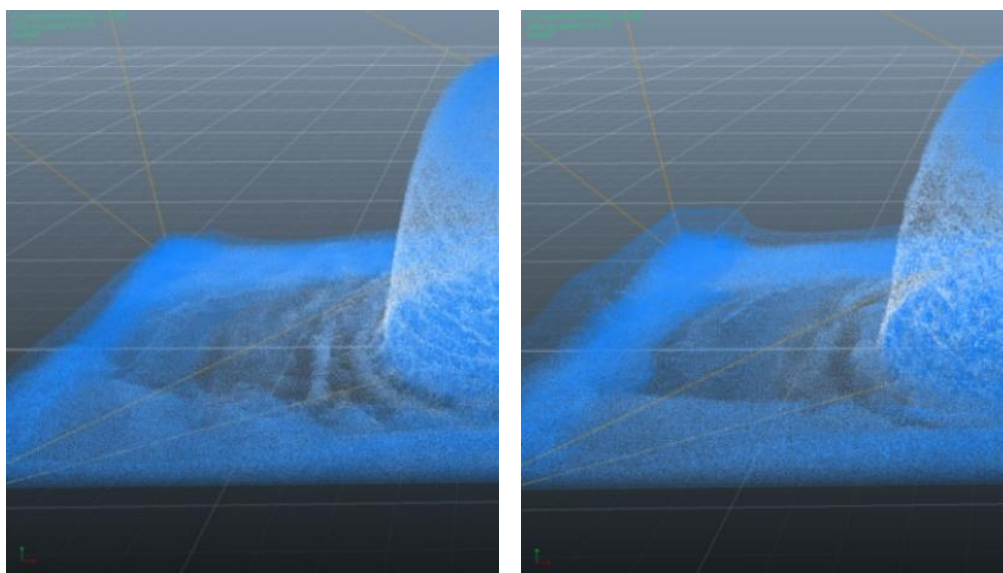
項目	硬體規格
CPU	Intel E5-2687W X2 Cores:16 Threads:32 GFlops:345
RAM	128GB
GPU	Quadro 4000X1(Display) Tesla C2075X2 GFlops:505 X2
HD	WD 1TB BLACK

表 2. 噴泉案範例之 Dyverso 模組 CPU/GPU 運算效率比較

解算器	CPU-SPH	GPU-SPH	CPU-PBD	GPU-PBD
Particles	1,637,280	1,637,280	1,637,280	1,637,280
Cache	9.8GB	9.8GB	9.8GB	9.8GB
Frame	0-200	0-200	0-200	0-200
Time	14分06秒	73分27秒	8分25秒	59分31秒

除了 CPU 運算方法之外，Dyverso 模組另提供於 GPU 上運算的方式。目前 GPU 版本不論參數、格式或使用方式皆與 CPU 版本幾乎沒有差別，由此可知 RealFlow 在演算法相容上做了許多努力。惟 Dyverso 模組的 GPU 版本是採用 OpenCL 架構，且限定在一張 GPU 卡內計算。若將 PBD 與 SPH 分別於 GPU 上執行，可發現運算速度明顯較 CPU 低落，如表 2 所示，另外，我們發現了反差的部分，在 GPU 之下 PBD 與 SPH 的速度差距縮小，只快了 20%，SPH 演算法在 GPU 上反而是較為適用的。綜合上述，GPU 解算器運算速度雖然明顯低於 CPU，但基於在流體細節表現較為優異的 SPH 上展現了適用性，後續仍有可為之勢。未來，若隨著 GPU 演算法技術的提升，以及支援多卡 GPU 協同運算，可望高於 CPU 的效率，解決更多流體特效模擬的計算問題。

案例二屬激烈的流體情境，為模擬類似河川激流之畫面，模擬規模約 5×10 公尺，工作站硬體說明如表 1。每個測試過程皆在相同環境與相同參數之下進行，PBD 演算法之運算速度較 SPH 演算法快約 39%（如表 3）。圖 3 與圖 4 為兩種演算法分別在 CPU 及 GPU 上運算之結果，可以看出在高流速下兩者所呈現的效果差異明顯，PBD 演算法雖然處理較快，但流體細節的表現不如 SPH 演算法出色。此測試額外增加舊有的 Stand 模組，模擬效果與流體細節皆表現非常優秀，如圖 5 所示；其缺點在於運速度緩慢，暫存（cache）檔輸出較大，且 CPU 平行運算效率低於其他演算法。由案例二中所測試的兩項實作案例可知，就演算法運算速度來說，PBD 速度最快，而 Stand 最慢；就流體細節表現來看，反而是 Stand 表現最優秀，而 PBD 的細節最少。



(a) SPH 演算法模擬

(b) PBD 演算法模擬

圖 2. 噴泉案例之 Dyverso 模組模擬結果比較

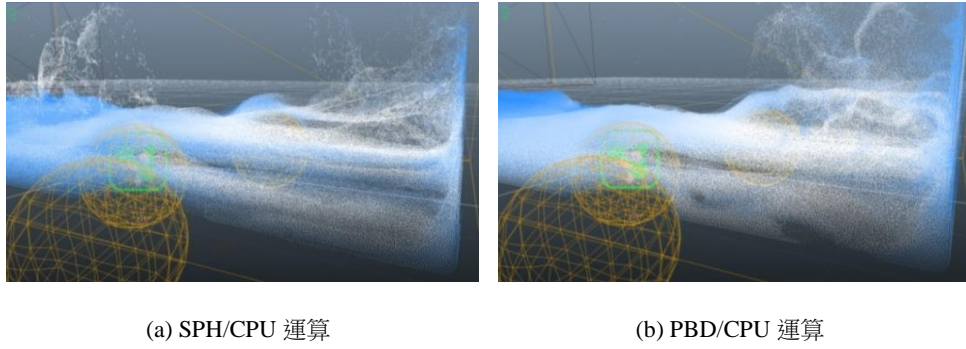


圖 3. 河川激流案例之 Dyverso 模組 CPU 解算器模擬結果

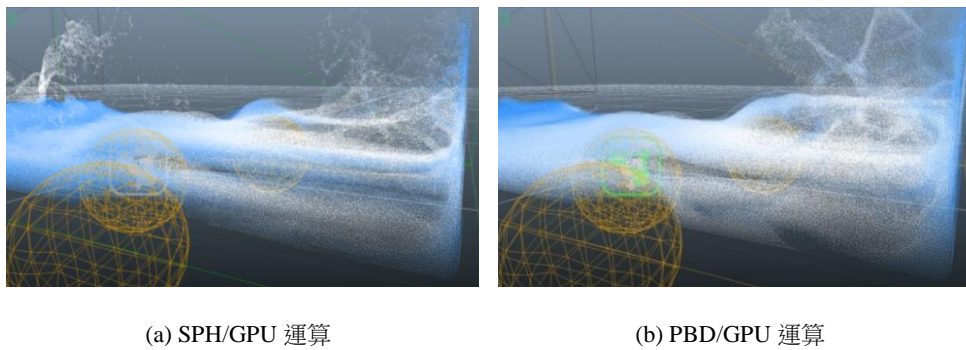


圖 4. 河川激流案例之 Dyverso 模組 GPU 解算器模擬結果

表 3. 河川激流案例之 Dyverso 模組運算效率比較

解算器	CPU-PBD	GPU- PBD	CPU-SPH	GPU- SPH	CPU-Stand
Particles	2089396	2089396	2089396	2089396	2089396
Cache	12.2GB	12.2GB	12.2GB	12.2GB	21.6GB
Frame	0-100	0-100	0-100	0-100	0-100
Time	24分11秒	2小時10分51秒	39分06秒	2小時45分05秒	3小時15分05秒

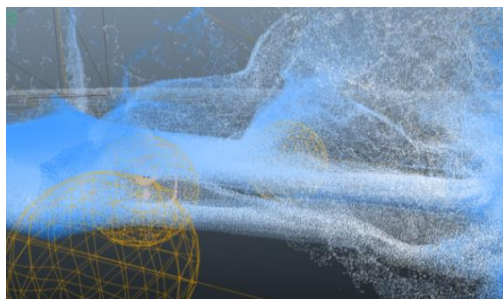


圖 5. 河川激流案例之 Stand 模組模擬結果

3.2 網格與算圖

網格的生成往往是影響成果的關鍵步驟，為了獲得良好的品質，計算時間與網格容量對

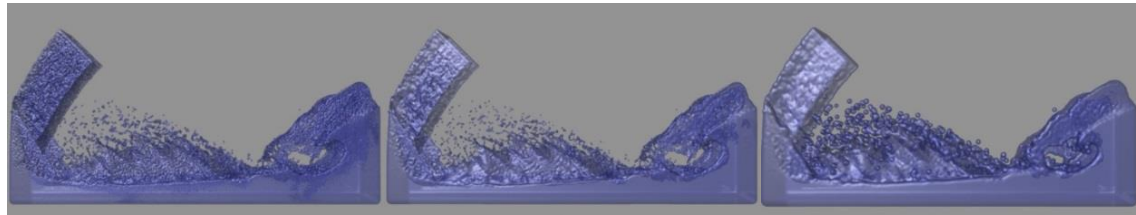
顯卡的負擔都是一大挑戰。RealFlow2015 新增了 VOD Mesh 模組，以下我們使用簡單的案例與原有的 Stand Mesh 與 Legacy Mesh 進行比較。本節案例模擬範圍約 $4 \times 1 \times 2$ 公尺，使用 Dyverso SPH 解算器，粒子數約 33 萬，且 Polygon Size 皆為設定為 0.01 的條件之下，比較各種演法所產生的不同效果。此外，再個別探討敏感參數 Radius 為 0.02 與 0.08 之結果。其中 Filters 為預設值，皆不做調整。

案例三為 Radius 設定 0.02 之效果，Stand Mesh 擁有最好的速度與較小的 cache 大小(表 4)。新版的 VOD Mesh 雖然略遜一籌，但擁有更多的細節，且有不錯的速度表現(圖 6)；而 Legacy Mesh 運算速度非常緩慢，但具有 cache 容量最小的特性。案例四為 Radius 設定

0.08 之結果，詳表 5。當中，VOD Mesh 演算法雖然運算快速但水的型態不夠真實；Stand Mesh 的運算速度慢，但模擬效果較逼真，且 cache 容量也小了許多。Legacy Mesh 耗費的時間最長（圖 7）。

透過圖 6 與圖 7 可歸納出 3 項重點：1) VOD Mesh 擁有非常優異的網格計算速度，但會產生大量的 cache，因此使用時須審慎評估

cache 大小是否會造成過大的硬體負擔。2) Stand Mesh 之演算法有良好的網格效果，然而其對於不同的 Radius 參數有非常大的計算時間差異，建議先大略訂下 Radius 參數數值或以較小的值做測試。3) Legacy Mesh 雖有較小的 cache 容量，但計算時間過久，且效果較不穩定。

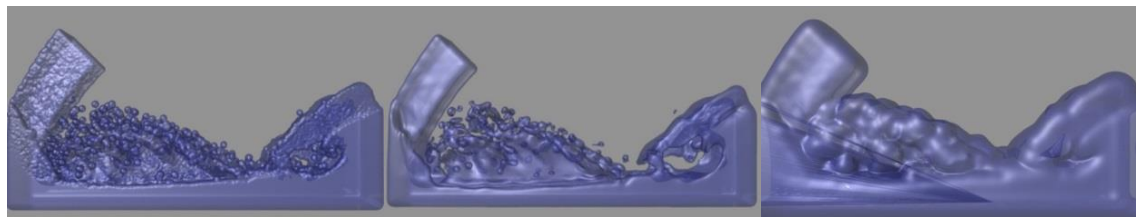


(a) VOD Mesh

(b) Stand Mesh

(c) Legacy Mesh

圖 6. Radius 為 0.02 之模擬結果



(a) VOD Mesh

(b) Stand Mesh

(c) Legacy Mesh

圖 7. Radius 為 0.08 之模擬結果

表4. Radius為0.02之運算效率比較

演算法	VOD Mesh	Stand Mesh	Legacy Mesh
Polygon Size	0.01	0.01	0.01
Radius	0.02	0.02	0.02
Cache	11.1GB	3.91GB	2.82GB
Time	11分30秒	5分16秒	2小時22分20秒

表5. Radius為0.08之運算效率比較

演算法	VOD Mesh	Stand Mesh	Legacy Mesh
Polygon Size	0.01	0.01	0.01
Radius	0.08	0.08	0.08
Cache	5.1GB	3.61GB	3.1GB
Time	5分11秒	3小時9分16秒	40小時22分20秒

3.3 超級電腦與高精度模擬

本節運用 Dyverso 模組與 Hybrido 模組分別演算於地上積水的狀態下，行駛中車輛穿過水幕的特效。經由運算結果得知，Dyverso 模組無法用於模擬此大範圍的流體特效，也無法使用次級粒子發射器產生水花泡沫來增加畫面的豐富度以及真實度，其流體模擬所產生的動態細節也相對不足，無法滿足擬真流體模擬（圖 8）。反之，RealFlow 的 Hybrido 模組所模擬出來的細節及品質則是相當地優秀，詳圖 9。若再加上次級粒子發射器和三級粒子發射器，其模擬出的細節是會更加細緻且真實。最後，於國網中心所建置之算圖農場，運用 Hybrido 之平行計算，產生高解析度之高精度粒子與網格材質之高速運算出圖（圖 10）。本案例之運算架構概念如圖 11 所示。

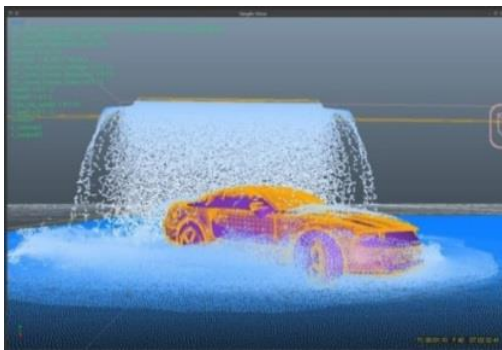


圖 8. Dyverso 模組之測試

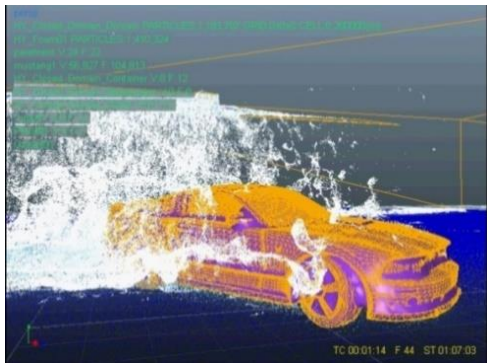


圖 9. Hybrido 模組之模擬結果

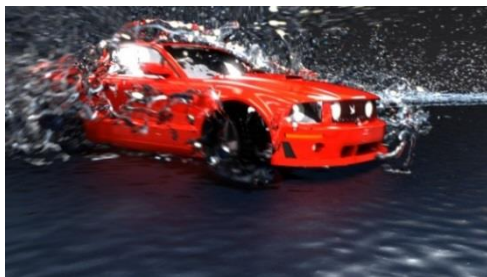


圖 10. 導入 Maya 之算圖結果

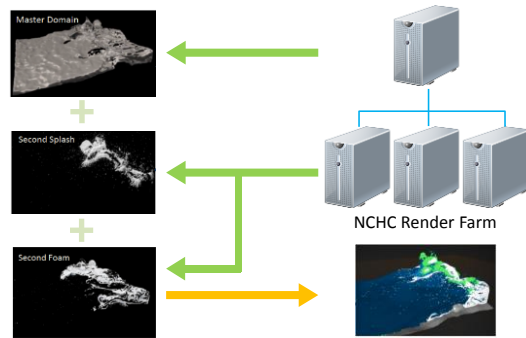


圖 11. Hybrido 於算圖農場之運算概念

4 結論

本論文藉由案例實作，探討 RealFlow 製作高精度流體特效模擬之效能與適用性。綜結如后：1) 就低流速之噴泉案例測試結果得知，不論 CPU 或 GPU 之模擬成效，甚或 SPH 與 PDB 解算器所產生的結果，皆無太大差異。2) 在河川激流之案例中，發現 GPU 解算器運算速度雖然明顯低於 CPU，但 GPU 基於流體表現較為優異的 SPH 上展現了較佳的適用性，後續仍有可為之勢。若 GPU 演算法之技術提升，並支援多卡 GPU 協同運算，可望高於 CPU 的運算效率。

另一方面，RealFlow2015 擴增了多項新功能，但對使用者選擇適用模組的難度，卻也相對提升。本論文根據測試結果與實作經驗，給予使用上的建議：1) Dyverso 模組適用於模擬場域 10 公尺以內之場景，且 PDB 解算器之運算速度快，而 SHP 有較佳的細節表現。2) Hybrido 模組適合大場景模擬，其擁有最高精度之演算法，並支援平行模擬。就目前高精度畫質之需求趨勢，Hybrido 仍為製作方法之首選。3) Stand 模組適合小範圍之模擬，可演算出誇張的流體細節，但需要耗費大量的運算時間。同時，透過網格與算圖之新功能測試結果可知，Stand Mesh 效果佳，其擁有流體細節上的優勢且所產生的 cache 容量小。VOD Mesh 則擁有速度上的優勢，使用者可依需求選擇適用的網格生成器。

總之，流體特效原本即是複雜且高難度的模擬技術，隨著 3D 特效的蓬勃應用與高畫質螢幕的普及，益發促使流體特效領域面對高精細課題的挑戰。本論文以發展高精度流體模擬之自主技術為訴求，藉案例實作之具體結果與探析，給予使用者運用 RealFlow 最新解算器、模組演算流體特效之量化參考與建議，期以縮減高精度畫面之製作時間，並供使用者從中探尋自主研发流體模擬之高速算圖可能性。

參考文獻

1. 期刊

Ando, R., Thuerey, N., & Wojtan, C. (2015). A Stream Function Solver for Liquid Simulations. *ACM Transactions on Graphics*, 34(4), 8-16.

Thuerey, N., Wojtan, C., Gross, M., & Turk, G. (2010). A Multiscale Approach to Mesh-based Surface Tension Flows. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4), 1-10.

2. 研討會文章

Lain, J.S, Kuo, C.C., & Chang, W.T. (2012, December). A New Vision for Modern Dance in Terms of Dynamics, SIGGRAPH Asia 2012, Singapore.

Chang, C.W, Chiu, P.H. Chiu, & Kuo, C.C. (2014, December). Milkrown Simulation using OpenACC Accelerated Framework, SIGGRAPH Asia 2014, China.