

# La realtà virtuale e la visualizzazione scientifica: strumenti e tecniche per migliorare la comprensione dei dati

Andrea Sanna, Bartolomeo Montrucchio, Claudio Zunino, Paolo Montuschi

Dipartimento di Automatica e Informatica  
Politecnico di Torino  
Corso Duca degli Abruzzi 24, I-10129 Torino (Italy)  
Email: {sanna,montru,c.zunino,montuschi}@polito.it

## Abstract

Negli ultimi anni si è assistito ad un incremento costante nella potenza di calcolo degli elaboratori a fronte di una continua diminuzione dei costi. Questo ha avuto un impatto notevole nel campo delle simulazioni, permettendo di ottenere insiemi di dati (dataset) sempre più grandi e complessi; esempi tipici sono le simulazioni climatiche e fluido dinamiche (Computational Fluid Dynamics – CFD), lo studio della fisica delle superfici, la modellizzazione bio-molecolare e così via.

Per molte applicazioni è quindi diventato di basilare importanza poter analizzare e investigare dataset di notevoli dimensioni, spesso dipendenti dal tempo. Le tecniche di visualizzazione tradizionali si sono dimostrate spesso inadatte e insufficienti a rappresentare dati per loro natura tridimensionali e altamente strutturati.

In questo contesto, le tecniche di realtà virtuale possono diventare un valido strumento per migliorare la visualizzazione e la comprensione dei dati; l'utente è "immerso" in un mondo creato interamente al computer e può analizzare le rappresentazioni tridimensionali dei dati da punti di vista differenti.

Questo articolo presenta un ambiente di visualizzazione virtuale per la CFD dove l'utente può visualizzare i risultati delle simulazioni; in particolare, è possibile visualizzare vari tipi di traiettorie delle particelle (pathline, streakline e timeline) oltre alle tradizionali rappresentazioni dei campi di velocità mediante vettori tridimensionali.

**Keywords:** visualizzazione scientifica, ambienti virtuali, CFD.

## 1. Introduzione

Le simulazioni al computer permettono di ottenere dati molto affidabili in un ampio spettro di discipline senza dover eseguire praticamente gli esperimenti; discipline come la CFD, la modellazione climatica, la chimica bio-molecolare, la fisica delle superfici e così via, fanno un largo uso di queste simulazioni computerizzate. Tali simulazioni producono spesso dei campi vettoriali che devono essere visualizzati al fine di comprendere la natura e l'evoluzione della simulazione stessa.

Una visualizzazione "adeguata" di questi campi vettoriali è tuttora un problema, principalmente per la difficoltà di trovare un'opportuna icona in grado di mostrare/rappresentare al meglio le caratteristiche del campo su di un monitor. Le tradizionali rappresentazioni numeriche (tabelle o analisi statistiche) o grafiche bidimensionali sono spesso insufficienti per mostrare in modo intuitivo ed efficace le caratteristiche presenti in dataset di notevoli dimensioni, quindi, nuovi strumenti e tecnologie devono essere impiegate per risolvere questo problema.

La realtà virtuale offre un nuovo e utile strumento per analizzare e interagire con i dati prodotti dalle simulazioni che per loro natura siano 3D e altamente strutturati. Creare ambienti virtuali dove

l'utente può navigare e interagire con le rappresentazioni delle simulazioni può aumentare le sue capacità di rilevare caratteristiche e anomalie, come pure pattern tipici nei dati.

Questo articolo propone un ambiente virtuale orientato alla visualizzazione dei flussi. Il ciclo di una simulazione di flusso numerica nella Computational Fluid Dynamics (CFD) consiste generalmente di tre fasi: generazione della griglia, calcolo del flusso e visualizzazione; i primi due passi non sono direttamente collegati alla visualizzazione e in questo contesto si è supposto che siano stati eseguiti off-line ottenendo un campo vettoriale (come soluzione numerica) che dovrà essere visualizzato all'interno dell'ambiente virtuale.

Gli obiettivi principali nello sviluppo del software sono stati la semplicità d'uso (in termini di interfaccia uomo – macchina) e la possibilità di utilizzo su macchine di fascia medio bassa come i Personal Computer dell'ultima generazione dotati di scheda video accelerata.

Questo articolo presenta l'abbinamento realtà virtuale e visualizzazione scientifica descrivendo il contesto di sviluppo e le principali aree applicative (Sezione 2) focalizzandosi poi sulle tecniche di visualizzazione dei campi vettoriali mediante il tracciamento di particelle (Sezione 3). Infine, la Sezione 4 descrive nel dettaglio le caratteristiche dell'ambiente virtuale proposto.

## 2. Descrizione del contesto

Solo recentemente la tecnologia ha permesso l'utilizzo della realtà virtuale in diversi settori applicativi: prototipazione, applicazioni mediche, simulazioni, allenamenti e, non ultimo, nel campo dell'intrattenimento [1]. Un settore di applicazione particolarmente importante della realtà virtuale è quello legato alla visualizzazione scientifica; la realtà virtuale può fornire rappresentazioni più "ricche", un'interazione diretta e questo può aumentare la capacità di ricercatori e scienziati di comprendere a fondo la natura dei dati.

Per chiarire il contesto in cui nasce e si sviluppa l'abbinamento realtà virtuale – visualizzazione scientifica, bisogna rispondere a tre quesiti fondamentali:

- 1 Perché usare tecniche di realtà virtuale e non le tradizionali rappresentazioni?
- 2 Perché la visualizzazione è così importante rispetto ad altre tecniche di analisi come, ad esempio, quelle statistiche?
- 3 Quali tipi di tecnologie sono oggi disponibili per realizzare ambienti virtuali?

La risposta alla prima domanda è legata all'enorme sviluppo tecnologico che ha contraddistinto il settore informatico (in particolare l'hardware) nell'ultimo decennio. La capacità di calcolo degli elaboratori è cresciuta esponenzialmente e così i dati ricavati dalle simulazioni. Tera Byte (TB) di dati sono ormai comuni in diversi campi applicativi come la CFD, le simulazioni meteorologiche, l'astrofisica eccetera. Esempi di applicazioni che generano grossi dataset possono essere trovati al Dipartimento di Energy's Accelerated Strategic Computing Initiative (ASCI, <http://www.llnl.gov/asci/>). La comprensione e l'analisi di tali dati è spesso improponibile tramite tecniche di analisi numerica e richiede visualizzazioni sofisticate per permettere all'utente di valutare gli aspetti significativi delle simulazioni.

Le tecniche di visualizzazione risultano sempre particolarmente efficaci perché sfruttano la capacità del cervello umano di interpretare e comprendere informazioni e stimoli visivi (più del 50% dei neuroni sono dedicati alla comprensione e "decodifica" della visione). Quindi, mentre i computer possono essere usati per eseguire le simulazioni, ridurre e filtrare i dati, l'occhio umano è particolarmente adatto a riconoscere visivamente regioni di interesse, caratteristiche e anomalie (pattern-recognition).

Due tipi di realtà virtuale si stanno parallelamente diffondendo: la Immersive Virtual Reality (IVR) e la Desktop Virtual Reality (DVR). La prima fa largo uso dei cosiddetti CAVE [2], ovvero degli ambienti costituiti da schermi sui quali viene proiettata la scena; l'utente è fisicamente immerso nel CAVE e percepisce il senso di tridimensionalità mediante dispositivi stereoscopici HMD (Head Mounted Display). La IVR fornisce sicuramente la soluzione migliore e più realistica, ma presenta gli svantaggi degli alti costi e della necessità di avere un ambiente dedicato dove montare il CAVE. Questo fa sì che la IVR sia alla portata solo di grandi centri di ricerca o industrie; per contro la DVR si pone l'obiettivo di fornire, ad una vasta gamma di utilizzatori, strumenti comunque efficaci ma a costi molto più contenuti. In particolare, la visualizzazione della scena viene effettuata su monitor tradizionali e i costosi elaboratori paralleli che comandano la proiezione nel CAVE sono sostituiti da workstation grafiche o da Personal Computer dotati di schede video accelerate dell'ultima generazione.

### **Le principali applicazioni della realtà virtuale**

I campi applicativi nei quali la realtà virtuale e la visualizzazione scientifica si propongono come un abbinamento consolidato sono svariati.

La medicina è una delle aree applicative principali della VR [3]; le applicazioni mediche della realtà virtuale sono nate inizialmente con l'obiettivo di visualizzare dati medici complessi durante interventi chirurgici, simulazioni di operazioni e sedute di allenamento. Queste applicazioni sono poi state estese alla telemedicina e ad applicazioni collaborative. Di particolare interesse sono le applicazioni della realtà virtuale alla chirurgia, che hanno trovato una notevole diffusione nelle aree "dell'educazione medica" (il motivo è probabilmente legato alla criticità in termini di sopravvivenza del paziente). Queste applicazioni hanno spesso preso il nome di "medical flight simulator" per evidenziare la similitudine con le problematiche legate allo sviluppo dei simulatori di volo per i piloti.

La realtà virtuale costituisce uno strumento importante per la chimica e la modellizzazione molecolare [4]. Gli scienziati possono creare e animare modelli 3D con i quali possono interagire all'interno di mondi virtuali; i vantaggi sono tanto maggiori quanto sono più complicate le strutture che devono essere visualizzate. Un altro aspetto è la possibilità di creare dei laboratori virtuali dove simulare veri e propri esperimenti replicando le apparecchiature disponibili nella realtà, evitando però i rischi e soprattutto abbattendo i costi.

Uno dei più comuni usi della realtà virtuale è quello nel campo della simulazione e dell'intrattenimento; ad esempio, i piloti si addestrano sui simulatori di volo e allo stesso modo i militari possono simulare particolari condizioni di missione per i soldati [5][6]. L'addestramento è anche usato da vigili del fuoco, subacquei [7] e per pianificare missioni nello spazio [8]. Nel campo dell'intrattenimento la realtà virtuale è impiegata per progettare e realizzare, oltre ai ben noti video giochi, dei veri e propri parchi di divertimento a tema [9].

La progettazione meccanica al computer ha fatto enormi passi in avanti con strumenti di Computer Aided Design (CAD); la realtà virtuale può ulteriormente migliorare la capacità di progettare e assemblare oggetti tridimensionali [10] come pure di controllarne il comportamento in termini di resistenza agli urti, al calore e a sollecitazioni di vario genere [11]. I sistemi CAD tradizionali vengono sempre più abbinati con tecnologie VADE (Virtual Assembly Design Environment) che aiutano a pianificare, valutare ed assemblare sistemi meccanici [12].

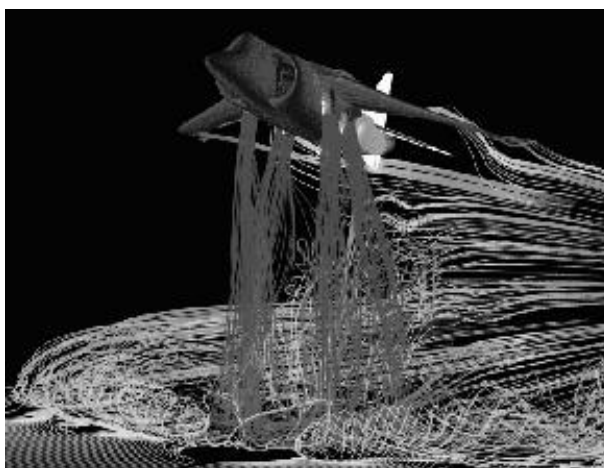
In campo archeologico e artistico la realtà virtuale è usata principalmente per ricostruire siti, documenti e opere; i modelli e le opere d'arte, in generale, sono visualizzati su schermi/monitor, in ambienti virtuali dislocati nei musei, su Internet e così via [13] [14].

### 3. Tracciamento delle particelle

Questo lavoro studia l'abbinamento realtà virtuale - visualizzazione scientifica per la visualizzazione di flussi e campi vettoriali; tale visualizzazione è di basilare importanza, ad esempio, nel campo della CFD dove è di particolare interesse lo studio dei campi non stazionari, ovvero che possono evolvere nel tempo.

Uno dei modi più efficienti per visualizzare flussi non stazionari è quello di calcolare le traiettorie delle particelle [15]. Nei flussi stazionari, le streamline rappresentano degli involucri delle linee di campo tangenti al campo vettoriale ad un dato istante di tempo. Per i flussi non stazionari, che sono molto più interessanti e complicati da studiare, è possibile calcolare tre tipi di traiettorie: pathline, streakline e timeline.

Le pathline mostrano la traiettoria di una singola particella rilasciata da un punto di inserzione, le streakline sono delle linee che uniscono le posizioni di tutte le particelle emesse dallo stesso punto di inserzione (per simulare le streakline è necessario che le particelle siano continuamente rilasciate dai punti di inserzione ad ogni passo temporale della simulazione), mentre le timeline sono linee che uniscono le posizioni delle particelle che sono state emesse allo stesso istante di tempo da differenti punti di inserzione. La rappresentazione di molte tracce può fornire un'indicazione molto precisa di come sta evolvendo il flusso; un esempio è mostrato in Figura 1.

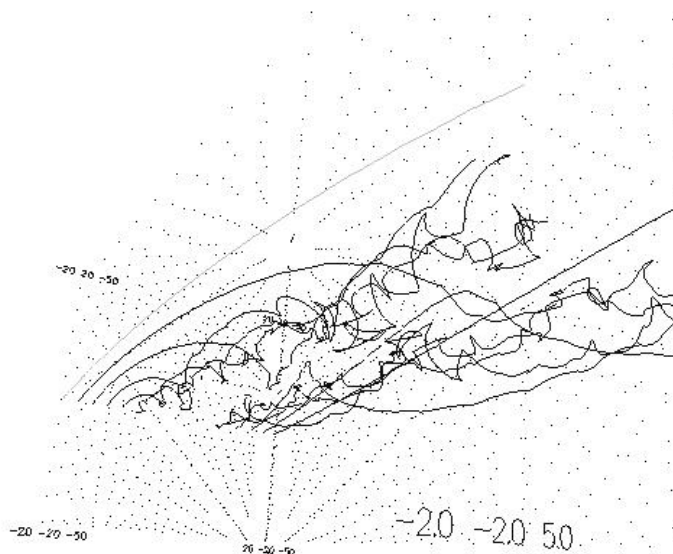


*Figura 1 esempio di rappresentazione dei flussi mediante tracce di particelle.*

Per flussi di tipo stazionario, pathline e streakline producono lo stesso risultato [16], ma è stato dimostrato che streakline e timeline possono mostrare informazioni non visualizzabili dalle pathline per flussi non stazionari [15] [17]; ad esempio in [15] è mostrato come un vortice dietro un profilo sia visibile mediante le streakline ma non con streamline e pathline che non permettono di visualizzare chiaramente questa caratteristica del flusso.

Il problema della visualizzazione dei flussi mediante le traiettorie delle particelle è legata alla natura dei dati che sono intrinsecamente tridimensionali e altamente strutturati. Un esempio di rappresentazione 3D dei flussi non stazionari che si ottengono dietro un profilo alare è mostrata in Figura 2; il programma usato per generare questa immagine [18] permette di visualizzare il campo, ruotarlo e traslarlo a piacimento, visualizzare pathline, streakline e timeline, ma non permette all'utente di "navigare" ed "esplorare" i dati come se fosse all'interno dei medesimi.

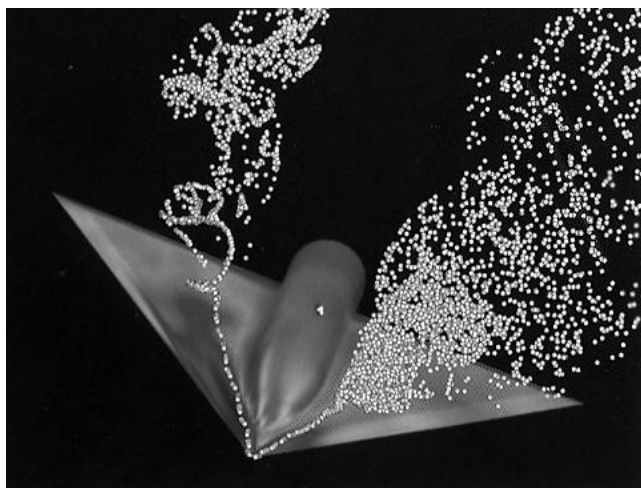
Questo è il vero limite di tutte le tecniche tradizionali e contemporaneamente è il valore aggiunto che la realtà virtuale può portare nel campo della visualizzazione scientifica. La possibilità di essere immersi in un mondo sintetico, in prima persona, aumenta notevolmente la capacità di comprendere la natura dei dati visualizzati e di rilevare le informazioni caratterizzanti la simulazione.



*Figura 2 rappresentazione tridimensionale di un campo non stazionario mediante streakline.*

#### **4. Visualizzazione dei flussi in un ambiente virtuale**

Come detto in precedenza, il campo ottenuto può essere stazionario o non stazionario e il metodo migliore per visualizzare i flussi (vedi Figura 3) è quello di simulare il tracciamento delle particelle assumendo una serie di punti di inserzione da cui le particelle vengono emesse a intervalli di tempo costanti, seguendo poi le traiettorie delle particelle all'interno del campo vettoriale.



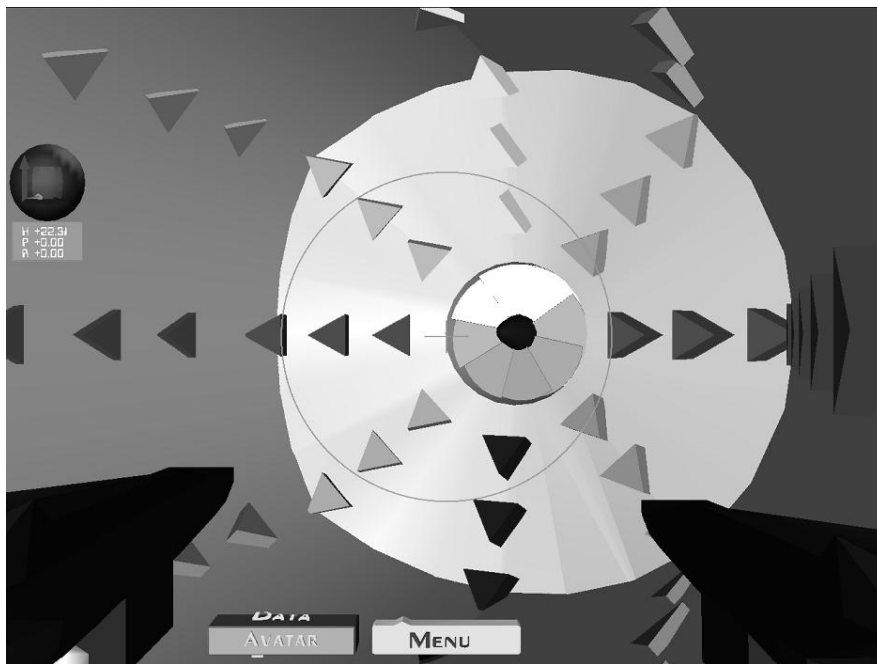
*Figura 3 visualizzazione dei flussi*

Le due problematiche principali che bisogna affrontare nella visualizzazione sono: il punto di vista da cui l'utente osserva i dati (risultati della simulazione) e l'interfaccia con cui l'utente interagisce con il

sistema. L'obiettivo è permettere all'utente di potersi muovere a piacimento nell'ambiente virtuale al fine di trovare la/e posizione/i migliore per comprendere al meglio le caratteristiche dei dati; al contempo, l'utente deve poter interagire nel modo più semplice e intuitivo possibile per concentrare la sua attenzione sui dati e non sull'interfaccia di navigazione.

### **L'ambiente virtuale**

Ai fini di permettere la massima interazione tra utente e ambiente, si è realizzato un sistema in cui l'utente possa muoversi con sei gradi di libertà (rotazioni e traslazioni attorno ai tre assi). La possibilità di muoversi a piacimento crea il problema all'utente di mantenere l'orientamento; a tale scopo l'ambiente (una galleria del vento virtuale dalla geometria molto semplificata) presenta frecce tridimensionali che indicano la direzione del flusso uscente dalla girante e, soprattutto, una bussola per visualizzare gli angoli di rollio beccheggio e imbardata rispetto ai tre assi principali (vedi Figura 4).



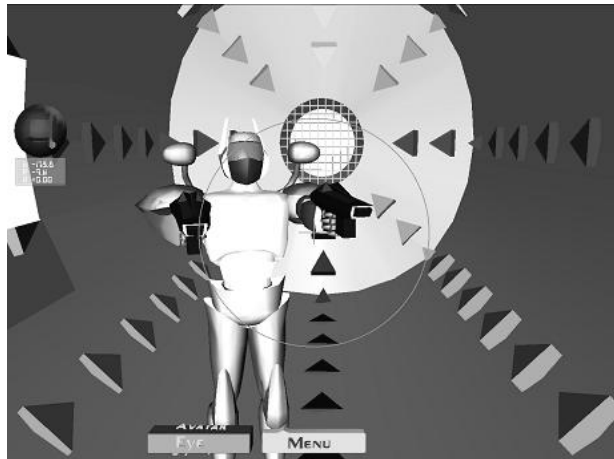
*Figura 4 ambiente virtuale*

Ai fini di fornire all'utente un elevato senso di immersione nell'ambiente, è possibile adottare una visualizzazione stereoscopica basata su occhiali a cristalli liquidi. Sul monitor vengono presentati alternativamente i frame per l'occhio destro e quello sinistro; un dispositivo cattura l'uscita dalla scheda video e controlla la polarizzazione delle lenti degli occhiali permettendone alternativamente la chiusura. Questo dispositivo non permette il tracciamento della posizione della testa dell'osservatore (come fanno invece i dispositivi HMD) ma, a bassi costi, consente di avere un elevato senso di immersione e realismo.

### **Avatar**

In un ambiente virtuale, l'utente è rappresentato da un suo alter ego, detto comunemente avatar. L'avatar deve permettere l'interazione con l'ambiente e con gli "oggetti" in esso contenuti.

Nel lavoro proposto sono stati concepiti due avatar, uno principale (vedi Figura 5) e uno secondario (vedi Figura 6).

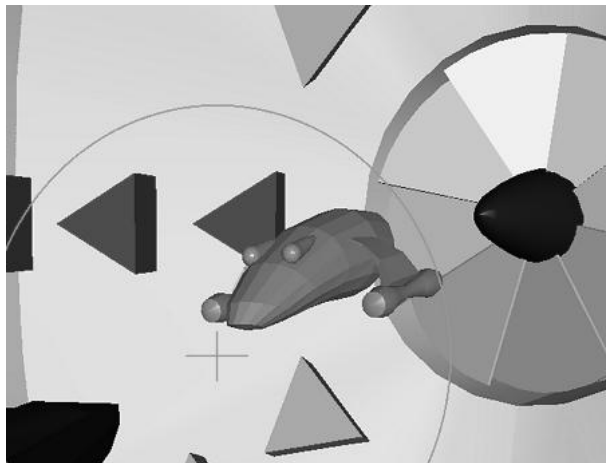


*Figura 5 avatar principale*

L'avatar principale ha la forma di un umanoide e dispone di due "pistole" per il puntamento e la selezione degli oggetti. Questo si ricollega ai problemi di interazione tra utente e ambiente virtuale; a differenza del paradigma 2D WIMP (windows, icons, menus, pointing) le interfacce 3D devono sostanzialmente permettere la navigazione, la selezione e la manipolazione degli oggetti.

Nell'ambiente virtuale, l'utente può attivare, mediante tastiera o joystick, un menù tridimensionale per gestire un certo numero di azioni (caricamento di un modello, caricamento del campo vettoriale, selezione del tipo di tracce da visualizzare e così via); inoltre, le due "pistole" dell'avatar principale permettono di puntare e selezionare un oggetto dell'ambiente che potrà poi essere manipolato a piacimento (traslato e ruotato).

I movimenti delle braccia dell'avatar principale avvengono in modo "controllato", ovvero una catena cinematica inversa realizza il puntamento degli oggetti in modo da fornire un senso ulteriore di realismo.



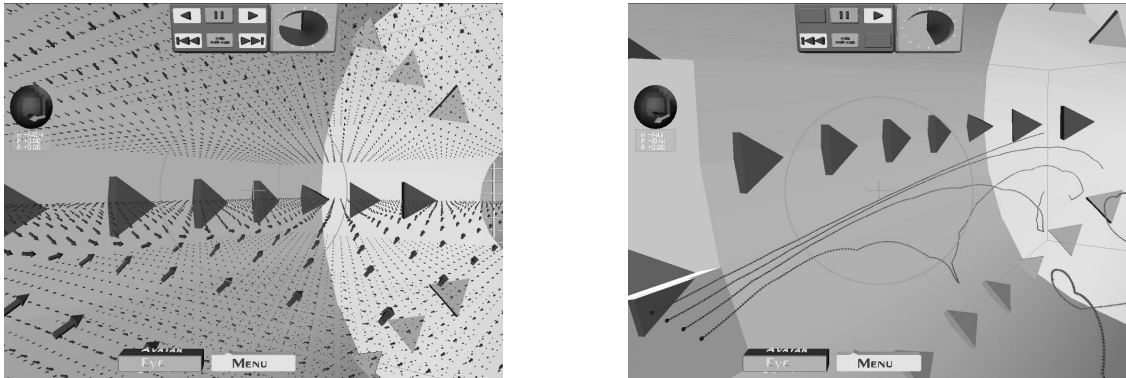
*Figura 6 avatar secondario*

I due avatar si possono muovere a piacimento dentro l'ambiente e l'utente può selezionare alternativamente la vista dei due in modo da poter sempre disporre di due punti di osservazione.

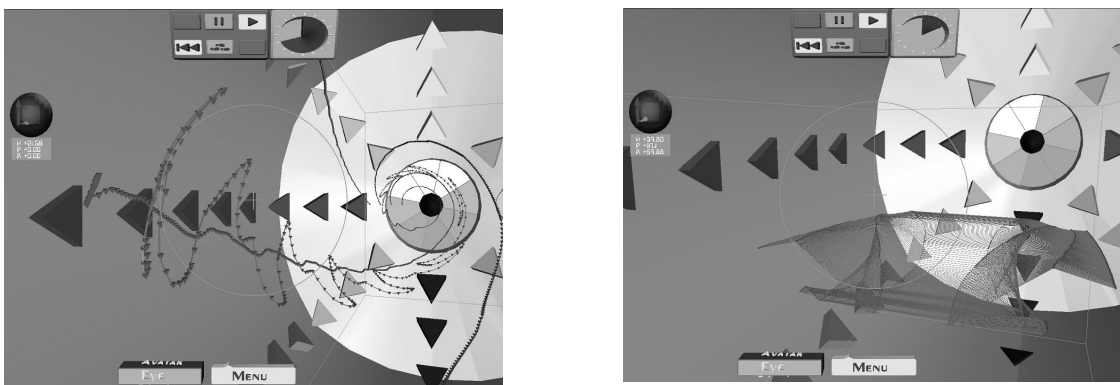
L'avatar secondario, che ha la forma di una piccola navicella, può entrare dentro il campo vettoriale, fornendo così un punto di vista "interno ai dati".

### Rappresentazione dei dati

Il flusso è rappresentato sia mediante vettori 3D (vedi Figura 7) che denotano il campo vettoriale sia mediante le tracce delle particelle: pathline, streakline e timeline (vedi Figura 7 e Figura 8).



*Figura 7 rappresentazione mediante vettori 3D a sinistra e pathline a destra*



*Figura 8 streakline a sinistra e timeline a destra*

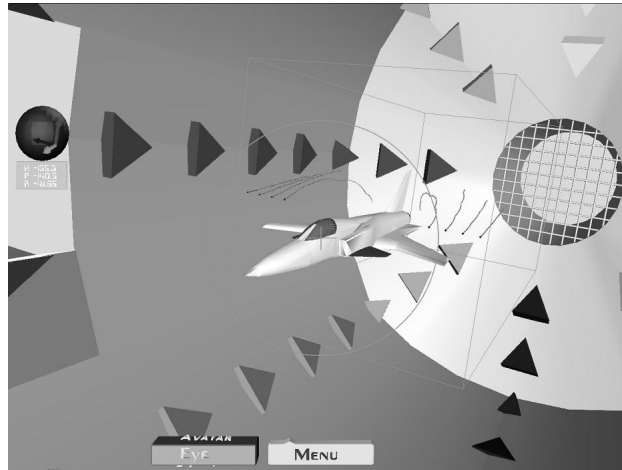
In entrambe le rappresentazioni l'utente può controllare lo svolgersi della simulazione come se comandasse un video registratore. La visualizzazione può essere effettuata passo passo (ovvero time step per time step) sia in avanti sia indietro, evidenziando l'evoluzione della simulazione all'emissione di ogni particella, oppure può essere continua. In quest'ultimo caso, l'utente può bloccare l'evoluzione temporale in qualsiasi momento, come pure far ripartire l'intera simulazione come se riavvolgesse il nastro di una cassetta (vedi pannello in alto nella Figura 7 e nella Figura 8); infine, è presente anche un'opzione per la ripetizione continua della simulazione.

Nella rappresentazione mediante pathline si possono chiaramente vedere i punti di inserzione delle particelle, rappresentati da sfere di colore blu. I vari punti nella traiettoria delle particelle (pathline e



streakline) sono denotati da tetraedri di colore verde uniti da cilindri di colore viola (visibili chiaramente nella rappresentazione mediante streakline di Figura 8).

Parallelamente alla visualizzazione delle simulazioni è possibile caricare modelli tridimensionali (in particolare nel formato 3D Studio) che possono essere manipolati dall'utente. Ad esempio, può essere utile caricare il modello di un velivolo (o di un profilo alare) e poi visualizzare dietro di esso l'evoluzione dei flussi proprio come se si fosse in una vera galleria del vento (vedi Figura 9).



*Figura 9 caricamento di un modello 3D*

### **Sviluppi futuri**

Sebbene il software sviluppato sia altamente portabile ed espandibile (interamente scritto in ANSI C++ e basato su OpenGL [19] e Plib [20] per la realizzazione dell'interfaccia grafica) gli sviluppi futuri mireranno a migliorare sia le potenzialità, permettendo a più utenti diversi di connettersi in remoto condividendo contemporaneamente lo stesso ambiente virtuale, sia la modularità e l'espandibilità migrando sotto un'unica piattaforma tecnologica.

Per quanto riguarda la parte grafica, le librerie Java3D [21] sostituiranno le librerie OpenGL e Plib, il Java sostituirà il C++ e la parte di riguardante il calcolo del campo vettoriale sarà integrata in un sistema distribuito che si appoggerà alla tecnologia Jini [22]; distribuire il sistema permetterà di svincolare la parte di visualizzazione vera e propria da quella dei calcoli della simulazioni e soprattutto consentirà di aggiungere più facilmente servizi aggiuntivi (ad esempio la visualizzazione di isosuperfici). Infine, la parte di gestione dei campi vettoriali, adesso integrata nel programma, si appoggerà ad un database gestito mediante le librerie JDBC [23].

I vantaggi di avere un sistema distribuito con Jini, invece che un sistema totalmente centralizzato come l'attuale, saranno principalmente tre:

- **Modularità:** sarà possibile interconnettere, in modo assolutamente immediato e trasparente all'utente, nuovi servizi/moduli al sistema.
- **Semplicità:** tutto il software sarà interamente ad oggetti e scritto in un unico linguaggio di programmazione (Java); inoltre, con Jini, è ridotta al minimo la parte che il programmatore deve dedicare per progettare il sistema distribuito, a differenza di altre tecnologie come CORBA e RMI.
- **Affidabilità:** Jini garantisce che il fallimento di uno dei moduli che compongono il sistema non pregiudichi il comportamento globale.

## 5. Conclusioni

L'articolo rivede ed analizza le motivazioni principali che giustificano il sempre più frequente abbinamento realtà virtuale visualizzazione scientifica e le principali discipline nelle quali tale connubio trova larga applicazione.

In particolare, l'attenzione si focalizza sulle problematiche legate alla visualizzazione di campi vettoriali prodotti da simulazioni di Computational Fluid Dynamics sia mediante la tradizionale rappresentazione a vettori 3D sia mediante il tracciamento di particelle (pathline, streakline e timeline). L'articolo presenta un ambiente virtuale orientato alla visualizzazione dei flussi basato sul paradigma della Desktop Virtual Reality, ovvero della realtà virtuale ottenuta visualizzando la scena su di un monitor di una workstation grafica o di un PC con scheda video accelerata; il software permette all'utente di essere immerso in una galleria del vento virtuale in cui appositi aiuti permettono di navigare senza mai perdere l'orientamento. Mediante un menù tridimensionale ad-hoc l'utente può caricare e manipolare modelli 3D e campi vettoriali; inoltre, è possibile comandare due avatar che forniscono due punti di vista differenti. La visualizzazione stereoscopica permette di ottenere un senso di realismo e di immersione nell'ambiente amplificato e questo permette una migliore comprensione dei dati ottenuti dalle simulazioni. Le simulazioni possono essere controllate mediante un apposito pannello che consente evoluzioni passo passo come pure ripetizioni continue.

## 6. Ringraziamenti

Il lavoro presentato in questo articolo è stato sviluppato nell'ambito di una tesi svolta presso il Politecnico di Torino dall'ing. Igor Stoppa che gli autori desiderano ringraziare per la stesura del codice e la collaborazione allo studio delle idee guida che hanno contraddistinto lo sviluppo del medesimo.

## 7. Bibliografia

- 1 Brooks, F.P. Jr. What's Real About Virtual Reality. IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 19, No. 6, pp. 16-27, 1999.
- 2 Cruz-Neira,, C., Sandin, D.J. and DeFanti, T.A. Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality. Proceedings Siggraph, pp. 135-142, 1993.
- 3 Waterworth, J. A., Survey of Medical Applications of Virtual Reality, Web version: July 1998. Print version: Dept of Informatics Research Report #9802, October 1998.
- 4 Wolf-D. Ihlenfeldt, W.D., Virtual Reality in Chemistry, Computer-Chemie-Centrum, University of Erlangen-Nürnberg, Nögelsbachstraße 25, D-91052 Erlangen, Germany.
- 5 Zyda, M., Darken, R.P., The naval Postgraduate School's moves curriculum, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 18, No. 3, pp. 8-11, 1998.
- 6 Delaney, B., This is not a game, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 20, No. 1, pp. 6-9, 2000.
- 7 Ende, am B.A., 3D Mapping of Underwater Caves, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 21, No. 2, pp. 14-20, 2001.
- 8 Delaney, B., Faster, better, cheaper – NASA visualizes the solar system, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 17, No. 6, pp. 10-15, 1997.
- 9 Shell J. and Shochet, J., Designing Interactive Theme Park Rides, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 21, No. 4, pp. 11-13, 2001.
- 10 Berta, J., Integrating VR and CAD, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 19, No. 5, pp. 14-19, 1999.

- 11 Schulz, M., Reuding, T., Ert, T., Analyzing engineering simulations in a virtual environment, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 18, No. 6, pp. 46-52, 1998.
- 12 Jayaram, S., Jayaram, U., Wang, Y., Tirumali, H., VADE: a virtual assembly design environment, IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 19, No. 6, pp. 44-50, 1999.
- 13 Fischer, B. et al. Virtual Reality and Ancient Rome: The UCLA Cultural VR Lab's Santa Maria Maggiore Project. Virtual Reality in Archaeology , J.A. Barcelo, M. Forte, and D. Sanders, eds., BAR International Series 843, Oxford, pp. 155-162, 2000.
- 14 Miller, P. and Richards, J. The Good, the Bad, and Downright Misleading: Archaeological Adoption of Computer Visualization. Computer Applications in Archaeology, J. Hugget and N. Ryan, eds., British Archaeology Reports (Int. Series, 600), Oxford, pp. 19-22, 1994.
- 15 Nielson, G.M., Hagen, H. and Müller, H. Scientific Visualization. IEEE Computer Society, Los Alamitos, California, 1997.
- 16 Saffman, P.G. Vortex Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- 17 Lane, D.A. Visualization of Time-Dependent Flow Fields. In IEEE Visualization'93 Proceedings. pp. 32-38, 1993.
- 18 A. Sanna, B. Montrucchio, R. Arina and L. Massasso, A 3D Fluid-Flow Visualizer for Entry Level Computers, WSCG'99 The 7-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media'99, pp. I249-I256.
- 19 Woo, M.m Neider, J., Davis, T., Shreiner, D., OpenGL(R) Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 1.2, ed. OpenGL Architecture Review Board, Addison-Wesley Pub Co.
- 20 PLIB: A Suite of Portable Game Libraries. <http://plib.sourceforge.net/>
- 21 Java 3D API. <http://java.sun.com/products/java-media/3D/>
- 22 Edwards, W.K., Core Jini, 2nd edition, December 2000, Prentice Hall PTR.
- 23 JDBC Data Acces API. <http://java.sun.com/products/jdbc/>