

Comportamientos en simulación de multitudes: revisión del estado del arte

Oriam De Gyves¹, Leonel Toledo¹ y Isaac Rudomín²

¹ Tecnológico de Monterrey, Campus Estado de México,
México

² Barcelona Supercomputing Center,
Barcelona, España

Resumen Las grandes aglomeraciones de peatones son un fenómeno muy común en la actualidad y han sido estudiadas por diferentes investigadores. La simulación de multitudes es un tema de investigación que surge para poder reproducir este fenómeno y poder aprovecharlo para diferentes aplicaciones. En este trabajo se identifican los problemas que existen en la simulación de multitudes en tiempo real, específicamente los relacionados con los comportamientos de los agentes virtuales, y cómo estos han sido abordados por la comunidad científica. El propósito de este artículo es el de proveer a los investigadores con información relevante y del estado del arte en la simulación de multitudes.

Palabras clave: modelación, comportamiento de multitudes.

1. Introducción

El uso de aplicaciones para la simulación de multitudes está creciendo rápidamente [1], de la industria del entretenimiento a la planificación urbana y la seguridad pública, los gobiernos y las industrias privadas cada vez están más interesados en los posibles usos de esta área de investigación.

Películas como *El Señor de los Anillos*, *Avatar* y *Guerra Mundial Z* hacen uso extensivo de técnicas desarrolladas en la simulación de multitudes, como se puede ver en la Figura 1. En las escenas de acción de gran presupuesto de estas películas, miles de personajes complejos interactúan entre si y con su entorno, logrando una sensación de inmersión mas profunda en los espectadores. De igual manera, la simulación de multitudes también se ha utilizado en la industria de los videojuegos con el fin de lograr escenas más realistas y llenas de vida [3-5].

Gobiernos alrededor del mundo están tratando de utilizar este tipo de simulaciones para planificar sus ciudades, asegurando que la infraestructura sea suficiente para las necesidades de la población. Prototipos de nuevos avances tecnológicos, como las ciudades inteligentes donde coches autónomos interactúan con los peatones en un ambiente seguro son desarrollados y probados utilizando aplicaciones para la simulación de multitudes [6].

Este tipo de tecnología también es usada para la seguridad pública, en lugares y situaciones donde densos grupos de personas se ven involucradas, como se



Figura 1. Escena de la película *Guerra Mundial Z* con un uso intensivo de simulación de multitudes. Referencia original de [2].

observa en la Figura 2. El gobierno puede hacer uso de la simulación de multitudes con el fin de prevenir situaciones de desastre en actos públicos, aeropuertos y pasos subterráneos [8–14].

El objetivo principal en el estudio y simulación de multitudes es representar con precisión grupos de personajes autónomos, llamados agentes virtuales, con reglas y entornos lo más cercanos a aquellos encontrados en la vida real. Entre los objetivos también se encuentra el generar algoritmos optimizados capaces de producir visualizaciones en tiempo real, lo que significa que la frecuencia de fotogramas debe ser de al menos 30Hz.

El número de personajes que constituyen una multitud varía en los diferentes trabajos de investigación, sin embargo, los investigadores a menudo tratan de aumentar el número tanto como sea posible, desde unos pocos cientos hasta millones, manteniendo la meta de visualizaciones en tiempo real [15].

A pesar de que el problema de la simulación de multitudes lo han estudiado especialistas en gráficas computacionales, muchas áreas se han sumado para crear simulaciones cada vez mas complejas. Físicos y especialistas en Inteligencia Artificial (IA), entre otros, han creado modelos para simular grandes cantidades de agentes virtuales.

En las páginas siguientes, varios artículos y algoritmos para simular comportamientos realistas para multitudes se presentan, desde las primeras simulaciones de Reynolds con agentes reactivos, hasta agentes capaces de formar lazos sociales.



Figura 2. Multitud de peatones en lugares públicos. Referencia original de [7].

2. Trabajo existente

Diversidad visual, animación de personajes, cantidad de personajes, inteligencia artificial y la planificación de rutas son problemas comunes que los investigadores tratan de resolver en las simulaciones de multitudes [16].

El área de la simulación de multitudes ha sido estudiada por investigadores a niveles microscópico [17] y macroscópico [18]. Las simulaciones macroscópicas están enfocadas en el movimiento realista de la multitud como un todo, por otro lado, las simulaciones microscópicas se centran en el movimiento real de los individuos [19].

Comúnmente, los grupos de investigación crean sistemas propios para sus continuos avances en la simulación de multitudes [16, 20–23]. En las siguientes páginas se presentan un conjunto de trabajos destacados en el área.

2.1. Comportamientos de dirección

A pesar de que su investigación no se centra en peatones, Craig Reynolds presentó uno de los primeros trabajos de investigación que se centró en los grupos de agentes virtuales autónomos y sus comportamientos en 1987 [24]. La principal inspiración de Reynolds son las bandadas de aves ya que, como el autor describe, el concepto es simple pero visualmente complejo.

Según las investigaciones de Reynolds, un pájaro es consciente de tres elementos durante el vuelo, si mismo, dos o tres vecinos cercanos, y el resto de la bandada. Estos son importantes porque permiten a las aves formar parte de un grupo, independientemente del número de aves en el mismo.

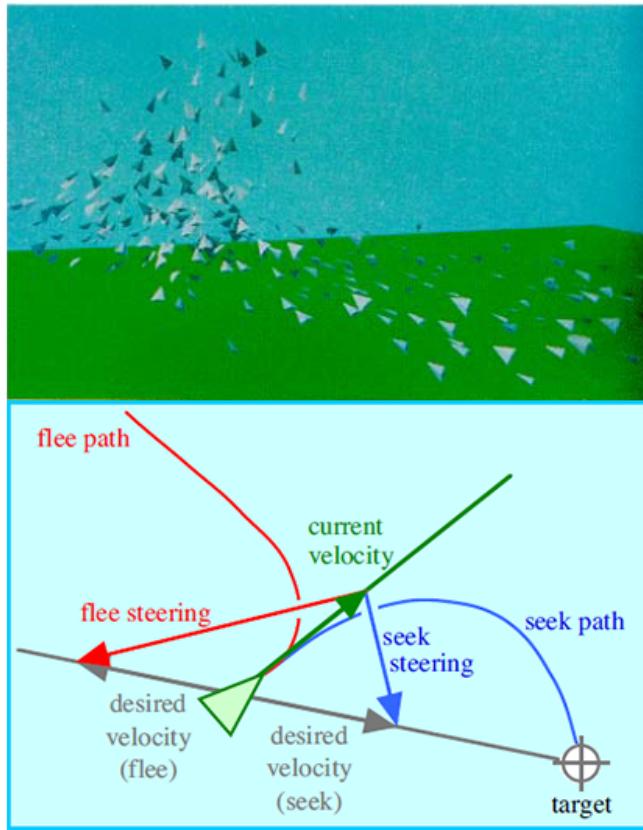


Figura 3. La imagen de arriba representa el resultado de los primeros *boids*, referencia original de [24]. La imagen de abajo muestra los comportamientos *seguir* y *huir*, referencia original de [25].

Para simular una bandada de aves, Reynolds hace uso de tres reglas simples, *separación*, *alineación* y *cohesión*, por orden de importancia. Reynolds acuña el término *boids*, para referirse a los agentes que siguen sus reglas de movimiento.

En 1999 Reynolds publica los avances de su investigación, donde describe reglas adicionales de navegación para los agentes autónomos en un mundo virtual [25]. El objetivo es que los agentes se muevan *de manera vivaz e improvisada*. Nombra estas reglas como comportamientos de dirección (*steering behaviors* en inglés). Los comportamientos presentados en estos trabajos son descritos como

bloques de construcción, que se pueden combinar con el fin de obtener patrones más complejos de comportamientos. Los resultados de los trabajos de Reynolds pueden verse en la Figura 3.

Se considera un comportamiento reactivo a todas aquellas acciones que son desencadenadas mediante un evento, es decir mientras no se registre ningún estímulo del ambiente o incluso de algún otro agente involucrado en la simulación, los agentes que pertenezcan a la categoría reactiva no tienen ninguna razón para reaccionar.

Millan et al. genera máquinas de estado finitas desde archivos XML y las guarda en imágenes que los agentes pueden consultar [15]. Pelechano y Badler han combinado reglas de percepción y comportamientos reactivos para dirigir agentes en entornos virtuales [26]. Aunque simples los comportamientos reactivos, si son implementados correctamente pueden tener como consecuencia comportamientos emergentes que pueden generar simulaciones más realistas.

Una simulación basada en reglas que no requieren razonamiento complejo debido a que el medio ambiente es el responsable de seleccionar la mejor acción de los agentes a seguir en diferentes situaciones es presentada en 2011 [19]. Se han combinado predicciones de espacio-tiempo, comportamientos reactivos, y movimientos de dirección en plataformas dedicadas a la simulación de multitudes [23].

2.2. Búsquedas de proximidad

Para simular cómo los humanos resuelven las colisiones con mayor precisión, cada agente tiene que estar al tanto de un entorno dinámico y adaptar su trayectoria continuamente. En escenarios reales, los peatones dentro de una multitud tienen que encontrar su camino a través de otros individuos. En simulaciones de multitudes, los agentes deben ser conscientes de obstáculos dinámicos y otros agentes en el entorno.

Un algoritmo ingenuo de búsqueda de vecinos tiene una complejidad de $O(n^2)$, donde n es el número de agentes. Esto significa que cada agente tiene que consultar a todos los otros agentes por su posición y otra información importante. Estructuras de datos especiales surgieron para tratar de resolver este problema, reducir la complejidad de las búsquedas de proximidad y permitir simulaciones de grandes multitudes.

En las estructuras jerárquicas, como los *octrees*, el espacio se subdivide en varias regiones que contienen agentes [27]. Algunos autores utilizan árboles *kd* para que consultar a los vecinos más cercanos sea un proceso más eficiente [28], [29]. Hay implementaciones en paralelo de árboles *kd* tanto en la unidad de procesamiento central (CPU) [30] como en el procesador gráfico (GPU) [31].

Bleiweiss presentó una implementación en paralelo de una biblioteca popular para evasión de colisiones, obteniendo un aumento de velocidad de 4.8X en comparación con la implementación original [32]. En la versión paralela, los autores también cambiaron el método de búsquedas de proximidad de un árbol *kd* a un método basado en hash con el fin de mejorar el rendimiento en el GPU.

Una estructura de datos topológica de resolución múltiple para la búsqueda de vecinos, que codifica la información para cada agente en una estructura celular fue presentado por Jund et al. [33]. Cada agente consulta sólo las celdas adyacentes en la búsqueda de sus vecinos, lo que reduce el número de cálculos de distancia. Passos et al. almacena a los agentes dentro de una matriz ordenada y usa una técnica de vecindario extendido de Moore (*extended Moore neighborhood* en inglés) para encontrar vecinos [34].

Manocha et al. presentó una técnica que se basa tanto en la localización geométrica como en consultas de proximidad basadas en imágenes para encontrar vecinos [35]. Los autores toman muestras de la geometría, hacen la rasterización de los objetos de interés y tratan los píxeles sobrescritos como intersecciones. Millan et al. propuso una técnica basada en imágenes en la que cada agente pinta un área de influencia en su posición de que otros agentes lean para moverse a través del entorno [15].

Mediante el uso de diagramas de Voronoi, el grupo GAMMA calcula mapas de distancia de superficie para cada agente, que codifica la distancia con los vecinos más cercanos [36]. Estos mapas se utilizan tanto para las búsquedas de proximidad como en la planificación de rutas. El mismo grupo de investigación ha utilizado diagramas de Voronoi de primero y segundo orden para las búsquedas de proximidad en otros trabajos [37, 38].

2.3. Evasión de colisiones y planeación de rutas

La planeación de rutas tiene el objetivo de obtener el mejor camino desde un punto de origen a un destino. Cuando el ambiente tiene obstáculos dinámicos se requiere además de un sistema que evalúe constantemente nuevos caminos libres de colisión. Contrario a la evasión de colisiones, comúnmente la planeación de rutas no se realiza en cada paso de la simulación.

Chenney propone una técnica para la representación y el diseño de campos de velocidad usando autómatas celulares en 2004 [39]. Los campos de velocidad creados usando esta técnica son útiles para crear movimientos de flujo, que son seguidos por los peatones con el fin de moverse a través de un entorno. En 2011 Zhang et al. presenta un modelo en el que las celdas de un autómata celular representan posiciones discretas en el espacio, utilizadas por los peatones para moverse al cambiar de una celda a otra [40].

Hubert hace uso de autómatas celulares en la simulación de grandes eventos [41]. En este modelo, las celdas también son una representación discreta del espacio geográfico en el que los agentes son capaces de moverse, aunque representan un área en lugar de ranuras disponibles, por lo que los agentes pueden moverse a través de ellas, no solo de una a otra.

Treuille y Popović presentan el modelo *Continuum Crowds* en 2006, en el cual unifican la planeación de rutas y la evasión de colisiones utilizando campos potenciales y de velocidad para guiar a los agentes virtuales [42]. En este modelo se logran conseguir simulaciones en tiempo real, movimiento uniforme y comportamientos emergentes.

En 2009 Fischer et al. utiliza campos potenciales para permitir que los agentes negocien el espacio, evitar colisiones y alcanzar sus metas [43]. El algoritmo es una versión paralela de una técnica anterior de los mismos autores [44]. La aplicación se realizó en el GPU utilizando la plataforma *Compute Unified Device Architecture* (CUDA) de Nvidia, teniendo cuidado especial para reducir el número de transacciones de memoria entre CPU y GPU.

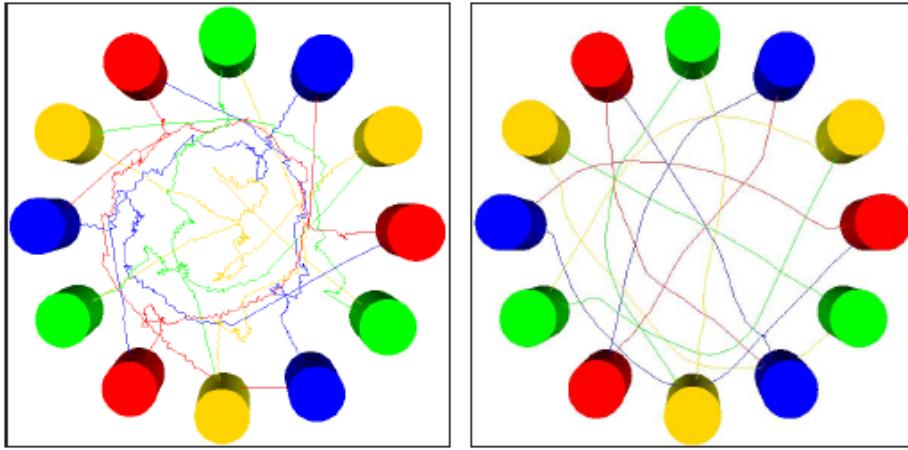


Figura 4. A la izquierda una simulación utilizando el algoritmo VO. A la derecha el algoritmo RVO. Referencia original de [28].

Guy et al. presenta un método que calcula trayectorias, reduciendo al mínimo el esfuerzo que los agentes necesitan llevar a cabo con el fin de llegar a su destino [29]. El algoritmo es capaz de evitar colisiones con otros agentes y los obstáculos, al tiempo que permite simulaciones en tiempo real.

Fiorini y Shiller introducen el término *Velocity Obstacles* (VO), una técnica geométrica para detectar objetos que chocan en el futuro con sus velocidades, asumiendo esas velocidades no cambian [45]. VO es el conjunto de todas las velocidades que conducirán eventualmente a dos agentes a una colisión, por lo que éstos deben elegir velocidades que no sean elementos del conjunto. El algoritmo genera caminos libres de colisión, pero con un gran número de oscilaciones, que hacen al movimiento poco natural.

En 2008 van den Berg et al. amplía la idea previa en *Reciprocal Velocity Obstacles* (RVO) [28]. Hay dos adiciones principales a la algoritmo de Fiorini; las oscilaciones en las rutas se eliminan mediante el supuesto que otros agentes se están dirigiendo utilizando las mismas reglas y dividiendo el esfuerzo entre todos los agentes involucrados como puede observarse en la Figura 4; además de un método para indicar la cantidad que un agente debe desviarse de su trayectoria original cuando detecta otros agentes en su camino. De esta manera crean las prioridades de movimiento para la simulación de agentes con diferentes rangos.

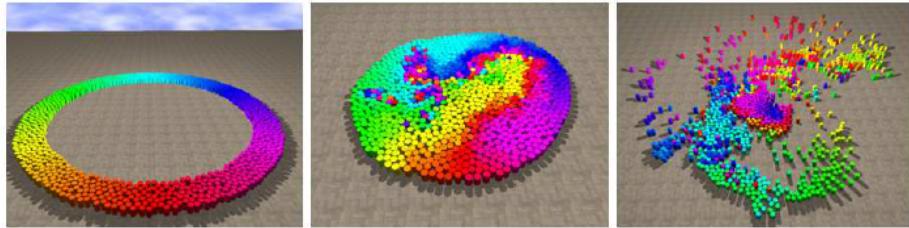


Figura 5. En la prueba, los agentes tienen que moverse a la posición opuesta de donde comienzan en el círculo. Referencia original de [46].

El mismo grupo de investigación de van den Berg amplía aún más el algoritmo de RVO, reduciendo el problema a un programa lineal de baja dimensión [46]. Mediante el uso de este algoritmo, los autores fueron capaces de simular miles de personajes, aún en CPU. En la Figura 5 se observa una prueba con 1,000 agentes en tiempo real.

Thalmann et al. presenta un sistema de navegación interactiva para multitudes en 2013 [47]. Su sistema permite a un usuario seleccionar un *avatar* de entre la multitud y controlar su movimiento a través del entorno virtual, por medio de una interfaz natural que captura los movimientos del usuario.

2.4. Comportamientos sociales

En 1995 Helbing y Molnár presentaron el modelo de fuerzas sociales, el cual se refiere a aquellas fuerzas que no se obtienen directamente del ambiente en el que se encuentran los peatones, sino que representan sus motivaciones internas para realizar determinadas acciones, tomando en cuenta algunos estímulos del medio [48]. El proceso psicológico y mental es la etapa en la que se evalúan las entradas del medio ambiente para que los agentes puedan tomar una decisión. La velocidad de los peatones se modifica para reflejar las decisiones tomadas durante esa etapa.

La investigación señala que existen dos clasificaciones principales de los estímulos, situaciones simples o conocidas y situaciones complejas o nuevas. El primer tipo de estímulo puede ser modelado por medio de fuerzas sociales, mientras que para el segundo los autores sugieren el uso de modelos probabilísticos. Aunque este modelo se aplica mejor a situaciones simples o previamente conocidas por los peatones, se afirma que los peatones normalmente se enfrentan a situaciones a las que ya están acostumbrados.

Helbing et al. estudia las diferencias entre las situaciones normales y de pánico para las simulaciones de multitudes [17]. En situaciones normales, los peatones tratan de seguir la ruta de menor esfuerzo hacia su destino e intentan mantener una velocidad deseada a lo largo del recorrido, además de conservar un espacio entre ellos y otros peatones y obstáculos. Por otro lado, en situaciones de pánico y a medida que aumenta el nerviosismo, los peatones tratan de moverse mucho

más rápido y la distancia entre las personas se reduce hasta el punto en que los peatones comienzan a empujarse unos a otros. Estas reacciones conducen a una falta de coordinación, donde el escape se ralentiza por cuellos de botella. Otra diferencia importante es que las personas tienden a mostrar un comportamiento de manada en situaciones de pánico, que es cuando la gente hace lo que hacen los demás, por lo general haciendo caso omiso de las rutas y salidas alternativas.

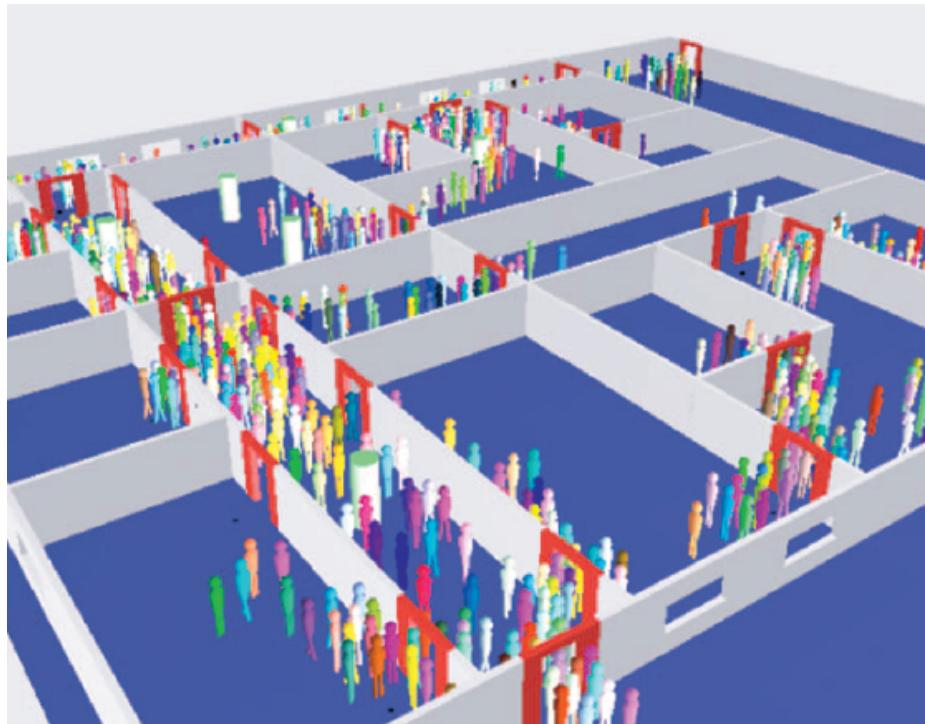


Figura 6. Líderes guían a otros agentes a las salidas en simulaciones de desastres. Referencia original de [49].

Una simulación de multitudes basada en teorías psicológicas es propuesta por Beltaief et al. en 2011 [50]. Los factores psicológicos que consideran importantes para tener simulaciones precisas son el psico-físico (percepción y velocidad) y psico-social (objetivos y preferencias). Usando los dos factores psicológicos, los autores dividen el comportamiento peatonal en tres fases: estratégica, táctica y operativa.

La fase estratégica se ocupa de la interacción con el medio ambiente, sin tener en cuenta a los otros agentes y su objetivo principal es guiar a los peatones a su objetivo. En la fase táctica, los agentes resuelven el problema de evasión de

colisiones e interactúan entre si. En la fase operativa, los agentes determinan su dirección y la velocidad con la información de las etapas anteriores.

Para incrementar el nivel de realismo al realizar simulaciones sobre multitudes la comunicación entre los agentes involucrados es fundamental, ya que de esta manera, los comportamientos se vuelven más complejos y surgen comportamientos emergentes. El realismo de la simulación se ve beneficiado al incorporarse un modelo de comunicación ya que los agentes pueden cooperar para resolver alguna tarea específica o ayudarse entre todos para buscar algún tipo de recurso.

Pelechano y Badler proponen un modelo de comunicación y roles para los agentes [51]. Su sistema describe a los agentes, sus acciones y los resultados esperados al incorporar los roles de comunicación, además de proveer motivaciones, estrés, emociones, personalidad y decisiones. De esta forma es posible tener un sistema de alto nivel que se adapte a diversas situaciones, por ejemplo, permitir explorar ambientes desconocidos y encontrar una salida [26, 49].

2.5. Interacción de grupos

El hacer que la gente camine en grupos tiene dos objetivos principales, el primero y el más obvio es mejorar la calidad de la simulación. Observando a la gente en la calle, o en casi cualquier otro espacio abierto, la mayoría de las personas caminan en pequeños grupos. El segundo objetivo tiene implicaciones interesantes ya que es posible reducir el tiempo de procesamiento para el mismo número de agentes.

Durante el año 2010, Moussaid et al. analiza el movimiento de aproximadamente 1,500 grupos de peatones y señala que las multitudes son conformadas principalmente por grupos de personas que viajan juntas [52]. La mayoría de los trabajos de investigación en torno a la simulación de multitudes toma en cuenta sólo a individuos aislados. En situaciones reales hasta el 70 % de los peatones que constituyen un multitud se mueven en grupos, como amigos y familiares. Normalmente los grupos son de tamaño pequeño, con dos a cuatro miembros como los tamaños más frecuentes, mientras que los grupos más grandes son raros. Los grupos más grandes tienden a tener velocidades más bajas que los grupos de menor tamaño.

Los autores muestran que la densidad afecta a las formaciones en las que los grupos tienden a caminar. Cuando la densidad es baja en el área geográfica, miembros del grupo caminan uno a lado del otro; por otro lado, a medida que aumenta la densidad la formación lineal se dobla hacia delante convirtiéndose en un patrón semejante a una V, como se puede ver en la Figura 7. Estas formaciones están estrechamente relacionadas con las interacciones sociales, debido a que los miembros de un grupo tratan de mantener la comunicación entre sí.

El siguiente modelo matemático, presentado por Moussaid et al. incluye fuerzas sociales para mantener unido al grupo:

$$\mathbf{f}_i^{grupo} = \mathbf{f}_i^{vis} + \mathbf{f}_i^{atr} + \mathbf{f}_i^{rep}$$

donde \mathbf{f}_i^{grupo} representa la respuesta del peatón i a otros miembros del grupo, \mathbf{f}_i^{vis} es la fuerza que mantiene a los miembros del grupo en el campo de visión,

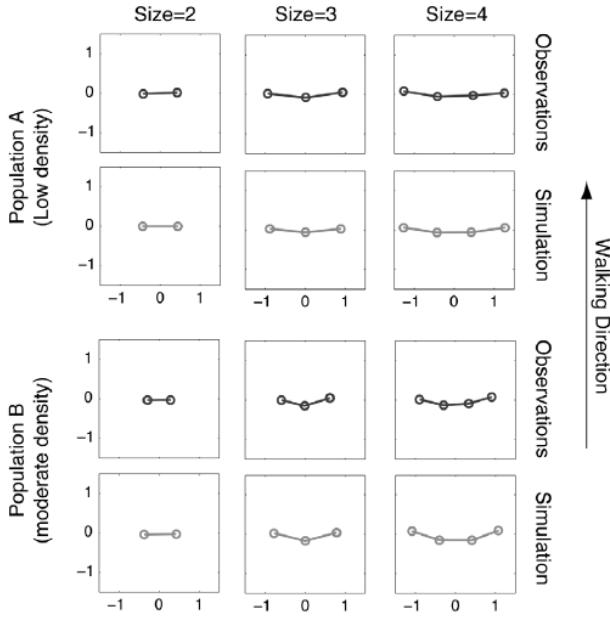


Figura 7. Patrones de organización de los grupos dependiendo de la densidad geográfica. Referencia original de [52].

f_i^{atr} es un término que dirige a los agentes hacia el centro de masa del grupo y f_i^{rep} es una fuerza de repulsión para mantener a los miembros del grupo separados.

Los individuos en una multitud se comportan de manera distinta cuando se encuentran solos o cuando forman parte de un grupo. Dentro de una multitud pueden ocurrir fenómenos como la polarización, la cual ocurre cuando dos o más grupos adoptan actitudes, opiniones o comportamientos divergentes. En ese caso es bastante probable que el comportamiento entre los grupos de la multitud resulte en confrontaciones si no se llega a un acuerdo.

En algunos escenarios es posible que la multitud busque oponentes. Un modelo dedicado a describir comportamientos grupales usando las relaciones intrínsecas de los elementos de dicho grupo es presentado en el trabajo de Thalmann [53]. Este modelo permite a los agentes reaccionar únicamente en la presencia de otros, por ejemplo cuando dos agentes se encuentran es posible evaluar los perfiles físicos y fisiológicos de cada uno y de los agentes a su alrededor; si resultan en un patrón similar, es probable que caminen juntos.

El anterior modelo incluye diferentes parámetros que son ajustables para los diversos grupos, además de ser posible establecer metas que cada grupo debe alcanzar. Otro de los parámetros que el modelo considera es el nivel de dominancia de cada grupo y finalmente el estado de ánimo. El estado de ánimo puede ser modificado si dos agentes se encuentran en un proceso aleatorio. Si un evento

como este ocurre, uno o varios agentes pueden ser seleccionados dependiendo del valor de dominancia y el resto de los agentes tendrá que disminuir su estado emocional. Thalmann concluye en que el comportamiento basado en las relaciones que existen dentro de los grupos de una multitud determinan el comportamiento general ésta, sin embargo, el modelo considera pocos parámetros de naturaleza sencilla, además de que se encuentra enfocado a multitudes genéricas.

La mayoría de los investigadores concuerdan en que es importante considerar la interacción de los grupos dentro de una multitud. Es por esta razón que se deben considerar protocolos de comunicación y sistemas que calculen colisiones, lo que puede ser un cuello de botella importante si no se aborda de forma adecuada. Muchos modelos se aseguran de optimizar esta etapa lo más posible [54].

Una estructura jerárquica para el manejo de grupos es presentado en 2010 [55]. Los autores proponen el uso de una base de datos de control, que es accesible por cada grupo y que se encarga del balanceo de estos cuando es necesario durante la simulación. Los autores utilizan un enfoque de líder-seguidor, existiendo un solo líder por grupo para el control de los agentes seguidor. Cuando se detecta una situación en el medio ambiente, las acciones se toman por grupo, no por individuo.

La teoría de la utilidad y la teoría de la comparación social han sido utilizadas para simular la dinámica de grupos [56]. Una desventaja de este enfoque es que no consideran que un grupo está formado por agentes que comparten un vínculo, como amigos o familiares, sino por agentes que comparten objetivos. La teoría de utilidad la emplean los agentes para unirse a un grupo con metas afines, mientras que la teoría de comparación social es utilizada para elegir a un miembro del grupo a seguir.

Park et al. presenta un sistema para simular miles de peatones en tiempo real con comportamientos sociales en 2012 [57]. Los grupos simulados en este trabajo están socialmente relacionados, es decir, constan de familiares y amigos. Los resultados muestran personajes en constante comunicación y exhiben muestras de comportamientos como esperar a otros miembros del grupo, grupos que se dividen y se reúnen y conversaciones entre los agentes.

3. Conclusión

El área de investigación de simulación de multitudes está en constante evolución y el número de disciplinas que cooperan con sus objetivos va en aumento. Este trabajo se ha centrado en el esfuerzo de la comunidad científica para generar los comportamientos de peatones con el fin de lograr simulaciones más realistas, pero también permitiendo una velocidad de fotogramas en tiempo real.

A pesar de que el uso del cómputo general en hardware gráfico (GPGPU) es relativamente nuevo, ya hay grupos de investigación que han diseñado nuevas técnicas para adherirse a la nueva tecnología. Muchas de estas técnicas permiten el desempeño eficiente de algoritmos que en arquitecturas secuenciales no lograrían tiempo real en las simulaciones.

Es evidente que los avances en la tecnología, específicamente en los procesadores gráficos, permiten a los investigadores escalar sus proyectos. El esfuerzo conjunto de estos proyectos tiene gran impacto en muchas áreas de la vida cotidiana.

Referencias

1. Wang, X., Zhang, J., Scalia, M.: Parallel Motion Simulation of Large-Scale Real-Time Crowd in a Hierarchical Environmental Model. *Mathematical Problems in Engineering* **2012** (2012) 1–15
2. Forster, M.: World War Z (2013)
3. Groenewegen, S.: Improving crowd behaviour for games and virtual worlds. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on the Foundations of Digital Games - FDG '10*, New York, New York, USA, ACM Press (2010) 256–258
4. Wißner, M., Kistler, F., André, E.: Level of detail ai for virtual characters in games and simulation. *Motion in Games* (2010) 206–217
5. Szymanezyk, O., Dickinson, P., Duckett, T.: From Individual Characters to Large Crowds : Augmenting the Believability of Open-World Games through Exploring Social Emotion in Pedestrian Groups. In: *Think Design Play: DiGRA Conference*. (2011)
6. Wang, D., Pedreschi, D., Song, C., Giannotti, F., Barabasi, A.L.: Human mobility, social ties, and link prediction. In: *Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining - KDD '11*, New York, New York, USA, ACM Press (2011) 1100
7. AFP: Chávez, ayatola y papa: los funerales que convocaron multitudes (2013)
8. Zhong, Z., Ding, N., Wu, X., Xu, Y.: Crowd surveillance using Markov Random Fields. In: *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*. Number September, IEEE (September 2008) 1822–1828
9. Mehran, R., Oyama, A., Shah, M.: Abnormal crowd behavior detection using social force model. In: *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Number 2, IEEE (June 2009) 935–942
10. Cao, T., Wu, X., Guo, J., Yu, S., Xu, Y.: Abnormal crowd motion analysis. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE (December 2009) 1709–1714
11. Husni, M., Suryana, N.: Crowd event detection in computer vision. In: *2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems*, IEEE (July 2010) V1–444–V1–447
12. Zweng, A., Kampel, M.: Unexpected Human Behavior Recognition in Image Sequences Using Multiple Features. In: *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, IEEE (August 2010) 368–371
13. Xiong, G., Wu, X., Chen, Y.l., Ou, Y.: Abnormal crowd behavior detection based on the energy model. In: *2011 IEEE International Conference on Information and Automation*. Number June, IEEE (June 2011) 495–500
14. Li, N., Zhang, Z.: Abnormal Crowd Behavior Detection Using Topological Methods. In: *2011 12th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*, IEEE (July 2011) 13–18
15. Millan, E., Hernandez, B., Rudomin, I.: Large Crowds of Autonomous Animated Characters Using Fragment Shaders and Level of Detail. In Wolfgang Engel, ed.: *ShaderX5: Advanced Rendering Techniques*. Charles River Media (2006) 501—510

16. Thalmann, D., Grillon, H., Maim, J., Yersin, B.: Challenges in Crowd Simulation. In: 2009 International Conference on CyberWorlds, IEEE (2009) 1–12
17. Helbing, D., Farkas, I.J., Molnár, P., Vicsek, T.: Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. *Pedestrian and evacuation dynamics* **21** (2002)
18. Lemercier, S., Jelic, A., Kulpa, R., Hua, J., Fehrenbach, J., Degond, P., Appert-Rolland, C., Donikian, S., Pettré, J.: Realistic following behaviors for crowd simulation. *Computer Graphics Forum* **31**(2pt2) (May 2012) 489–498
19. Sun, L., Qin, W.: Simulation of crowd behaviors based on event reaction. In: 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, IEEE (June 2011) 163–167
20. Luo, L., Zhou, S., Cai, W., Low, M.Y.H., Lees, M.: Toward a Generic Framework for Modeling Human Behaviors in Crowd Simulation. In: 2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, IEEE (2009) 275–278
21. Zhang, L., Song, Y., Zhou, J., Gong, J., Li, W.: The framework of crowd simulation modeling with social network. In: 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). Number Iccasm, IEEE (October 2010) V3–437–V3–441
22. Kapadia, M., Singh, S., Reinman, G., Faloutsos, P.: A Behavior-Authoring Framework for Multiactor Simulations. *IEEE Computer Graphics and Applications* **31**(6) (November 2011) 45–55
23. Singh, S., Kapadia, M., Hewlett, B., Reinman, G., Faloutsos, P.: A modular framework for adaptive agent-based steering. In: Symposium on Interactive 3D Graphics and Games on - I3D '11. Volume 1., New York, New York, USA, ACM Press (2011) 141
24. Reynolds, C.W.: Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* **21**(4) (August 1987) 25–34
25. Reynolds, C.W.: Steering behaviors for autonomous characters. In: 1999 Game Developers Conference. (1999) 763–782
26. Pelechano, N., Allbeck, J.M., Badler, N.I.: Controlling individual agents in high-density crowd simulation. In: Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH. Volume 1., San Diego, California, Eurographics Association (2007) 99—108
27. Hadap, S., Eberle, D., Volino, P., Lin, M.C., Redon, S., Ericson, C.: Collision detection and proximity queries. In: Proceedings of the conference on SIGGRAPH 2004 course notes - GRAPH '04, New York, New York, USA, ACM Press (2004) 15–es
28. van den Berg, J., Manocha, D.: Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation. In: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE (May 2008) 1928–1935
29. Guy, S.J., Chhugani, J., Curtis, S., Dubey, P., Lin, M., Manocha, D.: PLEDestrians: a least-effort approach to crowd simulation. *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (2010) 119–128
30. Choi, B., Komuravelli, R., Lu, V., Sung, H., Bocchino, R.L., Adve, S.V., Hart, J.C.: Parallel SAH k-D tree construction. *HPG '10 Proceedings of the Conference on High Performance Graphics* (2010) 77–86
31. dos Santos, A.L., Teixeira, J.M.X., de Farias, T.S., Teichrieb, V., Kelner, J.: kD-Tree Traversal Implementations for Ray Tracing on Massive Multiprocessors: A Comparative Study. In: 2009 21st International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing, IEEE (October 2009) 41–48

32. Bleiweiss, A.: Multi agent navigation on GPU. White paper, GDC (2009)
33. Jund, T., Kraemer, P., Cazier, D.: A unified structure for crowd simulation. Computer Animation and Virtual Worlds **23**(3-4) (May 2012) 311–320
34. Passos, E.B., Joselli, M., Zamith, M., Clua, E.W.G., Montenegro, A., Conci, A., Feijo, B.: A bidimensional data structure and spatial optimization for supermassive crowd simulation on GPU. Computers in Entertainment **7**(4) (December 2009) 1
35. Hoff, K.E., Zaferakis, A., Lin, M., Manocha, D.: Fast and simple 2D geometric proximity queries using graphics hardware. In: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics - SI3D '01. Volume 31., New York, New York, USA, ACM Press (February 2001) 145–148
36. Sud, A., Govindaraju, N., Gayle, R., Andersen, E., Manocha, D.: Surface distance maps. In: Proceedings of Graphics Interface 2007 on - GI '07, New York, New York, USA, ACM Press (2007) 35
37. Sud, A., Andersen, E., Curtis, S., Lin, M., Manocha, D.: Real-time Path Planning for Virtual Agents in Dynamic Environments. In: 2007 IEEE Virtual Reality Conference, IEEE (2007) 91–98
38. Sud, A., Andersen, E., Curtis, S., Lin, M.C., Manocha, D.: Real-time path planning in dynamic virtual environments using multiagent navigation graphs. IEEE transactions on visualization and computer graphics **14**(3) (2008) 526–38
39. Chenney, S.: Flow tiles. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation - SCA '04, New York, New York, USA, ACM Press (2004) 233—242
40. Zhang, S., Li, M., Li, F., Liu, A., Cai, D.: A simulation model of pedestrian flow based on geographical cellular automata. In: 2011 19th International Conference on Geoinformatics. Volume 2., IEEE (June 2011) 1–5
41. Klupfel, H.: The simulation of crowds at very large events. In: Traffic and Granular Flow'05. Springer Berlin Heidelberg (2007) 341–346
42. Treuille, A., Cooper, S., Popović, Z.: Continuum crowds. ACM Transactions on Graphics **25**(3) (July 2006) 1160
43. Fischer, L.G., Silveira, R., Nedel, L.: GPU Accelerated Path-Planning for Multi-agents in Virtual Environments. In: 2009 VIII Brazilian Symposium on Games and Digital Entertainment, IEEE (2009) 101–110
44. Dapper, F., Prestes, E., Nedel, L.P.: Generating steering behaviors for virtual humanoids using BVP control. (2007)
45. Fiorini, P., Shiller, Z.: Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles. The International Journal of Robotics Research **17**(7) (July 1998) 760–772
46. van den Berg, J., Guy, S.J., Lin, M., Manocha, D.: Reciprocal n-body collision avoidance. Robotics Research **70** (2011) 3–19
47. Wang, Y., Dubey, R., Magnenat-Thalmann, N., Thalmann, D.: An immersive multi-agent system for interactive applications. The Visual Computer **29**(5) (June 2012) 323–332
48. Helbing, D., Molnár, P.: Social force model for pedestrian dynamics. Physical Review E **51**(5) (May 1995) 4282–4286
49. Pelechano, N., Badler, N.I.: Modeling Crowd and Trained Leader Behavior during Building Evacuation. IEEE Computer Graphics and Applications **26**(6) (November 2006) 80–86
50. Beltaief, O., El Hadouaj, S., Ghedira, K.: Multi-agent simulation model of pedestrians crowd based on psychological theories. In: 2011 4th International Conference on Logistics, IEEE (May 2011) 150–156

51. Pelechano, N., O'Brien, K., Silverman, B., Badler, N.I.: Crowd Simulation Incorporating Agent Psychological Models, Roles and Communication. First International Workshop on Crowd Simulation (2005) **2**(1529-2401) (November 2005) 21–30
52. Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., Theraulaz, G.: The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics. PloS one **5**(4) (January 2010) e10047
53. Musse, S.R., Thalmann, D.: Computer Animation and Simulation '97. In Thalmann, D., Panne, M., eds.: Computer Animation and Simulation '97. Eurographics. Springer Vienna, Vienna (1997) 39–51
54. Musse, S.R., Ulicny, B., Aubel, A., Thalmann, D.: Groups and crowd simulation. In: ACM SIGGRAPH 2005 Courses on - SIGGRAPH '05, New York, New York, USA, ACM Press (2005) 8
55. He, C., Xiao, H., Dong, W., Deng, L.: Dynamic group behavior for real-time multi-agent crowd simulation. In: 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). Volume 1., IEEE (February 2010) 544–546
56. Qiu, F., Hu, X.: Modeling Dynamic Groups for Agent-Based Pedestrian Crowd Simulations. In: 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, IEEE (August 2010) 461–464
57. Park, S.I., Peng, C., Quek, F., Cao, Y.: A Crowd Modeling Framework for Socially Plausible Animation Behaviors. In Kallmann, M., Bekris, K., eds.: Motion in Games. Volume 7660 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2012) 146–157