ششمین کنفرانس بین‌المللی
«بازی‌های رایانه‌ای؛ فرصت‌ها و چالش‌ها»

«CALN : چارچوب نظری علوم استفاده‌شده در تولید رویه‌ای محتوا»

محمدرضا حجت‌الاسلامی[۱]، محمد مهدی رضاپور*[۲]

۱- کارشناسی ارشد نرم‌افزار دانشگاه اصفهان

mohammadreza.he@yahoo.com

۲- مدیر گروه علوم و فناوری‌های نوین پژوهشگاه فضای مجازی

rezapour@majazi.ir

چکیده

بازی‌های رایانه‌ای بخش عمده‌ای از سرگرمی جوانان را تشکیل می‌دهند و بازیکنان همواره به دنبال بازی‌های باکیفیت هستند. ساخت بازی‌های رایانه‌ای دارای پیچیدگی‌های مختلفی بوده و رقابت شرکت‌ها برای ایجاد محصول باکیفیت باعث افزایش پیچیدگی در تولید بازی‌ها شده است. این پیچیدگی در تولید بازی که عمده‌ی آن مربوط به ساخت محتوای بازی است، هزینه‌های تولید آن را افزایش داده و به چالشی بزرگ برای شرکت‌های بازی‌ساز تبدیل شده است. یکی از راه‌های موردتوجه محققان صنعت بازی‌های رایانه‌ای برای غلبه بر افزایش هزینه‌های تولید بازی، استفاده از روش‌های ماشینی و خودکار تولید محتوا است. این روش‌های خودکار تولید محتوا، تولید رویه‌ای محتوا (PCG) نامیده می‌شوند. در PCG روش‌های متنوعی وجود دارد که با کمک علوم و فنون مختلف، محتوا را تولید می‌کنند. آشنایی محققان با این علوم به ایجاد روش‌های خلاقانه‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر تولید محتوا کمک می‌کند. همچنین آشنایی محققان سایر حوزه‌ها با کاربرد حوزه تحقیقاتی خود در PCG آن‌ها را به تحقیق در این بخش تشویق می‌کند. در این مقاله ما یک چارچوب نظری برای علوم استفاده‌شده در PCG با نام CALN ارائه می‌دهیم. در این چارچوب علوم مختلف که در PCG مورد استفاده قرارگرفته‌اند، تشریح شده و دسته‌بندی می‌شوند. همچنین نمونه‌هایی از روش‌های رویه‌ای ایجادشده با هر علم مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌هایی از کارهای انجام‌شده با آن‌ها معرفی می‌شوند.

کلمات کلیدی: تولید رویه‌ای محتوا، بازی‌های رایانه‌ای، CALN

۱–مقدمه

بازی‌های رایانه‌ای از آغاز تولید آن‌ها تاکنون همواره با افزایش حجم محتوا روبرو بوده‌اند. بازی‌هایی که در کنسول‌های نسل اول اجرا می‌شدند، متشکل از تعدادی پیکسل[۱] رنگی بوده و برای ذخیره‌سازی این محتواهای از حافظه‌های چند بیتی استفاده می‌شد. با رشد فناوری در حوزه‌های مختلف کامپیوتر مانند گرافیک، پردازنده و ... کیفیت محتوای درون بازی‌ها ارتقاء قابل‌توجهی پیدا کرد و این محتواها از چندین پیکسل به ترکیبی از چندضلعی‌ها[۲] تصاویر، صداها و ... تبدیل شدند[۱]. این افزایش محتوا رشد هزینه‌های تولید بازی را در پی داشته و امروزه شرکت‌های بزرگ بازی‌سازی برای تولید بازی‌های خود

---

[۱] Pixel

[۲] Polygon

صدها میلیون دلار هزینه می‌کنند. برای مثال شرکت راک‌استار گیمز[۱] برای تولید بازی سرقت بزرگ خودرو ۵[۲] حدود ۲۵۶ میلیون دلار هزینه کرده است [۲]. علاوه بر افزایش هزینه‌ها، افزایش محتوا باعث افزایش فضای موردنیاز برای ذخیره‌سازی بازی شده و بسیاری از شرکت‌های بازی‌سازی نوپا، هزینه و زمان قابل‌توجهی را برای کاهش حجم بازی صرف می‌کنند. برای تولید محتوای انبوه به‌صورت مرسوم و با استفاده از افراد متخصص، نیروهای خبره نیاز است و پیدا کردن این نیروها یک چالش محسوب می‌شود. همچنین تولید محتوای بزرگ مدت‌زمان تولید پروژه را افزایش می‌دهد و این امر ممکن است موجب شکست پروژه و زیان شرکت‌های بازی‌ساز شود[۳].

در دهه‌ی اخیر تحقیقات فراوانی برای تولید تمام محتوا یا بخشی از آن به‌صورت خودکار با استفاده از روش‌های موجود در حوزه‌های مختلف علوم کامپیوتر انجام شده و نتایج مطلوبی داشته است. برای مثال با استفاده از یادگیری ماشین می‌توان محتوای بازی را متناسب با رفتار بازیکن و به‌صورت خودکار ایجاد کرد[۴]. با استفاده از نتایج این تحقیقات، بجای به‌کارگیری تخصص‌های مختلف مانند برنامه‌نویس، صداگذار، طراح و ... در تولید بازی، می‌توان بیشتر از متخصصین هوش مصنوعی و علوم کامپیوتر استفاده نمود تا با ایجاد مولدهای[۳] مختلف محتوا، نیاز به‌کارگیری تخصص‌های مختلف را کاهش دهند و چالش‌های مذکور را برطرف کنند[۵]. تولید خودکار محتوا با استفاده از روش مذکور، در حوزه بازی‌های رایانه‌ای با نام تولید رویه‌ای محتوا (PCG)[۴] شناخته می‌شود. در روش‌های رویه‌ای تولید محتوا، محتوا با استفاده از الگوریتم‌ها و فرآیندهای کامپیوتری به‌صورت خودکار ایجاد می‌شود و نیروی انسانی دخالت بسیار کمی در تولید محتوا دارد. برای پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها محققین از الگوریتم‌های تکاملی، شبکه‌های عصبی، یادگیری ماشین، دستور زبان و ... استفاده می‌کنند تا نرم‌افزار، توانایی ایجاد تولید خودکار بازی یا بخشی از بازی را پیدا کند[۵].

روش‌های رویه‌ای تنوع گسترده‌ای دارند و از ساده‌ترین و پیچیده‌ترین روش‌های موجود در هوش مصنوعی و علوم کامپیوتر در آن‌ها استفاده می‌شود. برای مثال در برخی موارد از ساختارهای خود–مانند[۵] مانند برخال[۶] برای تولید محتوا استفاده می‌شود[۶] و در موارد دیگر روش‌های پیچیده موجود در یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرند[۴]. آشنایی محققان با این روش‌ها به ایجاد راه‌های متنوع تولید محتوا کمک کرده و دست آن‌ها را برای ایجاد روش‌های خلاقانه مختلف بازتر می‌کند. همچنین این آشنایی محققان حوزه‌های مختلف را به تحقیق در مورد کاربرد حوزه تحقیقاتی خود در PCG یا بلعکس تشویق می‌کند. برای نمونه PCG می‌تواند در ایجاد محیط‌های یادگیری برای عامل‌های هوش مصنوعی مفید باشد[۷]. در این مقاله ما به بررسی PCG و ابعاد مختلف آن پرداخته و محتواهای قابل‌تولید با آن را معرفی می‌کنیم. در ادامه با توجه به گستره‌ی علوم کاربردی در PCG چارچوبی نظری برای علوم استفاده‌شده در آن با نام CALN[۷] ارائه می‌دهیم که در آن علوم استفاده‌شده در PCG دسته‌بندی می‌شوند. در ادامه علوم موجود در چارچوب CALN تشریح شده و چندین نمونه از تحقیقاتی که در PCG با کمک این علوم انجام شده، معرفی می‌گردد. در انتها با توجه به یافته‌های این تحقیق، پیشنهادهایی برای محققان و فعالین صنعت بازی‌های رایانه‌ای ارائه می‌شود.

۲– تولید رویه‌ای محتوا

تولید رویه‌ای محتوا به زبان ساده تولید الگوریتمی و خودکار محتوای بازی با ورودی غیرمستقیم محدود است[۸]. در این روش الگوریتم‌هایی وجود دارند که محتوایی از بازی را بدون کمک یا با حداقل کمک انسانی، ایجاد می‌کنند[۵]. برای مثال با کمک الگوریتم ژنتیک می‌توان سیاه‌چال ایجاد یا با استفاده از شبکه‌های پیچیده داستان بازی را ایجاد نمود. سابقه

---

[۱] Rockstar Games
[۲] Grand Theft Auto V
[۳] Generator
[۴] Procedural Content Generation
[۵] Self-similar
[۶] Fractal
[۷] Computer science-Artificial intelligence- Linguistics - Network science

استفاده از PCG به اواخر دهه هفتاد میلادی بازمی‌گردد. در آن سال‌ها بازی‌هایی مانند اکلاباث: دنیای هلاکت[۱]و بنیا اپل منر[۲]از PCG برای تولید خودکار مرحله استفاده می‌کردند[۹]. در دهه اخیر PCG مورد اقبال محققان قرار گرفته و آن‌ها در حوزه‌های مختلف PCG را مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند. بر اساس تحقیقات تاگلیوس[۳]و همکاران PCG روش‌های تولید محتوا از شش بعد با یکدیگر متفاوت‌اند[۱۰]. این شش بعد عبارت‌اند از :

الف) آنلاین[۴]در مقابل آفلاین[۵] در PCG آنلاین، تولید محتوا در زمان اجرای بازی ایجاد می‌شود ولی در روش‌های آفلاین PCG، محتوا در طول توسعه بازی یا قبل از اجرای بازی ایجاد می‌گردد. استفاده از PCG آفلاین هنگام تهیه مطالب پیچیده مانند محیط‌ها و نقشه‌ها بسیار مفید است[۵].

ب) ضروری[۶]در مقایسه با اختیاری[۷] محتوای ضروری همیشه باید درست باشد؛ درحالی‌که این شرایط برای محتوای اختیاری برقرار نیست[۵].

ج) درجه و ابعاد کنترل: تولید محتوا به کمک PCG می‌تواند با روش‌های مختلف کنترل شود. استفاده از بذر تصادفی[۸] یک‌راه برای کنترل فضای تولید است. راه دیگر استفاده از مجموعه‌ای از ورودی‌هایی است که تولید محتوا را کنترل می‌کنند[۵].

د) عمومی[۹]در مقابل تطبیقی:[۱۰]تولید محتوا به‌صورت عمومی به نمونه‌ای از PCG اشاره دارد که محتوا در آن بدون توجه به رفتار قبلی بازیکن تولید می‌شود. در تولید محتوا به‌صورت تطبیقی ابتدا رفتار بازیکن مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته و متناسب با آن محتوا تولید می‌شود[۱۰].

ه) تصادفی[۱۱]در مقابل قطعی:[۱۲]در PCG قطعی با استفاده از روش و تنظیمات یکسان می‌توان نتایج یکسانی را به دست آورد؛ اما در PCG تصادفی نتایج هر بار اجرا در شرایط یکسان متفاوت است[۵].

و) سازنده در مقابل تولید و آزمایش: در روش سازنده محتوا یک بار تولید شده و پس از تولید تغییری در آن ایجاد نمی‌شود؛ اما در روش تولید و آزمایش محتوا پس از هر بار آزمایش شده و چنانچه مقبول نباشد فرایند تولید و آزمایش تا تولید محتوای مقبول ادامه می‌یابد[۵].

ز) تولید خودکار در برابر تولید با نظارت ترکیبی: در PCG خودکار مقدار ورودی‌های محدودی برای کنترل و تنظیم مولّد محتوا وجود دارد. در PCG با نظارت ترکیبی، بازیکنان و طراحان بازی در طول فرایند تولید محتوا با الگوریتم همکاری می‌کنند تا محتوای مطلوب را ایجاد شود[۱۰].

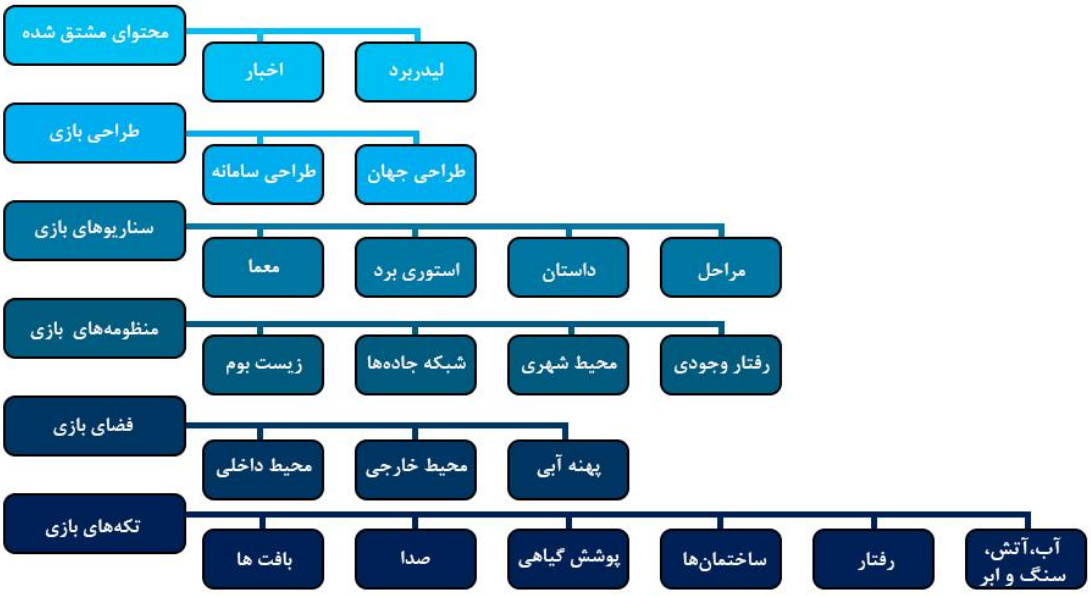
توجه به ابعاد مذکور و همچنین آشنایی کلی با محتواهای قابل‌تولید با PCG به پیاده‌سازی روش مناسب برای تولید محتوا کمک می‌کند[۵].

اما چه محتواهایی را می‌توان با PCG ایجاد کرد؟ برای پاسخ به این سؤال یک دسته‌بندی کلی توسط هنریکس[۱۳]و همکاران برای محتواهایی که می‌توانند با PCG تولید شوند، در [۳] ارائه شده است. این دسته‌بندی علاوه بر پوشش محتواهای موجود در بازی، محتواهای مشتق شده از سایر محتواهای بازی‌ها که به غرق شدن بازیکن در بازی کمک می‌کنند را هم پوشش می‌دهد. بر اساس این دسته‌بندی محتوای بازی‌ها به شش دسته‌ی تکّه‌های بازی؛[۱۴]فضای بازی؛[۱۵]منظومه‌های بازی؛[۱۶] سناریوهای بازی؛[۱۷]طراحی بازی و محتواهای مشتق تقسیم شده است. در شکل ۱ نمای کلی از همه‌ی گروه‌ها و اعضای آن‌ها

---

[۱] Akalabeth: World of Doom
[۲] Beneath Apple Manor
[۳] Togelius
[۴] Online
[۵] Offline
[۶] Necessary
[۷] Optional
[۸] Random Seed
[۹] Generic
[۱۰] Adaptive
[۱۱] Stochastic
[۱۲] Deterministic
[۱۳] Henrix
[۱۴] Game bits
[۱۵] Game Space
[۱۶] Game Systems
[۱۷] Game Scenarios

نمایش داده شده است. گروه‌های موجود در پایین شکل به ساخت گروه‌های بالایی کمک می‌کنند. در ادامه هر گروه معرفی می‌شود.



شکل ۱: انواع داده‌های قابل‌تولید با PCG [۳]

الف) تکّه‌های بازی: واحدهای ابتدایی بازی هستند که به‌تنهایی کاربر را درگیر بازی نمی‌کنند. بافت‌ها، صدا، پوشش گیاهی، ساختمان‌ها، رفتار و آب، آتش، سنگ و ابر اعضای این گروه هستند [۳].

ب) فضای بازی: فضای بازی محیطی است که در آن بازی انجام می‌شود و مملو از تکه‌های بازی است. فضای بازی نقش بسزایی در ایجاد تجربه بازیکن دارد؛ زیرا بازیکن ابتدا فضای بازی را درک می‌کند. محیط‌های داخلی، محیط‌های خارجی و پهنه آبی جزو فضاهای درون بازی هستند[۳].

ج) منظومه‌های بازی[۱]: با استفاده از سامانه‌های پیچیده و مدل‌سازی‌ها می‌توان بخشی از بازی را مانند شرایط واقعی شبیه‌سازی کرد. به این سامانه‌ها و مدل‌سازی‌ها که بازی را جذاب‌تر و واقعی‌تر می‌کنند، منظومه‌های بازی می‌گویند. منظومه‌های بازی شامل زیست‌بوم[۲]، شبکه جاده‌ها، محیط شهری و رفتار وجودی[۳]است[۳].

د) سناریوهای بازی: سناریوهای بازی، مسیرهایی که در آن حوادث بازی آشکار می‌شود را برای بازیکن شفاف می‌کنند. سناریوهای بازی شامل معما، استوری بورد، داستان و مراحل می‌شوند [۳].

ه) طراحی بازی: طراحی بازی شامل قوانین (چه‌کارهایی در بازی مجاز است؟)، اهداف (بازیکن برای دستیابی به چه چیزی باید تلاش کند؟) و عناصر زیبایی‌شناسی است. طراحی به دو نوع طراحی سامانه و طراحی جهان تقسیم می‌شود. [۳].

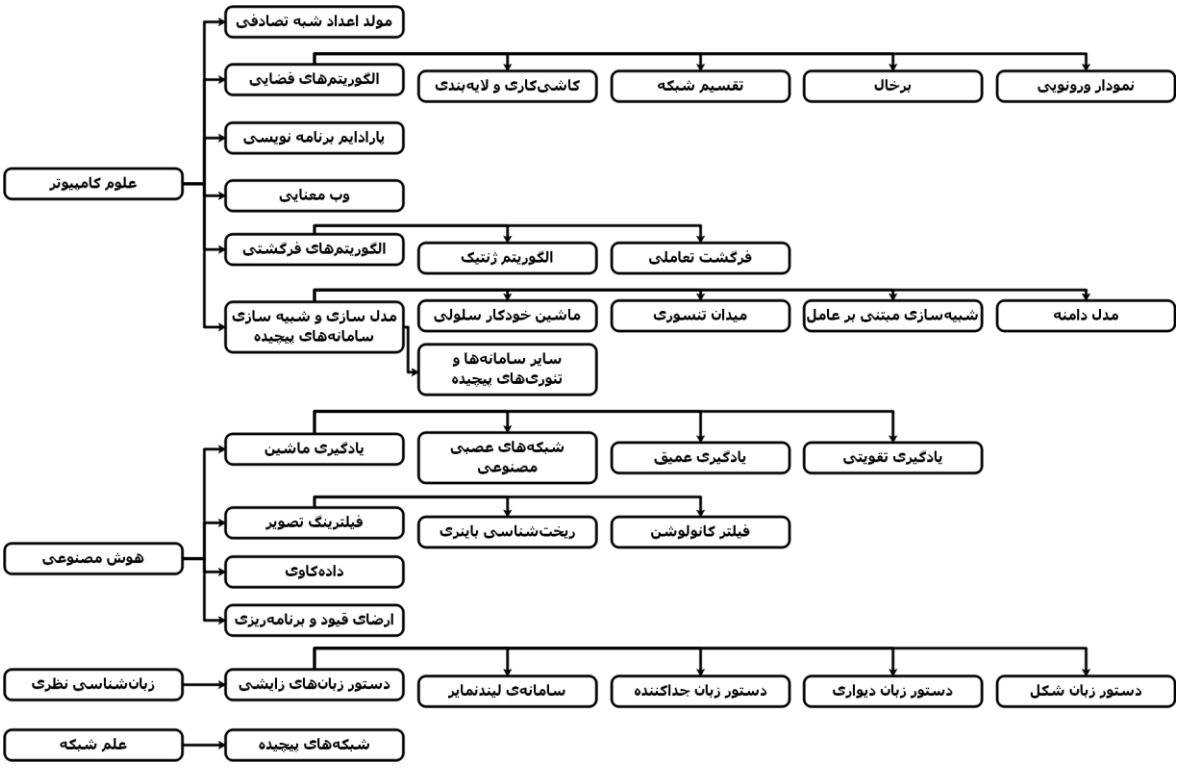
ز) محتواهای مشتق: محصولات جانبی دنیای بازی هستند و به غوطه‌وری بازیکن در دنیای بازی کمک می‌کنند. این محتواها به دو دسته‌ی اخبار و لیدربرد تقسیم می‌شوند[۳].

---

[۱] Game Systems [۲] Ecosystems [۳] Entity Behavior

۳- چارچوب نظری علوم استفاده‌شده در تولید رویه‌ای محتوا (CALN)

در PCG از علوم و فنون مختلفی استفاده می‌شود. هنریکس و همکاران در [۳] تعدادی از علوم استفاده شده در PCG را شناسایی کرده‌اند. در این تحقیق ما تعداد دیگری از علوم که اخیراً در PCG استفاده شده‌اند را شناسایی کرده و مجموع کلی آن‌ها را در قالب چارچوب CALN ارائه می‌دهیم. این چارچوب در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این چارچوب علوم استفاده‌شده در PCG بر مبنای حوزه‌ی علمی که به آن تعلق دارند، ساماندهی می‌شوند. در این چارچوب ۱۲ شاخه‌ی علمی مختلف به همراه ۲۰ زیرشاخه‌ی متعلق به آن‌ها در چهار گروه علوم کامپیوتر، هوش مصنوعی، زبان‌شناسی نظری و علم شبکه قرار می‌گیرند. نام این چارچوب بر گرفته از نام این چهار گروه اصلی می‌باشد. در این بخش ما به‌صورت کلی این تمامی علوم در این چارچوب و زیرشاخه‌های آن‌ها را بررسی کرده و شرح می‌دهیم. آشنایی با این علوم، محققان حوزه‌های مختلف را به فعالیت در حوزه PCG تشویق کرده و محققین فعال در PCG را با تمامی روش‌های تولید محتوا آشنا می‌کند.



شکل ۲: چارچوب CALN

الف) علوم کامپیوتر

علوم کامپیوتر دارای شاخه‌های متفاوتی است. در PCG از شش شاخه‌ی مولد اعداد شبه تصادفی[۱] الگوریتم‌های فضایی[۲] پارادایم[۳] برنامه‌نویسی، وب معنایی[۴] الگوریتم‌های فرگشتی[۵] و شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده که در علوم کامپیوتر وجود دارد استفاده می‌شود[۳]. از مولد اعداد شبه تصادفی برای ایجاد اشیاء پیچیده‌ی موجود در طبیعت مانند کوه‌ها، دره‌ها و ...

[۱] Pseudo-Random Number Generators
[۲] Spatial
[۳] Paradigm
[۴] semantic web
[۵] Evolutionary Algorithm

استفاده می‌شود[۱۱]. فیشر[۱] و همکاران در [۱۲] با کمک اختلال مبتنی بر مولد اعداد شبه تصادفی چشم‌انداز[۲] ایجاد کردند. همچنین اولسون[۳] و فرانک[۴] در [۱۳] کمک اختلال پرلین[۵] روشی برای تولید شهر ارائه دادند.

الگوریتم‌های فضایی، فضا را برای ایجاد محتوای بازی دست‌کاری می‌کنند. در این الگوریتم‌ها با استفاده از یک ساختار ورودی مانند توری[۶] یا ساختارهای خود ارجاعی، یک محتوا ایجاد می‌شود. کاشی‌کاری[۷] و لایه‌بندی[۸]، تقسیم شبکه[۹] و برخال[۱۰] از زیرشاخه‌های الگوریتم‌های فضایی هستند. در کاشی‌کاری نقشه بازی به‌صورت یک مشبک با خانه‌های مربعی یا هشت‌ضلعی شکل در نظر گرفته می‌شود[۱۱]. سپس محتواهای کوچک‌تر با قرار گرفتن در یک یا چند خانه نقشه بازی را ایجاد می‌کنند. بنگای[۱۱] در [۱۶] روشی را برای تولید رویه‌ای عوارض زمین ارائه داد که در آن از کاشی‌کاری استفاده شده است. در لایه‌بندی، چندین توری به نام لایه در یک نقشه ادغام می‌شوند. یک کاشی می‌تواند با همپوشانی چندلایه ایجاد شود[۱۱]. گو[۱۲] در [۱۷] روشی برای تولید رویه‌ای متریال[۱۳] ارائه کرد که لایه‌بندی در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در تقسیم شبکه یک شیء با بافت مناسب مانند یک شبکه یکنواخت در نظر گفته می‌شود. سپس الگوریتم به‌صورت پویا اجرا شده و اطراف میدان دید را به شبکه‌های کوچک‌تر با جزئیات بیشتر تبدیل می‌کند تا جزئیات در اطراف میدان دید بیشتر و دورتر از میدان دید کمتر باشد. کانگ[۱۴] و همکاران در [۱۸] و بروها[۱۵] و کلاژ[۱۶] در [۱۹] از تقسیم شبکه برای تنظیم مقدار جزئیات در فواصل مختلف استفاده کردند. برخال با کمک خود همانندی می‌تواند اشکال پیچیده نظیر کوه و ابر را ایجاد کند. برای مثال رامستدت[۱۷] و اسمد[۱۸] در [۲۰] و کریژ[۱۹] در [۲۱] روش‌هایی برای تولید رویه‌ای زمین[۲۰] با کمک برخال ارائه داده‌اند. با کمک نمودارهای ورونویی فضای متریک را به بخش‌های مختلف تقسیم می‌کنند که اندازه و شکل این بخش‌ها به کمک نقاط دانه[۲۱] تعیین می‌شود. هر بخش حاوی یک دانه بوده و مرز این بخش‌ها عمودمنصف پاره‌خط بین دانه‌های بخش‌ها است. چوروس[۲۲] و توپولسکی[۲۳] در [۲۲] روشی رویه‌ای برای ساخت زمین با زیست‌بوم‌های گوناگون به کمک دیاگرام ورونویی ارائه دادند. مونت[۲۴] در [۲۳] روشی برای تولید رویه‌ای بافت با وضوح متفاوت با کمک نمودار ورونویی ارائه داد. کیم[۲۵] و همکاران در [۲۴] روشی برای تولید رویه‌ای عناصر بازی ارائه دادند که در آن از دیاگرام ورونویی نیز استفاده شده است.

برنامه‌نویسی مجموعه پاسخ (ASP)[۲۶] یک فرم برنامه‌نویسی اعلانی است که در برنامه‌نویسی منطق[۲۷] استفاده می‌شود. در برنامه‌نویسی مجموعه پاسخ محدودیت‌ها و روابط منطقی با استفاده از زبان‌هایی شبیه به زبان پرولوگ[۲۸] تعریف می‌شود. با کمک ASP می‌توان محتوا را به‌صورت رویه‌ای ایجاد نمود. ابوزوریق[۲۹] و همکاران در [۲۵] روشی برای تولید رویه‌ای مراحل بازی با استفاده از ASP ارائه دادند. یانگ[۳۰] و ساپتاجیویا[۳۱] در [۲۶] با کمک ASP نقشه‌های بازی را به‌صورت رویه‌ای ایجاد کردند. وب معنایی با ایجاد ساختارهای معنی‌دار صفحات وب فضایی را برای عامل‌های نرم‌افزاری ایجاد می‌کند که بتوانند با چرخش در صفحات وب کارهای پیچیده‌ای را برای کاربران انجام دهند[۲۸]. در PCG می‌توان از وب معنایی استفاده نمود. برای مثال واشیستا[۳۲] و مالک[۳۳] در [۲۹] یک چارچوب مبتنی بر وب معنایی برای تولید رویه‌ای معما[۳۴] ارائه دادند. لابوو[۳۵] و همکاران نیز در [۳۰] ابزاری ارائه دادند که از وب معنایی برای تولید رویه‌ای داستان استفاده می‌کند. الگوریتم‌های فرگشتی

---

[۱] Fischer
[۲] Landscape
[۳] Olson
[۴] Frank
[۵] Perlin
[۶] Grid
[۷] Tiling
[۸] Layering
[۹] Grid Subdivision
[۱۰] Fractal
[۱۱] Bangay
[۱۲] Guo
[۱۳] Material
[۱۴] Kang
[۱۵] Brůha
[۱۶] Kolář
[۱۷] Ramstedt
[۱۸] Smed
[۱۹] Křiž
[۲۰] Terrain
[۲۱] Seed
[۲۲] Choros
[۲۳] Topolski
[۲۴] Mundt
[۲۵] Kim
[۲۶] Answer set programming
[۲۷] logic programming
[۲۸] Prolog
[۲۹] Abuzuraiq
[۳۰] Young
[۳۱] Saptawijaya
[۳۲] Vashistha
[۳۳] Malik
[۳۴] puzzle
[۳۵] LaBouve

شاخه‌ای دیگر از علوم کامپیوتر است و از زیرشاخه‌های آن نظیر الگوریتم ژنتیک و فرگشت تعاملی در PCG استفاده می‌شود. ظفر[۱] و همکاران در [۵۴]، رولا[۲] و همکاران در [۵۵] و والتون[۳] و همکاران در [۵۶] از الگوریتم‌های تکاملی برای تولید رویه‌ای مرحله استفاده کرده‌اند.

از مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده برای توصیف برخی از پدیده‌های طبیعی که با معادلات ریاضی غیرممکن است، استفاده می‌شود. ماشین خودکار سلولی[۴] میدان تنسوری[۵] شبیه‌سازی مبتنی بر عامل[۶] و مدل دامنه[۷] از مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های مورداستفاده در PCG هستند. علاوه بر مدل‌سازی‌های مذکور برخی از مدل‌سازی‌ها نیز احتمالاً برای استفاده در PCG مفید هستند که در دسته سایر سامانه‌ها و تئوری‌های پیچیده قرار می‌گیرند[۱۱]. ماشین خودکار سلولی یک مدل محاسباتی گسسته بر اساس سلول‌های درون یک شبکه است. در ماشین خودکار سلولی هر سلول یک حالت داشته و از یک مجموعه قوانین مشترک استفاده می‌کند. وضعیت یک سلول در مرحله بعدی به وضعیت آن سلول و همسایه‌هایش در مرحله فعلی وابسته است. مسدو[۸] و چایموویچ[۹] در [۳۳] با استفاده از ماشین خودکار سلولی نقشه‌های دوبعدی را به‌صورت رویه‌ای ایجاد کردند. کرایتزر[۱۰] و همکاران در [۳۴] روشی برای تولید رویه‌ای غار با کمک ماشین خودکار سلولی ارائه دادند.

میدان‌های تنسوری بردارهای دوبعدی تعمیم‌یافته‌ای هستند که برای مشخص کردن شکل فضای بازی استفاده می‌شود. تنسور جهت ارتفاعات نقشه را مشخص می‌کند. ازآنجاکه خطوط تنسور قابل‌مشاهده هستند، استفاده از آن‌ها برای طراحی تعاملی و دست‌کاری شبکه‌های جاده‌ای مناسب است. چن[۱۱] و همکاران در [۳۵] روشی برای تولید رویه‌ای خیابان با استفاده از میدان تنسوری ارائه دادند. مصطفی و همکاران [۳۶] روشی برای تولید مناطق شهری ارائه دادند که در آن از میدان تنسوری استفاده شده است. در شبیه‌سازی مبتنی بر عامل، شرایط پیچیده به کمک نهادهایی به اسم عامل شبیه‌سازی می‌شود[۳۷]. عامل‌ها افراد موجود در یک جامعه با ویژگی‌های مورد انتظار را مدل‌سازی می‌کنند. فاکتورهایی وارد سیستم شده و تأثیر آن‌ها در رفتارهای عامل‌ها یا رفتار سطح کلان جامعه بررسی می‌شود[۱۱]. سانگ[۱۲] و همکاران در [۳۸] با کمک شبیه‌سازی مبتنی بر عامل جاده را به‌صورت رویه‌ای ایجاد کردند. پترواس[۱۳] و باووسیس[۱۴] با کمک شبیه‌سازی مبتنی بر عامل روشی رویه‌ای را برای تولید زمین و کوه در [۳۹] ارائه دادند.

مدل دامنه دانش را در یک دامنه خاص رمزگذاری می‌کنند. از مدل دامنه در تولید زبان‌هایی نظیر زبان توصیف عمل[۱۵] (ADL) استفاده می‌شود. این زبان‌ها عمل برنامه‌ریزی[۱۶] را در تولید محتوا آسان‌تر می‌نمایند. خلیفه[۱۷] و همکاران در [۴۰] با کمک مدل دامنه مراحل بازی را به‌صورت رویه‌ای ایجاد کردند. چن[۱۸] و گای[۱۹] در [۴۱] یک زبان خاص دامنه برای تولید رویه‌ای محتوا ارائه دادند. تئوری‌ها و سامانه‌های دیگری مانند تئوری‌های عمل نمایشی[۲۰] (برای تولید داستان)، روند شناختی[۲۱] (برای رفتار موجودیت) وجود دارند که ممکن است در تولید رویه‌ای محتوا بکار بروند. توجه به این تئوری‌ها و سامانه‌ها مفید بوده و می‌تواند به PCG کمک کند.

---

[۱] Zafar
[۲] Ruela
[۳] Walton
[۴] Cellular Automata
[۵] Tensor Fields
[۶] Agent-Based Simulation
[۷] Domain Model
[۸] Macedo
[۹] Chaimowicz
[۱۰] Kreitzer
[۱۱] Chen
[۱۲] Song
[۱۳] Petrovas
[۱۴] Baušys
[۱۵] Action Description Language
[۱۶] Planning
[۱۷] Khalifa
[۱۸] Chen
[۱۹] Guy
[۲۰] Dramatic Act
[۲۱] Cognitive Process

ب) هوش مصنوعی

هوش مصنوعی یکی از حوزه‌های بزرگ در علوم کامپیوتر است و از آن در PCG استفاده بسیاری می‌شود. چهار شاخه‌ی استفاده‌شده‌ی هوش مصنوعی در PCG یادگیری ماشین[۱]، فیلترینگ تصویر[۲]، داده‌کاوی[۳] و ارضای قیود[۴] و برنامه‌ریزی[۵] است.

در یادگیری ماشین از شبکه‌های عصبی مصنوعی[۶]، یادگیری عمیق[۷]، یادگیری تقویتی[۸] برای تولید رویه‌ای محتوا استفاده می‌شود[۳, ۵]. شبکه‌های عصبی مصنوعی، از مجموعه‌ای از گره‌های به‌هم‌پیوسته تشکیل شده که با استفاده از اطلاعات دریافتی از ورودی، مقادیری را بر اساس سیگنال‌های خارجی که از حسگرها دریافت شده محاسبه کنند. در PCG از زیرشاخه‌های مختلف شبکه‌های مصنوعی مانند شبکه‌های مولد الگوی مرکب[۹] و تکامل عصبی توپولوژی‌های افزوده استفاده می‌شود[۵]. توریزر[۱۰] و همکاران در [۴۲] با کمک شبکه‌های مولد الگوی مرکب اشکال دوبعدی و سه‌بعدی برای روان‌تر کردن پویانمایی‌ها تولید کردند. شروم[۱۱] و همکاران در [۴۳] و فلیمل[۱۲] در [۴۴] با کمک شبکه‌های عصبی مرحله بازی ایجاد کردند.

یادگیری عمیق نیز یکی دیگر از روش‌های یادگیری ماشین است که در PCG مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یادگیری عمیق هدف، یادگیری سلسله مراتبی ویژگی‌های سطح بالا است که از ترکیب ویژگی‌های سطح پایین به وجود آمده‌اند[۴۵]. کاراولوس[۱۳] و همکاران در [۴۶] و جاکوملو[۱۴] و همکاران در [۴۷] با استفاده از یادگیری عمیق برای بازی به‌صورت رویه‌ای مرحله ایجاد کردند. لیانگ و همکاران در [۴۸] از یادگیری عمیق برای تولید رویه‌ای موسیقی استفاده کردند. نیشیدا و همکاران در [۴۹] روشی برای تولید رویه‌ای ساختمان با کمک یادگیری عمیق ارائه دادند. یادگیری تقویتی نیز یکی دیگر از شاخه‌های یادگیری ماشین است که بر رفتار یک عامل در یک محیط برای به دست آوردن حداکثر مجموعه پاداش متمرکز است. در این یادگیری عامل با استفاده از آزمون‌وخطا و بازخورد اعمال خود یادگیری را انجام می‌دهد[۵۰]. با استفاده از یادگیری تقویتی می‌توان محتوا را به‌صورت رویه‌ای ایجاد نمود. خلیفه و همکاران در [۵۱] روشی برای تولید رویه‌ای مرحله با کمک یادگیری تقویتی ارائه دادند. لوپز[۱۵] و همکاران در [۵۲] و [۵۳] از یادگیری تقویتی برای تولید رویه‌ای محیط‌های سه‌بعدی استفاده کردند.

از فیلترینگ تصویر برای بهبود کیفیت یک تصویر با توجه به یک واحد اندازه‌گیری یا تمرکز بر یک ویژگی ساختاری برای نمایش اطلاعات پنهان استفاده می‌شود[۱۱]. ریخت‌شناسی باینری[۱۶] فیلتر کانولوشن[۱۷] دو زیرشاخه از پردازش تصویر هستند که در PCG از آن‌ها استفاده می‌شود. مثال ولز[۱۸] و همکاران در [۱۴] روشی برای تولید الگو در بازی ارائه دادند که در آن از فیلتر کانولوشن استفاده شده است. همچنین لفبور[۱۹] و نیرت[۲۰] [۱۵] از کانولوشن برای تولید رویه‌ای بافت استفاده کرده‌اند.

داده‌کاوی شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که در آن داده‌های موجود، تجزیه‌وتحلیل می‌شوند تا اطلاعات جدید به دست آید[۲۷]. از داده‌کاوی می‌توان در PCG استفاده کرد[۳۱]. برای مثال می‌توان از داده‌کاوی برای مدل کردن تجربه بازیکن استفاده کرد و با استفاده از آن مدل PCG را مبتنی بر تجربه بازیکن ایجاد نمود[۳۲]. ارضای قیود و برنامه‌ریزی مستلزم پیدا کردن مسیری از حالت اولیه به وضعیت نهایی با به‌کارگیری برخی از اقدامات است. در ارضای قیود راه‌حل با توجه به محدودیت‌های موجود در مسئله پیدا می‌شود و در برنامه‌ریزی سلسله اعمال لازم برای رسیدن به هدف تعیین می‌شود. اسمیت[۲۱] و همکاران در [۵۷] روشی برای تولید رویه‌ای مرحله ارائه دادند که از ارضای قیود در آن استفاده شده است. آماتو[۲۲] و همکاران در [۵۸] از برنامه‌ریزی برای تولید رویه‌ای محتوا استفاده کردند.

---

[۱] Machine Learning
[۲] Image filtering
[۳] Data Mining
[۴] Constraint Satisfaction
[۵] Planning
[۶] Artificial Neural Networks
[۷] Deep Language
[۸] reinforcement learning
[۹] Compositional Pattern Producing Networks
[۱۰] Tweraser
[۱۱] Schrum
[۱۲] Flimmel
[۱۳] Karavolos
[۱۴] Giacomello
[۱۵] López
[۱۶] Binary morphology
[۱۷] Convolution Filter
[۱۸] Volz
[۱۹] Lefebvre
[۲۰] Neyret
[۲۱] Smith
[۲۲] Amato

ج) زبانشناسی نظری

زبانشناسی نظری شاخه‌ای از زبان‌شناسی است که به کشف ساختار اصلی زبان مربوط است[۵۹]. یکی از شاخه‌های زبانشناسی نظری دستور زبان‌های زایشی است که از مطالعات نوام چامسکی[۱] در دهه ۶۰ میلادی الهام گرفته شده‌اند. در این دستور زبان‌ها با کمک مجموعه از قوانین که عملیاتی را بر روی حروف جداگانه ایجاد می‌کنند، می‌توان جمله‌ای صحیح بر اساس قواعد دستور زبان ایجاد کرد. چهار زیرشاخه از دستور زبان زایشی که در PCG مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از سامانه‌ی لیندنمایر، دستور زبان‌های جداکننده، دستور زبان دیواری و دستور زبان شکل[۱۱]. سامانه‌ی لیندنمایر یک دستور زبان قراردادی است که اشیاء پیچیده با جایگزینی بخش‌هایی از یک شیء اولیه ساده به کمک بازنویسی[۲] توصیف می‌کند[۶]. آنتونیوک[۳] روکیتا[۴] در [۶۰] و آنتونیوک و همکاران در [۶۱] از L-System برای تولید رویه‌ای سیاه‌چال استفاده کردند. می[۵] در [۶۲] روشی برای تولید رویه‌ای محیط شهری با کمک L-System ارائه داد.

دستور زبان‌های جداکننده[۶] این نوع دستور زبان به L-System شباهت دارد اما بیشتر بر پایه اشکال است تا حروف یا نماد. دستور زبان‌های جداکننده شکلی را به کمک برخی اشکال پایه و قواعد بازنویسی تبدیل شکل به شکل، ایجاد می‌کنند[۱۱]. در کارا[۷] و همکاران در [۶۳] از دستور زبان جداکننده برای تولید رویه‌ای موشن گرافیک استفاده کرد. نیشیدا[۸] و همکاران در [۶۴] روشی برای تولید رویه‌ای ساختمان با کمک دستور زبان جداکننده ارائه دادند. از دستور زبان‌های دیوار برای ایجاد ظاهر خارجی ساختمان‌ها استفاده می شود. این دستور زبان‌ها مانند دستور زبان‌های جداکننده عمل می‌کنند ولی توانایی ایجاد اشیا پیشرفته‌تری را نسبت آن‌ها دارند. برای مثال به کمک این دستور زبان‌ها می‌توان بالکن و راه‌پله اضطراری ایجاد نمود .دستور زبان‌های شکل دستور زبان‌هایی متوالی و حساس به متن هستند. در هر مرحله بازنویسی، نماد و همسایگان آن، تعیین می‌کنند که کدام نماد جایگزین نماد اصلی شود. روند بازنویسی این دستور زبان با L-System یا دستور زبان جداکننده متفاوت است. وانگ[۹] و همکاران در [۶۵] از دستور زبان شکل برای تولید رویه‌ای محیط شهری استفاده کردند. ساووف[۱۰] و تسمن[۱۱] در [۶۶] روشی برای تولید رویه‌ای ساختارهای معماری با استفاده از دستور زبان شکل ارائه دادند. گرامرهای شکل مانند گرامرهای دیواری می‌توانند ساختارهای پیچیده‌تری را ایجاد کنند. لاریو[۱۲] و گیلدرات[۱۳] در [۶۷] گرامر شکل را برای ایجاد رویه‌ای نمای خارجی ساختمان‌ها ارائه دادند.

د) علم شبکه

از علم شبکه، برای درک شبکه‌های موجود در طبیعت، فناوری و جامعه با استفاده از برخی اصول و ابزارها استفاده می‌شود. شبکه‌ها برخلاف تفاوت‌های ظاهری به‌وسیله‌ی برخی از قوانین و سازوکارها ایجاد می‌شوند و تغییر می‌کند. در علم شبکه این قواعد و سازوکارها بررسی می‌شود[۶۸]. از علم شبکه می‌توان برای تولید رویه‌ای محتوا هم استفاده کرد. برای مثال مندونسا[۱۴] و زیویانی[۱۵] در [۶۹] روشی برای ایجاد رویه‌ای داستان با استفاده از شبکه‌های پیچیده ارائه دادند.

۴- پیشنهادها برای تحقیقات آینده در زمینه‌ی علوم استفاده‌شده در PCG

در شرایط کنونی شرکت‌های داخلی توانایی هزینه‌های عظیم چند میلیون دلاری نداشته و طبیعتاً برای تولید محتوای عظیم با چالش مواجه خواهند شد. علاوه بر مباحث مالی صنعت بازی‌سازی ایران صنعت نوپایی بوده و پیدا کردن افراد خبره،

---

[۱] Noam Chomsky
[۲] Rewriting
[۳] Antoniuk
[۴] Rokita
[۵] Mei
[۶] Split Grammars
[۷] Carra
[۸] Nishida
[۹] Wang
[۱۰] Savov
[۱۱] Tessmann
[۱۲] Larive
[۱۳] Gaildrat
[۱۴] Mendonca
[۱۵] Ziviani

مدت‌زمان تولید، بهینه‌سازی و آشنایی با سلیقه‌های مخاطبان چالش‌های دیگری برای شرکت‌های بازی‌ساز است. با توجه به جایگاه اول منطقه‌ای ایران در علوم کامپیوتر و وجود محتواهای فرهنگی منحصربه‌فرد از قبیل داستان، معماری و سابقه کهن در تولید این محتواها، این نتیجه به دست می‌آید که با سرمایه‌گذاری در PCG و بهره‌برداری از آن در صنعت بازی‌سازی می‌توان این چالش‌ها را کاهش داد و کفه ترازوی بازار رقابتی بازی‌های دیجیتال را به سمت تولیدات بومی سنگین‌تر کرد. در این بخش ما با توجه به چارچوب نظری CALN چندین پیشنهاد کلی برای تحقق این امر ارائه می‌دهیم. این پیشنهادها عبارت‌اند از:

- برگزاری نشست‌های مشترک میان سیاست‌گذاران صنعت بازی‌های رایانه‌ای با کارگروهی به نمایندگی محققین و فعالین این صنعت به‌منظور شناسایی توان موجود برای اولویت‌بندی تحقیق، آموزش و پیاده‌سازی علوم و فنون مشترک مابین صنعت بازی‌سازی و علوم ذکرشده در چارچوب CALN.
- ایجاد برنامه مدون جهت توسعه آموزش و تحقیقات در زمینه‌ی کاربردهای هوش مصنوعی و علوم کامپیوتر در بازی‌ها با توجه به اولویت‌های مشخص‌شده در نشست‌های مشترک. برای مثال می‌توان با توجه به علوم موجود در چارچوب CALN دروسی مانند شبکه‌ی عصبی، الگوریتم پیشرفته، ارزیابی کارایی، هوش مصنوعی در بازی‌های رایانه‌ای، پردازش تصویر و ریاضیات مخصوص بازی‌های رایانه‌ای که در PCG از آن‌ها استفاده زیادی می‌شود را به سرفصل رشته بازی‌های رایانه‌ای افزود.
- سنجش توانمندی کشور در علوم موجود در چارچوب CALN و تعریف طرح‌های PCG مشترک مابین دانشگاه و صنعت در حوزه‌هایی که در آن توانمندی بیشتری موجود است.
- افزایش همکاری و تحقیقات مشترک مابین حوزه‌های علمی موجود در چارچوب CALN با سایر علوم – مانند معماری، روانشناسی، موسیقی و ... به‌وسیله‌ی ایجاد گروه‌های تحقیقاتی مشترک، انتشار مجلات و مطالعات میان‌رشته‌ای و برگزاری همایش‌ها– برای سهولت در فرآیند تولید محتوا و بهبود کیفیت آن. برای مثال با ایجاد مدل انتزاعی از معماری ایرانی توسط معماران، محققین هوش مصنوعی آسان‌تر و سریع‌تر می‌توانند مولدی باکیفیت را برای ایجاد ساختمان‌های دارای معماری ایرانی تولید کنند.
- تحقیقات برای شناسایی کاربرد PCG در حوزه‌های ارائه‌شده در چارچوب CALN برای حل یا کاهش مشکلات آن‌ها. برای مثال یکی از حوزه‌های مستعد که می‌توان از PCG در آن استفاده کرد تولید داده دست‌ساز برای یادگیری شبکه عصبی است.

۵–نتیجه‌گیری

در تولید رویه‌ای محتوا از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود که هرکدام از این روش‌ها به شاخه‌ای از علوم مربوط است. در این مقاله ما به بررسی کلی تولید رویه‌ای محتوا و علوم استفاده‌شده در آن پرداختیم. در ابتدا PCG مورد بررسی قرار گرفت و ابعاد مختلف آن ذکر شد. سپس محتواهای مختلف بازی که می‌توان به‌صورت رویه‌ای ایجاد کرد، معرفی گردید. در ادامه چارچوبی نظری برای علوم استفاده‌شده در PCG با نام CALN ارائه شد. این چارچوب علوم مختلف به همراه زیرشاخه‌های آن‌ها را دسته‌بندی کرده و در چهار حوزه‌ی علوم کامپیوتر، هوش مصنوعی، زبان‌شناسی نظری و علم شبکه قرار می‌دهد. در این مقاله هر علم موجود در چارچوب CALN به همراه زیرشاخه‌های آن به‌صورت مختصر معرفی گردید و نمونه تحقیقات PCG انجام‌شده با این علوم معرفی شد. در انتها پیشنهادهایی برای استفاده عملی از PCG با توجه به چارچوب پیشنهادی CALN ارائه گردید.

سپاسگزاری

مقالـــه حاضـــر بخـــشی از طرح تحقیقاتی به سفارش **پژوهشگاه فضای مجازی** می باشـد که نویسندگان از حمایت‌های این پژوهشگاه تقدیر و تشکر می نمایند.

منابع

[1] M. J. Wolf, *Before the crash: Early video game history*. Wayne State University Press, 2012.

[2] L. Villapaz. "GTA 5' Costs $265 Million To Develop And Market, Making It The Most Expensive Video Game Ever Produced: Report." International Business Times . https://www.ibtimes.com/gta-5-costs-265-million-develop-market-making-it-most-expensive-video-game-ever-produced-report (accessed 21- Aug, 2020.(

[3] M. Hendrikx, S. Meijer, J. Van Der Velden, and A. Iosup, "Procedural content generation for games: A survey," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM),* vol. 9, no. 1, pp. 1-22, 2013.

[4] M. Seif El-Nasr and E. Kleinman, "Data-Driven Game Development: Ethical Considerations," in *International Conference on the Foundations of Digital Games*, 2020, pp. 1-10 .

[5] N. Shaker, J. Togelius, and M. J. Nelson, *Procedural content generation in games*. Springer, 2016.

[6] G. Kelly and H. McCabe, "A survey of procedural techniques for city generation," *ITB Journal,* vol. 14, no ,3 .pp. 342-351, 2006.

[7] S. Risi and J. Togelius, "Increasing generality in machine learning through procedural content generation," *Nature Machine Intelligence,* vol. 2, no. 8, pp. 428-436, 2020.

[8] J. Togelius, E. Kastbjerg, D. Schedl, and G. N. Yannakakis, "What is procedural content generation? Mario on the borderline," in *Proceedings of the 2nd international workshop on procedural content generation in games*, 2011, pp. 1-6 .

[9] S. Dahlskog, "Patterns and procedural content generation in digital games: automatic level generation for digital games using game design patterns," Malmö university, Faculty of Technology and Society, 2016 .

[10] J. Togelius, G. N. Yannakakis, K. O. Stanley, and C. Browne, "Search-based procedural content generation," in *European Conference on the Applications of Evolutionary Computation*, 2010: Springer, pp. 141-150 .

[11] M. Hendrikx, S. Meijer, J. Van Der Velden, and A. Iosup, "Online Appendix to: Procedural Content Generation for Games: A Survey," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM),* vol. 9, no. 1, pp. 1-22, 2013.

[12] R. Fischer, P. Dittmann, R. Weller, and G. Zachmann, "AutoBiomes: procedural generation of multi-biome landscapes," *The Visual Computer,* vol. 36, no. 10, pp ,2272-2263 . ,2020 01/10/2020doi: 10.1007/s00371-020-01920-7.

[13] E. Frank and N. Olsson, "Procedural city generation using Perlin noise," ed, 2017.

[14] V. Volz *et al.*, "Capturing Local and Global Patterns in Procedural Content Generation via Machine Learning," *arXiv preprint arXiv:2005.12579,* 2020.

[15] S. Lefebvre and F. Neyret, "Pattern based procedural textures," in *Proceedings of the 2003 symposium on Interactive 3D graphics*, 2003, pp. 203-212 .

[16] S. Bangay, "Deterministic procedural generation of mesh detail through gradient tiling," in *Proceedings of the Australasian Computer Science Week Multiconference*, 2017, pp. 1-10 .

[17] Y. Guo, M. Hašan, L. Yan, and S. Zhao, "A Bayesian Inference Framework for Procedural Material Parameter Estimation ",in *Computer Graphics Forum*, 2020, vol. 39, no. 7: Wiley Online Library, pp. 255-266 .

[18] H. Kang, Y. Sim, and J. Han, "Terrain rendering with unlimited detail and resolution," *Graphical Models,* vol. 97, pp. 64-79, 2018.

[19] L. Brůha and J. Kolář, "A procedural footprint enhancement of global topographic surface with multiple levels of detail," *International Journal of Digital Earth,* vol. 13, no. 4, pp. 527-545, 2020.

[20] R. Ramstedt and J. Smed, "Midpoint displacement in multifractal terrain generation," in *Proceedings of the International Conference on Intelligent Games and Simulation*, 2016 .

[21] B. J. Kříž, "Multi-Fractal Terrain Generation".

[22] K. Choros and J. Topolski, "Parameterized and Dynamic Generation of an Infinite Virtual Terrain with Various Biomes using Extended Voronoi Diagram," *J. UCS,* vol. 22, no. 6, pp. 836-855, 2016.

[23] L. Mundt, "Texture Synthesis in a Weighted Graph Using Nth-Order Voronoi Diagrams," Carleton University, 2019 .

[24] H. Kim, T. Hahn, S. Kim, and S. Kang" ,Graph Based Wave Function Collapse Algorithm for Procedural Content Generation in Games," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems,* vol. 103, no. 8, pp. 1901-1910, 2020.

[25] A. M. Abuzuraiq, A. Ferguson, and P. Pasquier, "Taksim: A Constrained Graph Partitioning Framework for Procedural Content Generation," in *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*, 2019: IEEE, pp. 1-8 .

[26] J. C. Young and A. Saptawijaya, "Incremental Inductive Learning of Answer Set Programs for Maps Generation Problems," in *2019 International Conference on Advanced Computer Science and information Systems (ICACSIS)*, 2019: IEEE, pp. 483-488 .

[27] S. I. T. Joseph and I. Thanakumar, "Survey of data mining algorithm's for intelligent computing system," *Journal of trends in Computer Science and Smart technology (TCSST),* vol. 1, no. 01, pp. 14-24, 2019.

[28] T. Berners-Lee, J. Hendler, and O. Lassila, "The semantic web," *Scientific american,* vol. 284, no. 5, pp. 34-43, 2001.

[29] V. Vashistha and S. Malik, "Procedural Content Generation in Games towards Semantic Web," 2018.

[30] E. LaBouve, E. Miller, and F. Khosmood, "Enhancing story generation with the semantic web," in *Proceedings of the 14th International Conference on the Foundations of Digital Games*, 2019, pp. 1-11 .

[31] D. Hooshyar, M. Yousefi, M. Wang, and H. Lim, "A data-driven procedural-content-generation approach for educational games," *Journal of Computer Assisted Learning,* vol. 34, no. 6, pp. 731-739, 2018.

[32] G. N. Yannakakis and J. Togelius, "Experience-driven procedural content generation," in 2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), 2015: IEEE, pp. 519-525 .

[33] Y. P. A. Macedo and L. Chaimowicz, "Improving procedural 2D map Generation based on multi-layered cellular automata and Hilbert curves," in *2017 16th Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment (SBGames)*, 2017: IEEE, pp. 116-125 .

[34] M. Kreitzer, D. Ashlock, and R. Pereira, "Automatic generation of diverse cavern maps with morphing cellular automata," in *2019 IEEE Conference on Games (CoG)*, 2019: IEEE, pp. 1-8 .

[35] G. Chen, G. Esch, P. Wonka, P. Müller, and E. Zhang, "Interactive procedural street modeling," in *ACM SIGGRAPH 2008 papers*, 2008, pp. 1-10.

[36] A. Mustafa *et al.*, "Procedural generation of flood-sensitive urban layouts," *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science,* p. 2399808318812458, 2018.

[37] P. Davidsson, "Multi agent based simulation: beyond social simulation," in *International workshop on multi-agent systems and agent-based simulation*, 2000: Springer, pp. 97-107 .

[38] A. Song and J. Whitehead, "TownSim: agent-based city evolution for naturalistic road network generation," in *Proceedings of the 14th International Conference on the Foundations of Digital Games*, 2019, pp. 1-9 .

[39] A. Petrovas and R. Baušys, "Automated Digital Terrain Elevation Modification By Procedural Generation Approach," in *2019 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, 2019: IEEE, pp .5-1 .

[40] A. Khalifa, S. Lee, A. Nealen, and J. Togelius, "Talakat: Bullet hell generation through constrained map-elites," in *Proceedings of The Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2018, pp. 1047-1054 .

[41] T. Chen and S. J. Guy, "GIGL :A Domain Specific Language for Procedural Content Generation with Grammatical Representations," in *AIIDE*, 2018, pp. 9-16 .

[42] I. Tweraser, L. E. Gillespie, and J. Schrum, "Querying across time to interactively evolve animations," in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2018, pp. 213-220 .

[43] J. Schrum, V. Volz, and S. Risi, "CPPN2GAN: Combining Compositional Pattern Producing Networks and GANs for Large-scale Pattern Generation," *arXiv preprint arXiv:2004.01703,* 2020.

[44] J. Flimmel, "Coevolution of AI and level generation for Super Mario game," 2020.

[45] Y. Bengio, *Learning deep architectures for AI*. Now Publishers Inc, 2009.

[46] D. Karavolos, A. Liapis, and G. N. Yannakakis, "A multi-faceted surrogate model for search-based procedural content generation," *IEEE Transactions on Games,* 2019.

[47] E. Giacomello, P. L. Lanzi, and D. Loiacono, "DOOM level generation using generative adversarial networks," in *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM)*, 2018 :IEEE, pp. 316-323 .

[48] Y. Liang, W. Li, and K. Ikeda, "Procedural Content Generation of Rhythm Games Using Deep Learning Methods," in *Joint International Conference on Entertainment Computing and Serious Games*, 2019: Springer, pp. 134-145 .

[49] G. Nishida, A. Bousseau, and D. G. Aliaga, "Procedural modeling of a building from a single image," in *Computer Graphics Forum*, 2018, vol. 37, no. 2: Wiley Online Library, pp. 415-429 .

[50] R. S. Sutton and A. G. Barto, "Reinforcement learning: An introduction," 2011.

[51] A. Khalifa, P. Bontrager, S. Earle, and J. Togelius, "Pcgrl: Procedural content generation via reinforcement learning," *arXiv preprint arXiv:2001.09212,* 2020.

[52] C. E. López, J. Cunningham, O. Ashour, and C. S. Tucker, "Deep Reinforcement Learning for Procedural Content Generation of 3D Virtual Environments," *Journal of Computing and Information Science in Engineering,* vol. 20, no. 5, 2020.

[53] C. E. Lopez, O. Ashour, and C. S. Tucker, "Reinforcement Learning Content Generation for Virtual Reality Applications," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2019, vol. 59179: American Society of Mechanical Engineers, p. V001T02A009 .

[54] A. Zafar, H. Mujtaba, and M. O .Beg, "Search-based procedural content generation for GVG-LG," *Applied Soft Computing,* vol. 86, p. 105909, 2020.

[55] A. S. Ruela, K. V. Delgado, and J. Bernardes, "A multi-objective evolutionary approach for the nonlinear scale-free level problem," *Applied Intelligence,* pp. 1-18, 2020.

[56] S. P. Walton, A. A. Rahat, and J. Stovold, "Mixed-Initiative Procedural Content Generation using Level Design Patterns and Interactive Evolutionary Optimisation," *arXiv preprint arXiv:2005.07478,* 2020.

[57] G. Smith ,J. Whitehead, and M. Mateas, "Tanagra: Reactive planning and constraint solving for mixed-initiative level design," *IEEE Transactions on computational intelligence and AI in games,* vol. 3, no. 3, pp. 201-215, 2011.

[58] F. Amato, F. Moscato, and F. Xhafa" ,Generation of game contents by social media analysis and MAS planning," *Computers in Human Behavior,* vol. 100, pp. 286-294, 2019.

[59] G. R. Sampson, "Grammar without grammaticality," *Corpus linguistics and linguistic theory,* vol. 3, no. 1, pp. 1-32, 20.07

[60] I. Antoniuk and P. Rokita, "Procedural generation of multilevel dungeons for application in computer games using schematic maps and L-system," in *Intelligent Methods and Big Data in Industrial Applications*: Springer, 2019, pp. 261-275.

[61] I. Antoniuk, P. Hoser, and D. Strzęciwilk, "L-system Application to Procedural Generation of Room Shapes for 3D Dungeon Creation in Computer Games," in *International Multi-Conference on Advanced Computer Systems*, 2018: Springer, pp. 375-386 .

[62] Y. Mei, "Procedural Generation of Urban Landscape with Extended L-System for Virtual Worlds," *法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編,* no. 13, pp. 1-6, 2017.

[63] E. Carra, C. Santoni, and F. Pellacini, "gMotion: A Spatio-Temporal Grammar for the Procedural Generation of Motion Graphics," in *Graphics Interface*, 2018, pp. 100-107 .

[64] G. Nishida, I. Garcia-Dorado, D. G. Aliaga, B. Benes, and A. Bousseau, "Interactive sketching of urban procedural models," *ACM Transactions on Graphics (TOG),* vol. 35, no. 4, pp. 1-11, 2016.

[65] X. Wang, Y. Song, and P. Tang, "Generative urban design using shape grammar and block morphological analysis," *Frontiers of Architectural Research,* 2020.

[66] A. Savov and O. Tessmann, "Introduction to playable voxel-shape grammars," 2017.

[67] M. Larive and V .Gaildrat, "Wall grammar for building generation," in *Proceedings of the* 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in *Australasia and Southeast Asia*, 2006, pp. 429-437 .

[68] A.-L. Barabási, "Network science," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* vol. 371, no. 1987, p. 20120375, 2013.

[69] M. R. Mendonça and A. Ziviani, "Network-Based Procedural Story Generation," *Computers in Entertainment (CIE),* vol. 16, no. 3, pp. 1-18, 2018.