

Digital Twin implementation retrospective

Author1¹, Author2¹, Author3²

¹Institution1, City, Country, ² Institution2, City, County

author1@domain.com; author2@domain.com; author3@domain.com

Abstract. There have been some implementations of large-scale urban Digital Twins. However, this endeavor presents challenges in production, coordination, and long-term maintenance while preserving an alluring visual quality. This study presents three cases of large-scale urban digital environments, examining how those challenges were addressed using video game industry technology and evaluating them against three taxonomies described in recent literature to determine if any qualify as an actual Digital Twin. Lastly, we propose possible improvements to address a perceived lack of robustness in some criterias. Besides we comment on the possible use of this kind of tool for didactic use.

Keywords: Simulation, Urban Design, Visualization, Smart-Cities, Realtime

1 Introduccion

El concepto de Gemelo Digital (GD) es extremadamente atractivo a la hora de imaginarse el proceso de diseño y la gestión post-construcción.(Shahat et al., 2021)(Bolton et al., 2018). Pero cuando se presenta este concepto es probable que se mencione en conjunto a conceptos como simulación (Shafto et al., 2010), Big Data (Shafto et al., 2010), IOT(Shafto et al., 2010) o aprendizaje automático (Shafto et al., 2010). Esta cantidad de conceptos dificulta la comprensión de los límites y las características del GD. (Hu et al., 2021)

El objetivo de este trabajo es comprobar si las tres implementaciones de réplicas digitales de escala urbana enfocados en calidad visual y usabilidad de ESTUDIO XXX pueden ser consideradas GD.

2 Presentación del concepto de Gemelos Digitales

En 2001 el Dr. Michael Grieves presentó el ideal conceptual para mejorar la gestión del ciclo de vida de productos utilizando una representación digital del mismo. Con la característica que esta representación digital estaría ligada al objeto físico durante toda su vida útil. (Grieves, 2016). La utilización del concepto de GD para referenciar este vínculo se afianzó la industria aeroespacial (Grieves, 2016)

El concepto de GD ha tenido varias definiciones desde su ideación.(Shafro et al., 2010)(Grieves, 2016)(Batty, 2018)(Stark & Damerau, 2019). Aunque es necesario tener en cuenta los componentes elementales sin los cuales no se puede considerar el sistema como un GD. Además de los elementos imperativos, que aportan y definen el vínculo entre elemento físico y elemento digital.(Sharma et al., 2022). Si bien el concepto de GD es reciente (Grieves, 2016).

El vínculo del dominio digital y el físico es anterior (Krämer, 2013). Y algunas de las tecnologías que se han generado comparten componentes con GD (Sharma et al., 2022) Ninguna de las tecnologías generadas anteriormente cumple con todos los componentes elementales de GD. (Sharma et al., 2022)

3 Taxonomías

Teniendo en cuenta la definición de Grieves que un gemelo digital describe las características a nivel atómico (Grieves, 2016) descartamos la posibilidad de poder generar un GD que cumpla con esa característica. Pero se han presentado distintas taxonomías que aportan a la generación de un marco común para la descripción de nuevas implementaciones. (Fjeld, 2020)(Kritzinger et al., 2018)(Digital Twin, n.d.)(Grieves, 2016)

Los argumentos presentados por Grieves (Grieves, 2023) de porque la taxonomía de Gemelo Digital - Modelo Digital - Sombra Digital (Kritzinger et al., 2018) presenta fallos y complejidades al momento de utilizarla nos parecen acertados por lo que descartamos su utilización.

Además nos adherimos a su consideración que algunas distinciones no generan diferencia de categoría. Y creemos que no es imperante que la comunicación entre la réplica digital y la réplica física sea en tiempo real. A los efectos de este trabajo utilizaremos la existencia de un vínculo de comunicación para cada sentido propuesto por Grieves (Grieves, 2016) como componente elemental. Adicionamos la necesidad del vínculo de la réplica digital y la réplica física durante la vida de la réplica física.

Utilizaremos la taxonomía basada en la vida del producto presentada por Grieves (Grieves, 2016), la taxonomía basada en Índice de Maduración propuesta por Fjeld (Fjeld, 2020) y la categorización por niveles de complejidad según las métricas de Autonomía, Inteligencia, Aprendizaje y Fidelidad propuestas por la empresa ARUP (Digital Twin, n.d.) para categorizar las implementaciones presentadas.

4 Gemelos digitales en urbanismo

La concepción del GD se enfocó en la vida de un producto. (Grieves, 2016). Este fue adoptado y testeado en dominios similares como la robótica (Richart et al., 2023), la gestión manufactura inteligente (Becker et al., 2021)(Fuller et al., 2020) y la industria aeroespacial (Shafto et al., 2010). La cantidad y diversidad de sistemas superpuestos que componen una ciudad amplifican la dificultad inherente de implementar un GD. (Batty & Milton, 2023)(Shahat et al., 2021) A pesar de estas dificultades se han implementado varias soluciones buscando resolver casos de uso particulares.(Zarrinkafsh, 2023)(Amini et al., 2023)(Major et al., 2021)(Batty & Milton, 2023).

Previendo la posible aplicación del GD de una ciudad para la integración y colaboración de las partes involucradas (Batty & Milton, 2023)(Shahat et al., 2021) (Bolton et al., 2018) consideramos que es necesario pensar al GD como una herramienta comunicacional que pueda ser utilizada en varios entornos con distintos perfiles de usuario. Y coincidimos en el hecho que la representación de la ciudad en los casos implementados es sub-óptima (Shahat et al., 2021)

5 Implementaciones por ESTUDIO XXX

El objetivo de nuestras implementaciones fue mejorar la forma en la que se presenta un proyecto urbano a interlocutores ajenos a la disciplina.

Para lograr este objetivo nos enfocamos en reproducir el dominio físico con la mayor fidelidad posible, para lo cual es importante contar con versatilidad técnica y artística al momento de seleccionar el mejor medio de comunicación.

Cada implementación de este tipo de soluciones puede requerir el diseño y desarrollo de características particulares. Pero existe un ciclo de tareas que detectamos se mantiene común a todas esas implementaciones.

El primer paso es definir el tipo de entregable que mejor se adapta a las necesidades del cliente. Una vez definido el entregable final se realiza un

proceso de curado de información enviada por el cliente, generalmente vía e-mail, para corroborar incongruencias. Esta información es variada tanto en su nivel de desarrollo como en tipo de archivo. Varían desde esquemas y croquis generados a mano y escaneados, a planos aprobados para construcción generados bajo el paradigma BIM. Existe la posibilidad de recibir información en distinto nivel de desarrollo dependiendo de la disciplina que en su conjunto describe el objeto a modelar.

Luego se genera un modelo 3D de los elementos necesarios según información curada. Durante este proceso puede ser necesaria la generación de información adicional para lograr el efecto deseado en el entregable final.

El resultado del modelado se importa en el software de renderizado que sea necesario para realizar el proceso de texturizado e iluminación. Como última etapa se genera el producto entregable que se envía al cliente.

La distinción de renderizado offline y renderizado en tiempo real que se marca en la Figura 3 es por la capacidad de reproducir los fenómenos de luz sobre los materiales de mayor o menor medida.

5.1 Calidad visual

En cuanto a los criterios de calidad visual, la belleza en los modelos digitales en el contexto de la visualización y planificación urbana puede apreciarse desde varias perspectivas interrelacionadas. La experiencia inmersiva de un gemelo digital, al ofrecer una simulación realista, puede evocar una forma de belleza sublime al transportar a los usuarios a un entorno virtual convincente y provocar una respuesta emocional profunda, tal como se sugiere en "A Philosophical Enquiry into the Origin of Our Ideas of the Sublime and Beautiful" (Burke, Edmund, 1757), donde el sublime se relaciona con la capacidad de una experiencia para trascender lo ordinario y generar una profunda emoción.

Asimismo, estos modelos digitales permiten una precisión y orden en la representación y simulación de entornos urbanos, resaltando la belleza al transformar la complejidad del mundo real en un formato ordenado y accesible, como indica Michael Batty en "Inventing Future Cities" (Batty, 2018, p.145).

La belleza de los gemelos digitales también se encuentra en su capacidad para contar historias y reflejar significados profundos. Estos entornos virtuales pueden narrar la evolución de una ciudad. (Turkle, Sherry, 2011, p.89). Este concepto resuena con la teoría de Victor Papanek en "Design for the Real World", quien afirma que *el diseño debe contar una historia y reflejar los valores y aspiraciones de la sociedad* (Papanek, 1971, p.93). Los modelos

digitales presentados en este artículo muestran el crecimiento urbano, se han ido construyendo en paralelo al avance de las ciudades, y pueden ser apreciados por su capacidad para transmitir estos significados así como también las experiencias de sus usuarios, añadiendo así una capa de belleza conceptual.

Estos aspectos contribuyeron a optar por una visual hiperrealista en estos modelos, lo cual resulta crucial para replicar con precisión los entornos físicos y proporcionar datos valiosos para sus aplicaciones en las áreas de arquitectura y urbanismo. En “Challenges when creating a cohesive digital twin ship: a data modelling perspective” (Fonseca, Gaspar, 2021) se destaca que el hiperrealismo contribuye a una mejor comprensión y previsión de comportamientos en el mundo real. Esta precisión es vital en arquitectura y urbanismo, donde decisiones basadas en modelos virtuales hiperrealistas pueden impactar significativamente los resultados del mundo real.

El hiperrealismo en los gemelos digitales no solo mejora la percepción visual, sino que también facilita una mejor toma de decisiones basada en la precisión de la simulación. (Flavián et al., 2019)

Esto se traduce directamente a la implementación de tecnologías avanzadas en Unreal Engine, como la iluminación global y los sistemas de simulación de clima a partir de la herramienta Ultra Dynamic Sky (UDS), que permiten ajustar dinámicamente la iluminación del sol y la luna, creando escenarios realistas y cinematográficos con un alto grado de realismo. *La calidad visual y la precisión de los reflejos y sombras son esenciales para que los usuarios acepten la realidad virtual como una extensión del mundo físico* (Slater, 2009). Este concepto refuerza la necesidad de herramientas avanzadas como las ofrecidas por Unreal Engine 5 para alcanzar este nivel de realismo, dentro de ellas destacamos el uso de Lumen, el sistema de iluminación global en tiempo real, el cual permite simulaciones precisas de cómo la luz interactúa con materiales y superficies, facilitando la creación de entornos virtuales que reflejan con exactitud los comportamientos lumínicos del entorno físico.

Un elemento esencial en la construcción de un gemelo digital hiperrealista es el ciclo día-noche combinado con las condiciones climáticas. UDS facilita transiciones suaves entre el día y la noche, cruciales para recrear un entorno natural continuo. *Una representación realista es fundamental para la inmersión y la interacción efectiva* (Milgram Kishino, 1994). La simulación precisa de condiciones climáticas, como nubes y niebla volumétrica, mejora la percepción de profundidad y atmósfera, permitiendo al gemelo digital responder dinámicamente a los cambios ambientales.

La creación y elección de materiales es otro aspecto fundamental para la búsqueda de hiperrealismo. *El realismo en gráficos por computadora*

depende en gran medida de qué tan bien se simulan los materiales para interactuar con la luz (Watt Alan, 2000, p. 326). Para nuestros modelos tridimensionales utilizamos diferentes técnicas de mapeado y texturizado, así como también máscaras de desplazamiento, mapas de normales y materiales PBR (Physically Based Rendering). Ian Bogost en "Play Anything: The Pleasure of Limits, the Uses of Boredom, and the Secret of Games" afirma que *la belleza en la innovación tecnológica se manifiesta a través de la creatividad y el diseño disruptivo*, (Bogost Ian, 2021, p. 112) destacando cómo la incorporación de tecnologías avanzadas como el PBR y el renderizado en tiempo real transforma la experiencia y apreciación de los entornos urbanos.

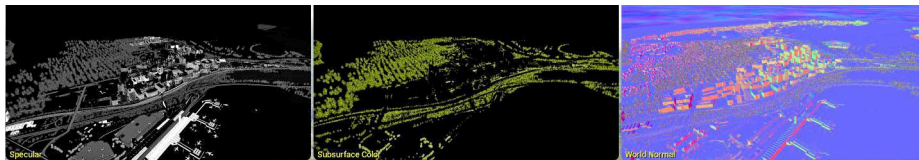


Figura 1. Análisis y Visualización Multicanal de Renderizado en tiempo real tomado de Unreal Engine 5 del proyecto National Landing. Generación propia.

5.2 Elementos

La gestión y visualización de información de los distintos sistemas que componen la ciudad es compleja debido a su heterogeneidad y gran volumen (Shahat et al., 2021). ESTUDIO XXX se enfoca en diez conjuntos particulares que ha detectado que definen de forma aceptable la percepción de un espacio urbano para solventar esta dificultad. Teniendo como criterio para su selección la posibilidad de navegar en el entorno digital con las mismas referencias topológicas que se haría en el entorno físico. (Lynch, 1964) Estas son: calles, veredas, cordones, manzanas, edificaciones, equipamiento urbano, vegetación, vehículos, peatones y topografía.

Para solventar la gestión de detalle de todos estos elementos nos apoyamos en tecnologías estándar de la industria del videojuego además de tecnologías únicamente presentes en Unreal Engine. Al trabajar en una herramienta pensada para generar videojuegos la configuración de estas tecnologías en nuestros proyectos no presenta dificultades. Aunque es necesario considerar los requerimientos y limitaciones de cada tecnología al momento del modelado y desarrollo del proyecto.

6 Casos implementados

6.1 National Landing, Virginia, USA.



Figura 2. Imágen aérea tomada de Unreal Engine 5 del proyecto “National Landing”.
Generación propia.

Proyecto urbano de 5km x 1km de extensión

Período: 2019 a la fecha

Edificios modelados: 50+

Entregables posibles: imágenes estáticas, videos, imágenes 360, recorridos en tiempo real en plataforma web, centro de ventas con interfaz remota.

Actualización: semanal mediante proceso manual

Incluye información para construcción: No

Procesos resueltos de forma autónoma: Ninguno

Sistemas de decisión implementado: Ninguno

Sistema de aprendizaje implementado: Ninguno

6.2 City Ridge, Washington D.C, USA.



Figura 3. Proyecto “City Ridge” tomado de Unreal Engine. Generación propia

Proyecto urbano de 0.1 km x 0.5km de extensión

Período: 2019 a 2022

Edificios modelados:

Entregables posibles: Realidad Virtual, imágenes estáticas, imágenes 360, recorridos en tiempo real, plataforma web, centro de ventas con interfaz táctil

Actualización: semanal mediante proceso manual

Incluye información para construcción: No

Procesos resueltos de forma autónoma: Ninguno

Sistemas de decisión implementado: Ninguno

Sistema de aprendizaje implementado: Ninguno

6.3 La Tahona, Canelones, Uruguay.



Figura 4. Proyecto “La Tahona” tomado de Unreal Engine. Generación propia.

Proyecto urbano de 2 km x 1km de extensión

Período: 2021 a la fecha

Edificios modelados:

Entregables posibles: Imágenes estáticas, videos, recorridos en tiempo real, centro de ventas con interfaz remota

Actualización: semanal mediante proceso manual

Incluye información para construcción: No

Procesos resueltos de forma autónoma: Ninguno

Sistemas de decisión implementado: Ninguno

Sistema de aprendizaje implementado: Ninguno

7 Categorización de implementaciones presentadas según las taxonomías definidas

Teniendo en cuenta las características de nuestro proceso, la información presentada y el proceso de investigación para este artículo. Concluimos que tanto la implementación de X1 y X3 se podrían considerar un Gemelo Digital porque cumplen con los componentes elementales. Existe una ciudad física, existe una representación digital de esa ciudad. Y existe el vínculo entre ambas por medio de un agente inteligente.(Grieves, 2019). En cuanto a X2 consideramos que no es un GD porque ya no existe vínculo entre la réplica digital y la réplica física porque el ciclo de actualizaciones no continúa.

Creemos que la categoría que mejor describe nuestras implementaciones que consideramos GD es la de Instancia de Gemelo Digital (Grieves, 2016) ya que la réplica digital describe la ciudad física. La necesidad de incluir conjuntos de información como criterio de aceptación es dependiente del caso de uso (Grieves, 2016). Considerando que nuestro objetivo es la comunicación eficiente, no tomamos este criterio como necesario para nuestro caso.

Considerando la taxonomía propuesta por Fjeld (Fjeld, 2020) todos los proyectos presentados serían Nivel 100 (Gemelo Estático) porque no contienen información de los objetos.

Según la taxonomía presentada el texto de la empresa ARUP (Digital Twin, n.d.) podríamos definir todos los proyectos presentados como Autonomía: 1 porque todos son carentes de autonomía, Inteligencia: 1 porque todos son carentes de inteligencia, Aprendizaje: 1 ninguno posee un componente de aprendizaje. Podemos afirmar que cumple con Fidelidad: 1 porque el nivel de detalle de los modelos es superior a un modelo conceptual. Consideramos que nuestras implementaciones cumplen con el requerimiento de Fidelidad: 3.

Pero la literatura no presenta forma clara de corroborar que un modelo puede ser utilizado como representación fiable del mundo físico (Digital Twin, n.d. pp 22) Traducción por López, R. Proponemos utilizar como criterio para corroborar este punto en GD de ciudades cuyo objetivo sea la colaboración de partes involucradas que para navegar en el entorno digital se utilicen las mismas referencias topológicas que se haría en el entorno físico. (Lynch, 1964)

8 Conclusiones

Concluimos que si bien cumplimos con los componentes elementales de GD propuestos por el creador del concepto (Grieves, 2016) en algunas de las implementaciones presentadas. La dependencia de la continuidad de alguna variable externa para argumentar que existe un canal de comunicación bi direccional entre la réplica digital y la réplica física quita robustez a la categorización.

Como una posible solución consideramos que al momento de iniciar con el proceso de creación de un GD se debería generar una representación digital cuya existencia sea independiente de desarrollador y cliente involucrados en el proceso de creación del GD. Por lo que nos adherimos a la idea de integrar Blockchain a GD (Raj, 2021) (Sadri et al., 2023). Particularmente como parte de la definición de los conceptos fundamentales de vínculo bi direccional y representación digital de GD.

Además concluimos que la utilización de Unreal Engine como herramienta es correcta porque logramos una calidad visual que es aceptable considerando que el renderizado es en tiempo real. Además consideramos que su característica de código abierto y que la herramienta sea utilizada en otras industrias valida nuestra decisión de continuar utilizando Unreal Engine a largo plazo. Juzgamos esta estabilidad a futuro posibilita la generación evolutiva de un GD urbano. Pensamos que desarrollar esta idea en el ámbito universitario habilitaría un entorno de experimentación y presentación de nuevas ideas.

9 Prospectivas a partir de este caso de estudio

Nuestro objetivo principal a corto plazo es poder categorizar nuestra solución como Nivel 300 (Gemelo de Obra Terminada) según la taxonomía de Fjalalp. Y como Autonomía: 2, Inteligencia: 2, Aprendizaje: 2 y Fidelidad: 3.

Para lograr esto nos vamos a enfocar en el proceso regular de ingesta de datos geoespaciales abiertos en Unreal Engine para los proyectos X1 y X3.

Como objetivos secundarios intentaremos integrar modelos BIM e implementaremos un prototipo para simulación de tráfico de vehículos y peatones.

Referencias

- AShahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su13063386>
- Hu, W., Zhang, T., Deng, X., Liu, Z., & Tan, J. (2021). Digital twin: A state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 2, 1–34. <https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2020-010>
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keaney, E., Kemp, A., Luck, A., Pawsey, N., Saville, S., Schooling, J., Sharp, M., Smith, T., Tennison, J., Whyte, J., Wilson, A., & Makri, C. (2018). *Gemini Principles*. CDBB. <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2010). *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap*.
- Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 30, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- Grieves, M. (2016). *Origins of the Digital Twin Concept*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital Twin. In S. Chatti & T. Tolio (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (pp. 1–8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1
- Batty M. Digital twins. *Environ Plan B Urban Anal City Sci*. 2018;45(5):817-820
- Fjeld, T. M. B. (2020). *Digital Twin—Towards a joint understanding within the AEC/FM sector* [Master thesis, NTNU]. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2779306>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Krämer, B. (2013). *Evolution of Cyber-Physical Systems: A Brief Review* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7336-7>
- Digital twin: Towards a meaningful framework. (n.d.). Retrieved July 19, 2024, from <https://www.arup.com/insights/digital-twin-towards-a-meaningful-framework/>

- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, PP, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Grieves, M. (2023). *Digital Model, Digital Shadow, Digital Twin*.
- Batty, M., & Milton, R. (2023). *Building a Digital Twin for British Cities* (arXiv:2312.03674). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.03674>
- Becker, F., Bibow, P., Dalibor, M., Gannouni, A., Hahn, V., Hopmann, C., Jarke, M., Koren, I., Kröger, M., Lipp, J., Maibaum, J., Michael, J., Rumpe, B., Sapel, P., Schäfer, N., Schmitz, G. J., Schuh, G., & Wortmann, A. (2021). A Conceptual Model for Digital Shadows in Industry and Its Application. In A. Ghose, J. Horkoff, V. E. Silva Souza, J. Parsons, & J. Evermann (Eds.), *Conceptual Modeling* (Vol. 13011, pp. 271–281). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89022-3_22
- Richart, M., Velázquez, F., Ciuffardi, F., Visca, J., & Baliosian, J. (2023). CoCoSim: A Tool for Co-simulation of Mobile Cooperative Robots. In P. Masci, C. Bernardeschi, P. Graziani, M. Koddembrock, & M. Palmieri (Eds.), *Software Engineering and Formal Methods. SEFM 2022 Collocated Workshops* (pp. 258–268). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26236-4_22
- Amini, S., Orlich, C., Beil, C., Keler, A., & Bogenberger, K. (2023). *Integrating SUMO in an urban digital twin—A case study from Munich*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30752.15364>
- Zarrinkafsh, H. (2023). How to Approach Technical Challenges in the development of Urban Digital Twins in Smart Cities. Case Study: Tallinn, Estonia. *García Amen, F, Goni Fitipaldo, A L and Armagno Gentile, Á (Eds.), Accelerated Landscapes - Proceedings of the XXVII International Conference of the Ibero-American Society of Digital Graphics (SIGraDi 2023), Punta Del Este, Maldonado, Uruguay, 29 November - 1 December 2023, Pp. 125–136*. https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2023_420
- Major, P., Li, G., Hildre, H. P., & Zhang, H. (2021). The Use of a Data-Driven Digital Twin of a Smart City: A Case Study of Ålesund, Norway. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(7), 39–49. <https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9549127>
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*. MIT Press.
- Grieves, M. (2019). Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins (pp. 175–200). <https://doi.org/10.2514/5.9781624105654.0175.0200>
- Raj, P. (2021). Chapter Thirteen—Empowering digital twins with blockchain. In S. Aggarwal, N. Kumar, & P. Raj (Eds.), *Advances in Computers* (Vol. 121, pp. 267–283). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2020.08.013>
- Raj, P. (2021). Chapter Thirteen—Empowering digital twins with blockchain. In S. Aggarwal, N. Kumar, & P. Raj (Eds.), *Advances in Computers* (Vol. 121, pp. 267–283). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2020.08.013>