

# IV Seminario de Innovación Docente en Automática

León (España), 10, 11 y 12 de Enero de 2018

## Realidad virtual y minería de procesos aplicadas a la formación de operarios en tareas de ensamblado complejo

Elena Crespo, Juan Jesús Roldán\*, Andrés Martín-Barrio, Jaime del Cerro, Antonio Barrientos

Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC), Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal, 2, 28006, Madrid, España.

---

### Resumen

Una de las propuestas de la Industria 4.0 es la integración de máquinas y operarios por medio de conexiones en red y gestión de la información. Uno de los problemas que se pueden abordar con este enfoque es la gestión del conocimiento en la industria o, en otras palabras, la transmisión del conocimiento de los operarios expertos a los nuevos. Este trabajo ha desarrollado un sistema que combina el uso de Realidad Virtual y Minería de Procesos para llevar a cabo esta transmisión de conocimiento en el caso particular de las tareas de ensamblado. La Realidad Virtual permite crear un entorno de trabajo que reproduce el real e interactuar con él sin distraer recursos a otros procesos ni afrontar los riesgos de trabajar con sistemas reales. Por su parte, la minería de procesos permite adquirir el conocimiento de los expertos, almacenarlo en forma de modelos y luego transmitirlo a los aprendices. El sistema desarrollado se ha puesto a prueba mediante varios ejemplos de montajes con Lego.

#### Palabras Clave:

Industria, Realidad virtual, Adquisición de datos, Procesamiento de datos, Educación, Entrenamiento.

### Virtual reality and process mining applied to operator training in complex assembly tasks

#### Abstract

One of the proposals of Industry 4.0 is the integration of machines and operators through network connections and information management. One of the challenges that can be addressed following this approach is the management of knowledge in the industry or, in other words, the transmission of knowledge from the expert operators to the new ones. This work has been developed a system that combines Virtual Reality and Process Mining to allow this knowledge transmission in the particular case of assembly tasks. Virtual Reality allows to create work environments that reproduce the real ones and interact with them without detracting resources of other processes or facing the risks of working with real systems. Process Mining allows to acquire the knowledge of experts, store it in models and then transmit it to novices. The developed system has been tested by means of several examples of assemblies with Lego.

#### Keywords:

Industry, Virtual reality, Data acquisition, Data processing, Education, Training.

---

### 1. Introducción

La Industria 4.0 busca la integración de todos los agentes implicados en la producción (maquinaria, robots y operarios) en forma de sistemas ciberfísicos mediante conexiones en red y gestión de la información (Hermann, Pentek et al. 2016). Algunos de los conceptos clave de la Industria 4.0 son el internet de las cosas, el análisis de datos, la computación en la nube, la robótica, la inteligencia artificial o la realidad virtual y aumentada.

A día de hoy, uno de los grandes retos a los que se enfrentan las organizaciones es la gestión del conocimiento.

De hecho, la transmisión del conocimiento adquirido por los trabajadores expertos a los nuevos suele ser crítica para su supervivencia. En el caso de la industria este conocimiento puede estar relacionado con la gestión eficiente de los procesos o el desmontaje, inspección, reparación y montaje de máquinas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema que permita la transmisión del conocimiento en el contexto de las tareas de ensamblado complejo. Este sistema debe permitir tanto la incorporación del conocimiento de expertos como la posterior formación de aprendices. En ambos casos el sistema

---

\*Autor para la correspondencia: [jj.roldan@upm.es](mailto:jj.roldan@upm.es)

debe proporcionar una interfaz intuitiva que facilite su uso y agilice el proceso.

Por ello, el sistema se ha desarrollado combinando el uso de realidad virtual y minería de procesos. La realidad virtual se ha empleado para recrear los entornos de trabajo y permitir la interacción con sus elementos. Esto permite el aprendizaje en un entorno similar al real sin perjudicar la productividad de los procesos o asumir los riesgos de trabajar en el entorno real. Por su parte, la minería de procesos se ha empleado para adquirir, guardar y mostrar el conocimiento. Estas técnicas permiten obtener un modelo de montaje a partir de las operaciones de los operarios expertos y luego emplear este modelo para dar instrucciones a los operarios novatos.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: La Sección 2 describe las tecnologías emergentes empleadas en este trabajo: realidad virtual y minería de procesos. La Sección 3 explica con detalle el diseño del sistema de formación de operarios. Por último, la Sección 4 resume las principales conclusiones de este trabajo y las líneas abiertas para el futuro.

## 2. Tecnologías emergentes

Como se ha adelantado, la propuesta de este trabajo conlleva el uso de dos tecnologías emergentes y fuertemente relacionadas con la Industria 4.0: la realidad virtual, que se describe en la Sección 2.1, y la minería de procesos, que se explica en la Sección 2.2.

### 2.1. Realidad virtual

“La realidad virtual es una representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real” (Academia De La Lengua 1992). El principal objetivo de esta tecnología es la creación de un mundo ficticio del que un usuario puede formar parte o, incluso, ser el protagonista.

Actualmente, este nuevo concepto de realidad se consigue a través de gafas que permiten una gran inmersión sensorial en entornos generados de forma artificial. Sin embargo, dichos escenarios pueden ser hipotéticos o estar basados en entornos reales. Entre sus aplicaciones destacan ámbitos como el entretenimiento y videojuegos (Bolton, Lambert et al. 2014), la educación (Von Zadow, Buron et al. 2013), la medicina (McCloy and Stone 2001), los deportes (Bideau, Kulpa et al. 2010), el modelado de sistemas (Sánchez-Alonso, Ortega-Moody et al. 2017), el turismo (Guttentag 2010), la ingeniería (Roldán, Peña-Tapia et al. 2017) o la exploración espacial (McGreevy 1993).

La realidad virtual también puede ser una potente herramienta en la venidera Industria 4.0, ya que encaja a la perfección en las necesidades de digitalización de la información. En este contexto, puede considerarse como un tipo de sistema ciberfísico (Gorecky, Schmitt et al. 2014). Un análisis histórico del uso de esta tecnología en la industria se puede leer en (Choi, Jung et al. 2015).

De acuerdo a algunos autores, la realidad virtual puede ser usada para ilustrar información relevante con el fin de realizar colaboraciones más efectivas (Brettel, Friederichsen et al. 2014), o también aportar valor añadido a la hora de intervenir en tiempo real en entornos industriales cambiantes. Sus aportaciones pueden encontrarse en diferentes actividades, como en la concepción, diseño y dimensionamiento de equipos y procesos, en el entrenamiento de operarios para el desarrollo de tareas complejas, en la supervisión y mantenimiento de procesos, o en el tratamiento de incidencias, alarmas y excepciones.

En el contexto de este trabajo, la realidad virtual aporta múltiples ventajas. En primer lugar, la utilización de escenarios virtuales en lugar de los reales supone un ahorro en el uso de recursos de la industria. Esto hace que las actividades de formación sean más ágiles (no están sujetas a restricciones de tiempo o recursos) y no tengan impacto en la producción (ya sea por el uso de los recursos o por el riesgo de avería). En segundo lugar, las interfaces inmersivas son más favorables para el aprendizaje que las convencionales, dado que refuerzan el conocimiento del entorno y permiten la interacción con sus elementos.

### 2.2. Minería de procesos

La minería de procesos es una ciencia que abarca el modelado, evaluación y mejora de los procesos a partir de la información contenida en registros de eventos (Van der Aalst 2011). Por lo tanto, la minería de procesos está a medio camino entre el análisis tradicional de procesos y las técnicas modernas de minería de datos. Como se muestra en la Figura 1, la minería de procesos trabaja entre procesos, registros de eventos y modelos.

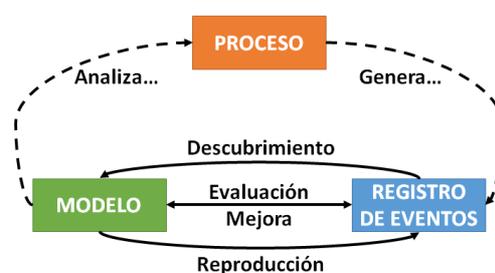


Figura 1: Diagrama de la minería de procesos (Van der Aalst 2011).

Los registros de eventos son recopilaciones de los eventos que tienen lugar en el proceso ordenados temporalmente. Estos eventos suelen contener la siguiente información: caso (identificador de la ejecución del proceso), actividad (operación que forma parte del proceso), tiempo (fecha y hora del operación), recursos (agente que ha realizado la operación) y otros datos que puedan ser útiles para el estudio de cada proceso específico.

Los modelos son representaciones del proceso que permiten su estudio, comprensión, visualización o reproducción. Entre los modelos habituales de la minería de procesos se encuentran los sistemas de transiciones (Van der Aalst, Rubin et al. 2006) las redes de Petri (Van der Aalst 1998), los modelos y notaciones de procesos de negocio

(Dijkman, Dumas et al. 2008) o las redes causales (Van der Aalst, Adriansyah et al. 2011).

Por último, la minería de procesos engloba tres técnicas: el descubrimiento de modelos a partir de registros de eventos, la reproducción de modelos para generar registros de eventos y la evaluación y mejora de modelos con registros de eventos. Un caso de uso de estas técnicas en el contexto de la robótica puede leerse en (Roldán, Olivares-Méndez et al. 2017).

### 3. Propuestas para la formación de operarios

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado Unity, un entorno de desarrollo de videojuegos en el que se ha creado un escenario, como el de la Figura 2, compuesto por una superficie en la que están dispuestas piezas cúbicas que se pueden ensamblar por cualquiera de las seis caras. Además, se utiliza la herramienta Steam VR para reproducir la realidad virtual.

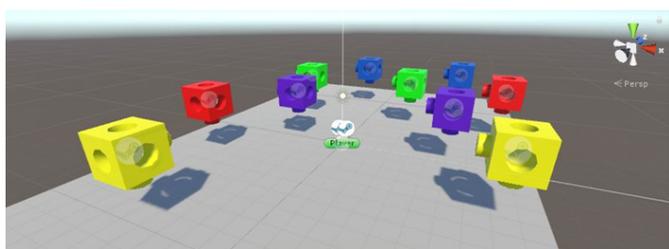


Figura 2: Escenario de los montajes recreado en Unity.

El sistema cuenta con dos etapas diferenciadas. La primera, en la que el usuario entrena al sistema, se describe en la Sección 3.1, mientras que la segunda, en la que el sistema entrena al usuario, se explica en la Sección 3.2.

#### 3.1. Modo experto

En esta etapa los operarios expertos realizan varias veces los montajes basándose en sus conocimientos y experiencia. Conforme se completan las actividades de ensamblado se crean los registros de eventos. Como se muestra en la Tabla 1, en estos registros se guarda la actividad realizada, el identificador del caso, el tiempo y el usuario que lo realiza.

Tabla 1: Registro de eventos.

Caso	Actividad	Tiempo	Recurso
1	1	0:23	Fernando
1	2	0:38	Fernando
1	3	1:04	Fernando
2	1	0:17	Claudia
2	4	0:36	Claudia
2	5	0:56	Claudia
3	2	0:48	Fernando
3	1	1:37	Fernando
3	6	2:08	Fernando

La actividad de la tabla anterior hace referencia al registro de actividades, representado en la Tabla 2. Este registro proporciona información sobre la pieza o conjuntos de piezas involucrados en la actividad de ensamblado (origen y

objetivo), la orientación de la cara sobre la que se ensamblan las dos piezas (aproximación) y, en caso de que sean conjuntos de varias piezas, la pieza concreta que realiza la actividad (origen activo y objetivo activo).

Tabla 2: Registro de eventos.

Actividad	Origen	Objetivo	Aprox.	Orig. activo	Obj. activo
1	A	B	12	-	-
2	B	C	34	-	-
3	A12B	C	34	B	-
4	C	B	43	-	-
5	B34C	A	21	B	-
6	A	B34	12	-	B

Ambas tablas se van rellenando a medida que el usuario completa el montaje. Cualquier movimiento correcto queda registrado como un evento realizado, de modo que si este no aparecía en el registro de tareas, se creará una nueva actividad y posteriormente se guarda el evento con el indicador de la actividad correspondiente, para así asegurar que movimientos idénticos lleven el mismo indicador.

Dado que las operaciones que van a realizar los operarios expertos se desconocen a priori, los movimientos en esta etapa sólo están restringidos por la pieza que se utilice. Se acepta una actividad como completada correctamente siempre que las piezas sean susceptibles de ser ensambladas por las caras implicadas, propiedad que depende de tipo de pieza y de la disponibilidad de la cara.

El progreso del montaje se recoge en una cadena de caracteres y se codifica de la siguiente manera:

- Las piezas quedan identificadas por una serie de letras y números. Las letras representan el tipo de pieza. Se asignan alfabéticamente, en mayúsculas, a las piezas seleccionadas para el montaje. Si se necesitase más de una letra, solo la primera sería mayúscula. Por otro lado, los números distinguen las piezas de la misma clase. Algunos ejemplos son A32, Gf9 y B1.
- La aproximación con la que dos piezas se encajan se designa con dos cifras que corresponden con las caras en contacto. La Figura 3 muestra la asignación de números a cada cara. Se utiliza para la cara derecha el 1, para la izquierda el 2, para la superior el 3, para la inferior el 4, para la anterior el 5 y finalmente para la cara posterior el 6. Por ejemplo, el 34 indica que se ha conectado la cara 3 (superior) de la pieza fija con la cara 4 (inferior) de la pieza móvil.
- Las piezas van entre paréntesis para no confundir las cifras del final de la pieza con las cifras que indican la aproximación. Por ejemplo, (A32)34(Gf9)56(B1).
- Si una pieza cuenta con más de dos conexiones, se trata de una bifurcación, y se codifica con el carácter '/' al final de la cadena de caracteres seguido de la pieza que nace de la bifurcación y el resto de conexiones que correspondan.
- Las bifurcaciones de bifurcaciones se tratan como en el punto anterior.

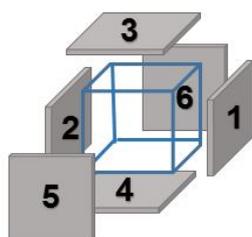


Figura 3: Codificación de las caras de una pieza.

La Figura 4 muestra algunos ejemplos de códigos.

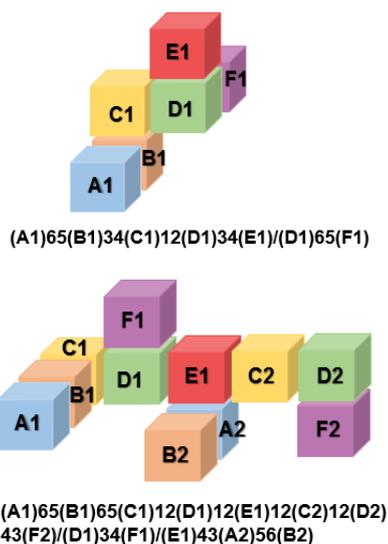


Figura 4: Ejemplos de ensamblajes con sus correspondientes códigos.

Por otra parte, puede darse el caso que el mismo estado final sea codificado de manera distinta dependiendo del orden de actividades que se haya realizado. Por esta razón, cada vez que finalice una actividad es necesario ordenar la codificación de modo que sólo exista un nombre para cada montaje. Para la llevar a cabo esta función se utilizan los siguientes criterios:

- La cadena principal es la cadena más larga. A igualdad de longitud, se tienen en cuenta todas las conexiones de la cadena principal, de modo que la que tenga más conexiones de tipo 12 que de tipo 21, tiene prioridad. Si este criterio no fuese decisivo, se pasa a contabilizar las conexiones de tipo 34 sobre las de tipo 43 y finalmente las de tipo 56 sobre las de tipo 65.
- Las bifurcaciones se nombran por orden de aparición.
- Las bifurcaciones de bifurcaciones se nombran antes de pasar a la siguiente bifurcación de la cadena principal.

Los ejemplos de la Figura 6 demuestran la necesidad de esta ordenación.

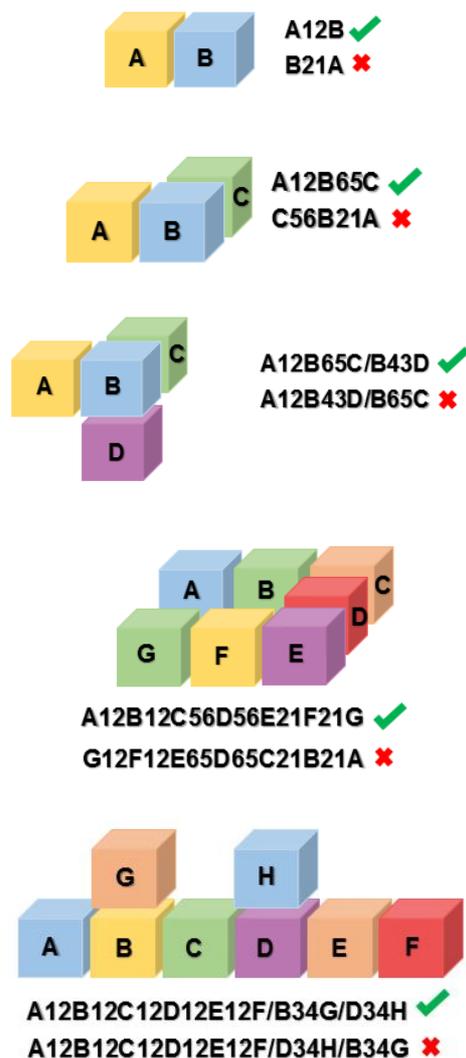


Figura 6: Codificaciones correctas e incorrectas para distintos montajes.

Cabe destacar que cuando se guardan en los registros de actividades las piezas y conjuntos de piezas utilizadas, no debe aparecer el número que identifica a la pieza, ya que la actividad es la misma independientemente de la pieza concreta que sea empleada (por ejemplo: A34Gf56B). Sin embargo, si la cadena principal tiene dos piezas del mismo tipo y de ellas nace alguna bifurcación, como muestra la Figura 5, al simplificar la codificación sin concretar la pieza, se pierde información y no sería posible distinguir a cuál de ellas pertenece la bifurcación o si varias bifurcaciones pertenecen a la misma. Para resolver esta cuestión, tras el carácter ‘/’ se especifica entre corchetes con un número que identifica a cuál de las piezas de ese tipo se refiere, atendiendo al orden en el que aparecen en la codificación.

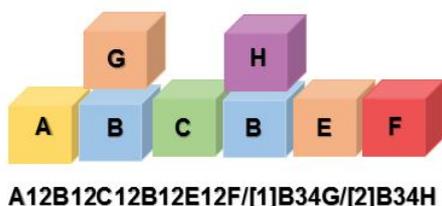


Figura 5: Ejemplo en el que se emplea dos veces la misma pieza.

Una vez realizados un número significativo de montajes, los registros de eventos se deben transformar en modelos. Esto está justificado porque los modelos aportan más información que los registros de eventos. Por ejemplo, mientras que los registros de eventos sólo contienen secuencias de actividades, los modelos pueden detectar relaciones de causalidad o paralelismo.

Esta conversión se lleva a cabo en dos pasos. En el primero, el registro de eventos es introducido en la aplicación Disco (Günther and Rozinat 2012), que permite realizar una visualización del mismo, filtrar los eventos erróneos o seleccionar los interesantes y guardar el mismo en un formato estándar. En el segundo, este registro es cargado en el programa PROM (Verbeek, Buijs et al. 2010) y el algoritmo Inductive Miner es utilizado para obtener una red de Petri a partir de él. Este algoritmo demostró ser el más preciso y robusto en la comparación realizada en (Roldán, del Cerro et al. 2017).

### 3.2. Modo aprendiz

En esta etapa se asiste al operario aprendiz para realizar el mismo montaje que el operario experto ha completado en la etapa anterior.

Como se muestra en la Figura 7, a partir del modelo generado por la minería de procesos se obtiene un registro de tareas. Esta tabla contiene las posibles secuencias de actividades que se recomienda realizar al usuario. Estas trazas se obtienen a partir del modelo del proceso y representan caminos en una red de Petri. A cada configuración de la red de Petri se le asigna un número y cada transición es una actividad descrita en el registro de actividades creado en el modo experto.

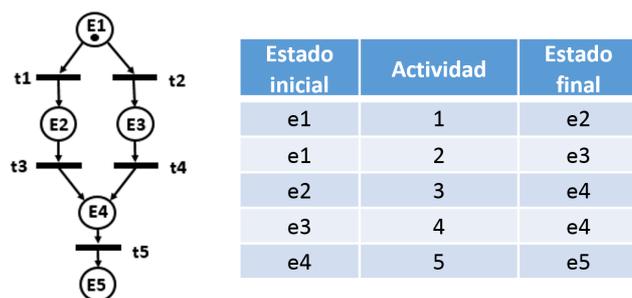


Figura 7: Red de Petri y registro de tareas.

Para que el proceso de aprendizaje sea más eficiente y rápido el operario aprendiz recibe pautas para realizar el montaje. El nivel de ayuda recibida es configurable antes de comenzar la etapa para no aportar información innecesaria y gradualmente poder retirar el apoyo que proporciona el sistema. Las pautas se pueden suministrar mediante alguno de los siguientes métodos:

- Recomendar el siguiente paso. La pieza que el operario aprendiz debe seleccionar para iniciar la siguiente actividad recomendada, conocido el estado

del montaje en el que se encuentra, se resalta entre el resto de piezas. Si desde un estado nacen dos o más transiciones, se marcan todas las recomendaciones posibles.

- Marcar objetivo. Una vez el usuario haya cogido una de las piezas, la pieza objetivo queda determinada por la actividad que se desempeña. En este paso, es interesante no solo marcar la pieza con la que concluye la actividad sino también el tipo de aproximación, como muestra la figura 8. En consecuencia, la marca indica, además, la cara que corresponde. Es posible que desde un estado salgan dos o más transiciones que sean actividades que comiencen con la misma pieza pero tengan distinto objetivo. Por lo que, la actividad no queda establecida hasta que no se complete y ambas piezas se señalan.
- Vista previa del siguiente paso. El usuario observa una imagen de las dos piezas o conjuntos de piezas que se van a ensamblar en la siguiente actividad, junto con una indicación de cuáles son las caras que se utilizan.
- Vibración. Si se coge una pieza que no se encuentra entre las recomendadas para ese estado, o se intenta ensamblar con otra que no corresponde con la pieza objetivo, se considera como un error y el sistema devuelve la pieza al lugar donde estaba inicialmente y hace que los controladores.



Figura 8: Recomendación del siguiente paso.

Es importante mencionar que, como se ha explicado en la Sección 3.1, si no se ordenase la cadena de caracteres que representa el progreso del montaje cada vez que se completa una actividad, no sería posible marcar los objetivos y comprobar si se sigue un camino correcto para completar el montaje.

## 4. Conclusiones

Este trabajo propone la aplicación de dos disciplinas recientes como la realidad virtual y la minería de procesos en el ámbito industrial. En concreto, el trabajo presenta una guía interactiva para la realización de montajes, que adquiere el conocimiento de los operarios expertos y lo transmite a los aprendices.

Las principales aportaciones del trabajo son la creación de un entorno virtual para que trabajen los operarios y el establecimiento de un procedimiento para la transferencia del conocimiento. Además, el trabajo propone un sistema de

codificación para piezas y montajes obtenido tras numerosas pruebas que permite el funcionamiento completo de la guía.

En trabajos futuros, este sistema se va aplicar en contextos industriales, asistiendo al montaje de máquinas y/o robots. Además, se van a realizar pruebas con múltiples personas desempeñando los papeles de operarios expertos y aprendices para validar los diferentes aspectos de la interfaz.

## Agradecimientos

Esta investigación ha recibido fondos del proyecto SAVIER (Situational Awareness Virtual Environment) dirigido por Airbus Defence & Space, el proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea, y del proyecto DPI2014-56985-R (Protección robotizada de infraestructuras críticas), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

## Referencias

- Academia De La Lengua, R. A., R. E. Calpe and E. Secundaria (1992). "Diccionario de la Lengua Española vol. I." Real Academia Española, Madrid.
- Bideau, B., R. Kulpa, N. Vignais, S. Brault, F. Multon and C. Craig (2010). "Using virtual reality to analyze sports performance." *IEEE Computer Graphics and Applications* 30(2): 14-21.
- Bolton, J., M. Lambert, D. Lirette and B. Unsworth (2014). PaperDude: a virtual reality cycling exergame. *CHI'14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM.
- Brettel, M., N. Friederichsen, M. Keller and M. Rosenberg (2014). "How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective." *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering* 8(1): 37-44.
- Choi, S., K. Jung and S. D. Noh (2015). "Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions." *Concurrent Engineering* 23(1): 40-63.
- Dijkman, R. M., Dumas, M. and Ouyang, C. (2008). Semantics and analysis of business process models in BPMN. *Information and Software Technology*, 50(12), 1281-1294.
- Gorecky, D., M. Schmitt, M. Loskyll and D. Zühlke (2014). Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. *Industrial Informatics (INDIN)*, 2014 12th IEEE International Conference on, IEEE.
- Günther, C.W., & Rozinat, A. (2012). Disco: Discover your processes. *BPM (Demos)*, 940, 40-44.
- Guttentag, D. A. (2010). "Virtual reality: Applications and implications for tourism." *Tourism Management* 31(5): 637-651.
- Hermann, M., Pentek, T., and Otto, B. (2016, January). Design principles for industrie 4.0 escenarios. In *System Sciences (HICSS)*, 2016 49th Hawaii International Conference on (pp. 3928-3937). IEEE.
- McCloy, R. and R. Stone (2001). "Science, medicine, and the future: Virtual reality in surgery." *BMJ: British Medical Journal* 323(7318): 912.
- McGreevy, M. W. (1993). "Virtual reality and planetary exploration." *Virtual Reality. Applications and Explorations*: 46-65.
- Roldán, J. J., E. Peña-Tapia, A. Martín-Barrio, M. A. Olivares-Méndez, J. Del Cerro and A. Barrientos (2017). "Multi-robot interfaces and operator situational awareness: Study of the impact of immersion and prediction." *Sensors* 17(8): 1720.
- Roldán, J. J., Olivares-Méndez, M. A., del Cerro, J., and Barrientos, A. (2017). Analyzing and improving multi-robot missions by using process mining. *Autonomous Robots*, 1-19.
- Roldán, J. J., del Cerro, J., and Barrientos, A. (2017). Using process mining to model multi-UAV missions through the experience. *IEEE Intelligent Systems*, 32(4), 40-47.
- Sánchez-Alonso, R. E., J. Ortega-Moody, J.-J. González-Barbosa and G. Reyes-Morales (2017). "Uso de Plataformas para el Desarrollo de Aplicaciones Virtuales en el Modelado de Robot Manipuladores." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* 14(3): 279-287.
- Van der Aalst, W. M. (1998). The application of petri nets to workflow management. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 8(01), 21-66.
- Van der Aalst, W. M., Rubin, V., van Dongen, B. F., Kindler, E. and Günther, C.W. (2006). Process mining: A two-step approach using transition systems and regions. *BPM Center Report BPM-06-30*, BPMcenter.org, 6.
- Van der Aalst, W. M. (2011). *Process mining: data science in action*. Springer.
- Van der Aalst, W., Adriansyah, A., and Van Dongen, B. (2011). Causal nets: A modeling language tailored towards process discovery. In *International conference on concurrency theory* (pp. 28-42). Springer.
- Verbeek, H., Buijs, J., Van Dongen, B., and van der Aalst, W. M. (2010). Prom 6: The process mining toolkit. In *Proceedings of BPM demonstration track* (Vol. 615, pp. 34-39).
- Von Zadow, U., S. Buron, T. Harms, F. Behringer, K. Sostmann and R. Dachselt (2013). SimMed: combining simulation and interactive tabletops for medical education. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM.