



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Digital Twin e simulazione: principi base nella realizzazione di un Digital Twin simulation-based in ottica Cyber Physical System

Digital Twin and simulation: basic principles in the implementation of a simulation-based Digital Twin from a Cyber Physical System perspective

Relatore:

Prof. **Giovanni Mazzuto**

Tesi di Laurea di:

Michele Giampietro

Anno accademico 2021/2022

<i>Introduzione</i>	1
---------------------------	---

CAPITOLO 1

1	<i>Storia ed evoluzione del concetto di gemello digitale</i>	2
2	<i>Definire un Digital Twin (DT): “uno, nessuno e centomila”</i>	3
2.1	Concettualizzazioni precedenti al DT	6
3	<i>Definire un Cyber Physical System (CPS)</i>	7
3.1	Differenze tra un Digital Twin e un Cyber Physical System	8

CAPITOLO 2

4	<i>Componenti di un DT</i>	12
4.1	Componenti elementari	12
4.1.1	Entità fisiche	12
4.1.2	Modello virtuale	15
4.1.3	Flusso di informazioni	15
4.2	Componenti imperativi	18
5	<i>Proprietà di un DT</i>	19

CAPITOLO 3

6	<i>Modellazione di un DT</i>	21
6.1	Modelli teorici di un DT	21
6.1.1	Modello geometrico	22
6.1.2	Modello fisico	23
6.1.3	Modello comportamentale	26
6.1.4	Modello di regole	27
6.2	Modelli pratici di un DT	29
6.3	Varianti del metodo di modellazione	30
7	<i>Gemelli digitali complessi: caratteristiche e metodi di modellazione</i>	31
8	<i>Tecnologie dei gemelli digitali</i>	34

CAPITOLO 4

9	<i>Scenari applicativi dei DT attuali e futuri</i>	36
9.1	Applicazioni dei DT nella produzione.....	36
9.1.1	Design del prodotto	37
9.1.2	Progettazione e ottimizzazione dei processi.....	37
9.1.3	Gestione della catena di approvvigionamento	38
9.1.4	Manutenzione preventiva	38
9.1.5	Collaborazione interfunzionale	38
9.2	Digital Twin in agricoltura	39
9.3	Digital Twin nell'industria automobilistica e aeronautica	39
9.4	Digital Twin nella sanità.....	41
9.5	Digital Twin nell'edilizia	42
9.6	Digital Twin nel settore energetico.....	42
10	<i>Ricerche future e osservazioni conclusive</i>	42
11	<i>Bibliografia</i>	45

Introduzione

Negli ultimi anni la tecnologia del gemello digitale sta suscitando un crescente interesse negli ambienti accademici e, soprattutto, nei processi dell'industria 4.0. Il proliferare di studi teorici e di applicazioni pratiche in ambiti diversi e sempre più complessi è strettamente legato allo sviluppo dell'Information Technology (IT), dei big data, dell'Intelligenza Artificiale (AI), dell'IoT (Internet of Things), del machine learning. Infatti, Gartner, società multinazionale di ricerca e consulenza strategica, classifica i Digital Twins tra le dieci tendenze emergenti che guideranno l'innovazione tecnologica nel prossimo decennio;¹⁻³ in quanto cloni digitali evoluti del mondo fisico, consentono, ad esempio, attraverso la simulazione, la valutazione, la progettazione e l'efficientamento dei processi produttivi, il monitoraggio in tempo reale e il controllo dei sistemi cyber-fisici negli ambiti più diversi (dall'ingegneria di prodotto alla medicina) e a vari livelli di complessità (da singoli componenti di produzione, come i sensori, a sistemi integrati, come le città intelligenti).

Il mio studio propone una sintesi dei principali e più recenti approcci accademici presenti nella letteratura di riferimento, partendo dalla definizione del concetto di gemello digitale e, ripercorrendo brevemente la storia della nascita di questa tecnologia e delle sue applicazioni attuali e prospettive, vengono illustrati i fondamentali del Digital Twin modelling per la simulazione e gli scenari di sviluppo.



Fig. 1. Ambiti di applicazione del DT (da “Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities”, Mohsen Attaran, Bilge Gokhan Celik).

CAPITOLO 1

1 *Storia ed evoluzione del concetto di gemello digitale*

Il concetto di *gemello digitale* è stato proposto per la prima volta nel 2003 da Michael Grieves, attualmente Chief Scientist for Advanced Manufacturing, presso il Florida Institute of Technology, che, durante un corso di Product Lifecycle Management (PLM) all'Università del Michigan, descriveva il gemello digitale come l'equivalente virtuale di un prodotto fisico. Grieves individuava un *Mirrored Spaces Model*, nel quale la dimensione reale e quella virtuale rimanevano collegate durante l'intero ciclo di vita del sistema, interagendo in tutte le fasi di creazione, produzione, funzionamento e, infine, smaltimento del prodotto.

Tuttavia, dal punto di vista applicativo, l'idea di utilizzare un gemello digitale quale strumento per studiare un oggetto fisico è riconducibile a molto tempo prima.

L'industria aerospaziale vanta, infatti, un'esperienza significativa nella modellazione computazionale e fisica per gestire i sistemi spaziali. Un esempio rappresentativo è il programma *Apollo* della NASA; già negli anni '60 l'ente spaziale americano, durante le sue missioni esplorative in orbita, ha utilizzato repliche fisiche fedeli di navicelle spaziali, destinate a rimanere a terra, e modelli computazionali per analisi e simulazioni.

Questi strumenti si sono rivelati cruciali nella risoluzione dei problemi che si verificarono a seguito dell'incidente sull'*Apollo 13* il 13 aprile 1970; grazie ai simulatori di volo dei centri spaziali di Houston e Kennedy, le manovre da eseguire furono simulate nei minimi dettagli e ingegneri e astronauti utilizzarono copie fisiche dei moduli di comando per realizzare e testare adattatori di fortuna, che consentissero il trasferimento delle cartucce, utilizzate per eliminare la CO₂ dall'aria della navicella, dal modulo lunare a quello di comando.⁴

Alla luce di questa esperienza, negli anni '80 e '90 sono stati utilizzati modelli digitali di satelliti sempre più sofisticati, con una connettività basata su comunicazioni telemetriche di tracciamento e controllo, attraverso sensori.⁵ I sensori satellitari fornivano dati orbitali, sullo stato e sul funzionamento della piattaforma in tempo reale. Queste informazioni hanno permesso di progettare e valutare modifiche specifiche per mantenere le orbite o per pianificare la configurazione del satellite e le varianti operative, prima di inviare i necessari comandi di telemetria al satellite stesso, con una continua interazione tra la dimensione fisica e quella virtuale. Si può, dunque, ipotizzare che questi siano stati i primi esempi applicativi di gemelli digitali, perché per testare le manovre non sono stati utilizzati satelliti terrestri.⁶ Sebbene il termine *gemello digitale* fosse stato coniato sin dal 2003, si deve sempre alla NASA, e molti anni più tardi, la prima descrizione completa dell'uso del Digital Twin: in “Technology Roadmaps⁷”, un gemello digitale veniva utilizzato per simulare le condizioni dello spazio ed eseguire test per la preparazione al volo.

Dall'industria aerospaziale, la metodologia del gemello digitale si è progressivamente diffusa nel settore manifatturiero intorno al 2012 e, più di recente, in ambiti quali la sanità, la pianificazione urbana, la gestione ambientale, la viabilità, i trasporti, i servizi.

La recente ricerca “MarketsandMarkets” ha previsto un rapidissimo aumento del tasso di crescita della tecnologia DT nei prossimi anni, dovuto al sempre maggiore interesse verso la riduzione dei costi e l'ottimizzazione delle supply chain nel settore manifatturiero.

2 Definire un Digital Twin (DT): “uno, nessuno e centomila”

Dall'esame della letteratura più recente, emergono molteplici definizioni del concetto. Alcuni autori, nell'ambito di una revisione sistematica degli studi pubblicati sull'argomento, hanno osservato come nel corso degli ultimi anni il numero delle definizioni individuate sia

più che raddoppiato, parallelamente alla crescente varietà dei contesti applicativi. La comprensione concettuale del gemello digitale si è, dunque, continuamente evoluta durante il suo sviluppo. Dalla prima definizione del termine, pubblicata dalla NASA nel 2010, tante altre ne sono state proposte, a seconda dell'ambito di riferimento e dei gruppi di interesse, ma, ad oggi, manca una definizione univoca e una visione comune del termine.

In generale, un DT può essere definito come una rappresentazione virtuale di oggetti fisici durante il loro ciclo di vita; tali entità fisiche possono essere comprese attraverso dati in tempo reale o mediante un modello di simulazione, che acquisisce dati dal campo e attiva il funzionamento di dispositivi fisici^{8,9}.

In "Encyclopedia of Production Engineering" si afferma che *il gemello digitale è una rappresentazione di un prodotto unico attivo che può essere un dispositivo reale, un oggetto, una macchina, un servizio, un bene immateriale o un sistema costituito da un prodotto e dai relativi servizi.*

Glaessgen e Stargel¹⁰ nel 2012 hanno definito il gemello digitale come una *simulazione unidirezionale, ottenuta creando una replica digitale identica del sistema fisico e garantendo una sincronizzazione costante dei dati tra la controparte fisica e quella digitale.*

Grieves e Vickers¹¹ nel 2017 l'hanno concettualizzato come *un insieme di costrutti informativi virtuali, che descrivono completamente un prodotto manifatturiero fisico potenziale o reale dal livello micro atomico al livello macro geometrico.* Essi hanno individuato due tipologie di DT: *Digital Twin Prototype*, che descrive un prototipo virtuale della versione fisica da ottenere e *Digital Twin Instance*, che classifica *uno specifico prodotto fisico corrispondente a cui un singolo Digital Twin rimane legato per tutta la vita di quel prodotto fisico.*

Tao¹² e altri (2018) hanno definito il Digital Twin come un *collegamento bidirezionale di dati tra un sistema fisico e virtuale che consente la simulazione, la previsione e la regolazione del sistema in tempo reale.*

Fu e altri¹³ hanno immaginato il DT come una rappresentazione digitale in tempo reale di un oggetto fisico; collegati in remoto agli oggetti reali, i DT forniscono una rappresentazione accurata e fedele di tali oggetti, superando i limiti dei progetti statici, quali, ad esempio, i modelli CAD.

Sebbene le definizioni citate siano quelle maggiormente accettate¹⁴, alcuni autori⁶, tuttavia, hanno ricercato nella letteratura più recente una definizione teorica di DT che potesse soddisfare quei requisiti di genericità e universalità che la rendono indipendente dal settore e dall'applicazione.

In questa accezione, un gemello digitale viene definito come: *un accoppiamento digitale in tempo reale dello stato di un bene fisico o di un processo a una rappresentazione virtuale con un output funzionale*¹⁵ (Fig. 2). Tale definizione, pur comprendendo i concetti chiave comuni ad altre interpretazioni, non include necessariamente una connessione bidirezionale virtuale-fisica, aspetto che ne consente l'applicazione a contesti particolari, come, ad esempio, l'ambiente naturale.

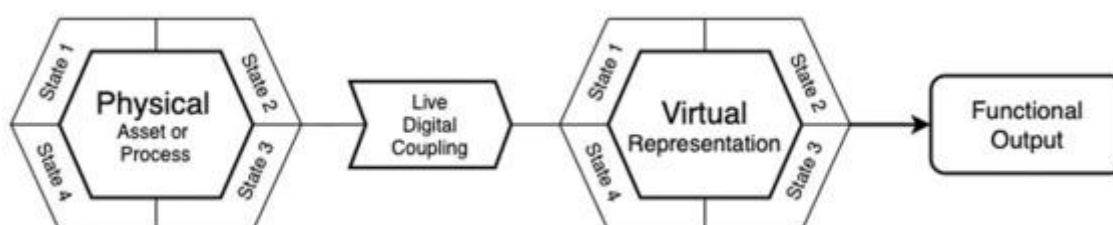


Fig. 2. Il gemello digitale (da “Digital Twins: An analysis framework and open issues”, Hugh Boyes, Tim Watson).

2.1 Concettualizzazioni precedenti al DT

Digitalizzazione e gemellaggio non sono concetti del tutto nuovi; si rilevano, infatti, diversi argomenti simili, che hanno preceduto il gemello digitale. Di seguito se ne riportano i più significativi:

- *digital shadow, digital model*: un modello digitale prevede soltanto uno scambio manuale di dati, senza mostrare lo stato in tempo reale del modello stesso. L'ombra digitale è una copia di dati salvati dello stato fisico, con un flusso informativo unidirezionale dall'oggetto fisico a quello digitale¹⁶. Il DT, invece, realizza un flusso di dati completamente integrati in maniera da riflettere correttamente e coerentemente lo stato effettivo dell'oggetto fisico;
- *virtual factory data model (VFDM)*: sono rappresentazioni virtuali di entità di fabbrica¹⁷, utilizzati nell'ambito della produzione industriale. Digital Twin differisce da VFDM per la proprietà di sincronizzazione in tempo reale: VFDM è solo un modello di dati, mentre DT è in tempo reale e sincronizzato;
- *product avatar*: è un approccio decentralizzato per la gestione delle informazioni sui prodotti, senza alcun feedback e può acquisire informazioni solo su parti del prodotto¹⁸;
- *digital product memory*: Miller e altri¹⁹ considerano il DT come un'estensione della memoria del prodotto semantico/digitale. Una memoria del prodotto digitale rileva informazioni relative soltanto ad una specifica parte fisica e, quindi, può essere valutata come un'istanza di DT;
- *intelligent product*: un DT può essere visto come l'estensione di un prodotto intelligente, che utilizza nuove tecnologie come IoT, big data e machine learning²⁰;
- *holons*: quale primo strumento di produzione integrato con il computer, gli oloni hanno rappresentato la base di tutte le tecnologie attualmente esistenti (simulazione, apprendimento, prototipo digitale, ottimizzazione, sistemi autonomi)²¹;

- *product lifecycle management (PLM)*: Adamenko e altri²² individuano la differenza tra PLM e DT nel fatto che il PLM si concentra prevalentemente sulla gestione dei componenti, prodotti e sistemi di un'azienda, attraverso i suoi cicli di vita, mentre un DT può essere un insieme di modelli per monitoraggio ed elaborazione dei dati in tempo reale.

In Fig. 3 sono riportati gli step evolutivi del concetto di Digital Twin.

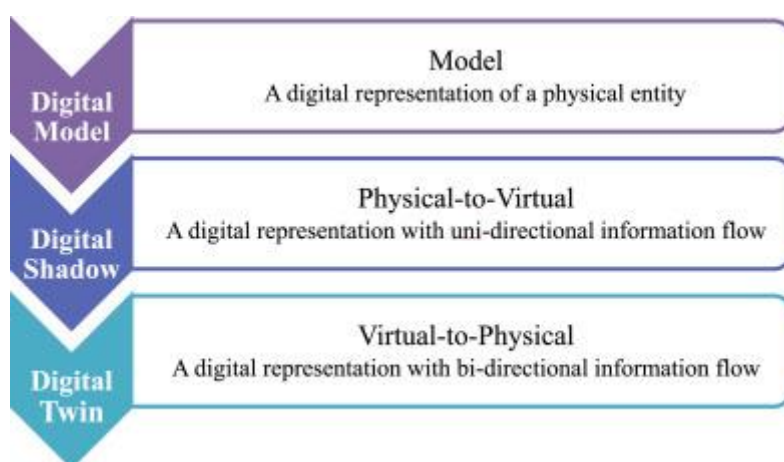


Fig. 3. Livelli di integrazione (da “Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities”, Mohsen Attaran, Bilge Gokhan Celik).

3 Definire un Cyber Physical System (CPS)

Strettamente correlato al concetto di Digital Twin è quello di Cyber Physical System (CPS); anche il CPS, talvolta confuso con il DT, vanta diverse definizioni nella letteratura di riferimento.

Il concetto di CPS è stato proposto per la prima volta nel 2006 da Helen Gill, della National Science Foundation, per descrivere sistemi sempre più complessi²³. Sebbene il concetto di DT storicamente sia stato proposto prima di quello di CPS, tuttavia, è proprio quest'ultimo che ha ricevuto, sin da subito, maggior attenzione da parte della ricerca accademica e industriale.

Boyes e altri nel 2017 hanno definito il CPS come *un sistema che comprende un insieme di componenti fisici e digitali interagenti, che possono essere centralizzati o distribuiti, che fornisce una combinazione di funzioni di rilevamento, controllo, calcolo e rete, per influenzare i risultati nel mondo reale attraverso processi fisici.*^{24,25}

Sempre nel 2017, altri studiosi hanno affermato che *il sistema cyber-fisico è una nuova tendenza nei lavori di ricerca relativi all'Internet delle cose, in cui i sistemi fisici fungono da sensori per raccogliere informazioni del mondo reale e comunicarle ai moduli di calcolo e ai corrispondenti sistemi fisici, attraverso un ciclo di feedback*²⁶.

Più recente la definizione proposta nel 2021 da Son e altri, secondo cui un CPS è un *sistema ingegneristico che cerca di migliorare le prestazioni dei sistemi di produzione, aggrega le informazioni di elementi e applicazioni di produzione eterogenei e le utilizza per prevedere le condizioni future negli impianti di produzione in cui si verificano scenari anomali.*²⁷ Gli autori osservano, inoltre, che l'implementazione e l'interazione virtuale-reale dei CPS è resa possibile proprio dalla tecnologia dei DT; essi considerano, infatti, il gemello digitale come una fabbrica virtuale, che imita un sito di produzione, sincronizza le sue informazioni e operazioni, sviluppando le funzionalità del sistema cyber-fisico e prevedendo lo stato futuro dell'impianto produttivo, attraverso l'analisi dei risultati.

3.1 Differenze tra un Digital Twin e un Cyber Physical System

Sulla base delle definizioni esposte di DT e CPS, è possibile individuare alcuni elementi distintivi di ciascuna tecnologia, che ne consentono la corretta collocazione concettuale.

La differenza sostanziale tra un CPS e un DT è che le componenti informatiche di un sistema cyber-fisico sono elementi inseparabili e integrati nella progettazione complessiva del

sistema e, soprattutto, essi sono necessari per il controllo, la sicurezza e la protezione del funzionamento del CPS.

In altri termini, un Cyber Physical System viene configurato come un sistema olistico, mentre un Digital Twin può essere considerato come un modello virtuale interconnesso, che rappresenta l'oggetto fisico.

Si osserva, inoltre, che, sebbene entrambi siano in grado di raggiungere l'interazione virtuale-reale, essi sono, tuttavia, implementati in modo diverso. Il gemello digitale, infatti, ottimizza lo stato di funzionamento delle entità fisiche, attraverso la simulazione di modelli virtuali; al contrario, i sistemi cyber-fisici controllano il funzionamento delle apparecchiature fisiche, analizzando i dati grezzi, raccolti dai sensori, e impartiscono istruzioni dai computer.

Altre differenze si riscontrano nelle componenti essenziali di ciascuna tecnologia: quelle del gemello digitale sono entità fisiche, modelli virtuali e dati gemelli, mentre gli elementi di base dei sistemi cyber-fisici sono il livello di percezione, il livello di rete e il livello di controllo.

I sistemi cyber-fisici, dunque, consentono di controllare in maniera puntuale e sistematica i processi fisici, la collaborazione remota e l'autogestione, attraverso l'utilizzo dei dati, fornendo, in tempo reale, un feedback sulle informazioni, un controllo dinamico e dei servizi. In definitiva, il gemello digitale deve costruire un modello virtuale ad alta fedeltà di oggetti fisici nello spazio digitale per simulare il loro comportamento nel mondo reale, provvedendo ad un successivo riscontro. Un Digital Twin, infatti, riflette un processo di mappatura dinamica bidirezionale, superando le barriere presenti nel ciclo vita del prodotto e creando un'impronta digitale; la sua finalità, quindi, è quella di fornire una descrizione fisica e funzionale di un componente o di un sistema.

Il CPS, invece, è un sistema complesso e multidimensionale, che prevede l'interazione tra mondo fisico digitale e mondo cibernetico, enfatizzando le potenti capacità di calcolo e comunicazione di quest'ultimo e migliorando la precisione e l'efficienza del mondo fisico. In sintesi, il DT ha la necessità di costruire un modello virtuale, mentre il sistema cyber-fisico non ne ha bisogno²⁸.

Da un punto di vista prettamente produttivo, sia i CPS che i DT comprendono due parti: la parte fisica e quella cibernetica/digitale. La prima è costituita da varie risorse, che possono essere raggruppate nella macrocategoria "uomo/macchina/materiale/ambiente". Essa, infatti, rileva e raccoglie i dati ed esegue le decisioni della parte cibernetica/digitale. La seconda, invece, comprende diverse applicazioni e servizi, incorporando capacità di gestione intelligente dei dati, di analisi e di calcolo. Attraverso questa connessione molto intensa, la parte cyber/digitale può influenzare i processi fisici e, viceversa, la parte fisica può influenzare i processi cyber/digitali.

Nel mappare i CPS e i DT, è importante sottolineare che l'essenza dei CPS risiede nell'aggiungere nuove capacità ai sistemi fisici, mediante il calcolo e la comunicazione, che interagiscono continuamente con i vari processi. Nei DT, contrariamente ai CPS, la corrispondenza è soltanto biunivoca, in quanto il loro compito è quello di fornire, nel mondo digitale, una descrizione completa del sistema fisico.

Un'ulteriore differenza riguarda l'impatto che le nuove tecnologie informatiche hanno avuto sui Digital Twin e sui Cyber Physical System.

In considerazione della stretta interdipendenza tra i sistemi cyber-fisici e le nuove tecnologie, Wan e altri²⁹ affermano che i CPS rappresentano un'evoluzione dei sistemi informatici integrati nell'ambito dell'IoT, grazie all'inserimento di operazioni più intelligenti e

interattive. I CPS integrati nel cloud possono dare spazio a scenari applicativi precedentemente irrealizzabili per soddisfare i requisiti dell'Industria 4.0.

Diversamente dal CPS, il DT viene considerato un nuovo modo di gestire l'IoT industriale e l'integrazione delle tecnologie cloud all'interno dei Digital Twin diventa fondamentale per garantire la scalabilità di archiviazione, calcolo e comunicazione.

Negri e altri autori (2017), infine, ritengono che il gemello digitale sia un'aggiunta, piuttosto che un componente del CPS e specificano che, per svolgere tale ruolo, il DT può ricevere dati dai sensori e avere accesso alle informazioni sulla configurazione del sistema cyber fisico. Inoltre, il DT, per simulare il comportamento del gemello fisico (come, ad esempio, l'inerzia o la resistenza incontrata nei movimenti fisici), si avvale di modelli multi-fisici integrati.

CAPITOLO 2

4 Componenti di un DT

Un Digital Twin viene solitamente configurato come un'unità logica, costituita da diverse parti. Possiamo distinguere, in generale, due tipologie di componenti, entrambi essenziali per l'esistenza stessa di un DT: componenti elementari e componenti imperativi.

4.1 Componenti elementari

I componenti elementari sono costituiti da:

- asset fisico (può essere un bene, un servizio o un ciclo di vita del prodotto);
- digital asset (il componente virtuale);
- flusso di informazioni (unidirezionale o biunivoco) tra l'asset fisico e quello digitale.

Le caratteristiche specifiche e le proprietà di ciascun componente sono analizzate, nel dettaglio, nei paragrafi che seguono.

4.1.1 Entità fisiche

Sono il requisito minimo essenziale per la costruzione del modello virtuale e rappresentano la fonte dei dati gemelli; pertanto, sono numerosi gli autori che hanno cercato di attribuire una definizione alle entità fisiche. Ad esempio, Bevilacqua e altri³⁰ le hanno classificate come elementi caratterizzati da risorse del settore fisico, quali prodotti, personale, attrezzature, materiali, processi, ambiente e strutture.

Sun e altri³¹, invece, definiscono le entità fisiche in uno spazio di assemblaggio (persone, dispositivi, componenti e prodotti). Quindi, per entità fisiche si intendono anche le risorse ausiliarie delle entità medesime, quali lavoratori, ambiente e materiali.

E' possibile, inoltre, classificare i componenti di un'entità fisica in modo da facilitare la costruzione di modelli virtuali. A tal proposito, Duan e altri³², hanno suddiviso le entità fisiche in due parti: il livello dell'apparecchiatura e il livello di test; Il primo comprende tutte le componenti di un generico dispositivo (cuscinetti, lame, motori, ecc.), il secondo, invece, include tutte le tipologie di test su un sistema, sia di tipo statico che dinamico.

E' importante evidenziare come la selezione dei componenti utili dell'entità fisica consenta di migliorare e velocizzare il processo di modellazione. Inoltre, poiché la loro complessità varia in base ai diversi campi applicativi, l'analisi degli elementi serve ad escludere le parti che non influiscono sulla funzionalità del modello.

Al centro della ricerca sulle entità fisiche c'è l'acquisizione delle informazioni, la cui raccolta è eseguita mediante sensori. I sensori, distribuiti durante il processo di produzione, consentono ai gemelli digitali di acquisire dati operativi e ambientali di estrema importanza per i processi fisici nel mondo reale. Esistono numerose tipologie di sensori, a seconda dei dati da acquisire: codificatori di posizione/angolo (per ottenere dati sulla posizione), sensori di coppia (per reperire informazioni inerenti alla forza) oppure sensori a corrente e tensione (per raccogliere i dati sulla corrente e sulla tensione).

Diversi autori hanno spiegato come percepire informazioni sull'ambiente fisico, sull'operatore e sui dati di lavoro. La percezione delle informazioni sull'ambiente fisico è stata trattata da Choi e altri³³, i quali hanno utilizzato due sensori RGB-D per ricostruire e tracciare l'ambiente di lavoro. Il sistema sviluppato da Choi permette ad uno dei sensori di scansionare un'area dell'ambiente fisico, attraverso i dati della nuvola di punti 3D e all'altro di scansionare un'area diversa dell'ambiente, monitorando le informazioni sull'osso 3D dell'utente.

Nikolakis e altri³⁴, invece, si sono occupati della percezione delle informazioni sull'operatore. Nikolakis, infatti, ha proposto un modo per identificare le azioni degli operatori nei sistemi di produzione. I vincoli e i movimenti di vincolo degli operatori vengono captati da una telecamera di profondità Kinect V2 e da un guanto elettronico. I dati vengono generati nell'ambiente fisico e inviati al modello virtuale, che può simulare il comportamento dell'operatore in un ambiente virtuale.

La percezione dei dati di lavoro, infine, è stata trattata da Aivaliotis e altri³⁵, i quali si sono avvalsi del gemello digitale per calcolare la vita utile di un robot a sei assi. Poiché nella simulazione del DT sono stati generati dati che non potevano essere raggiunti dalle macchine reali, per la raccolta dei segnali, oltre ai sensori reali, sono stati progettati tre sensori virtuali. Questi ultimi, infatti, possono monitorare e raccogliere dati (posizione, velocità e accelerazione) da diverse parti virtuali del dispositivo.

La Fig. 4 illustra i vari metodi di percezione delle informazioni fisiche.

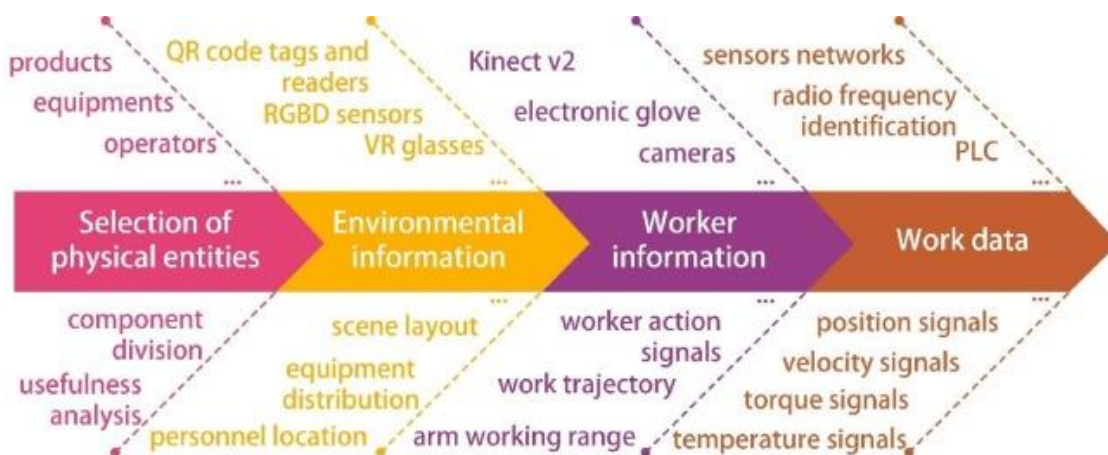


Fig. 4. Metodi di percezione delle informazioni fisiche (da “A systematic review of Digital Twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications”, Xin Liu, Du Jiang, Bo Tao, Feng Xiang, Guozhang Jiang, Ying Sun, Jianyi Kong, Gongfa Li).

4.1.2 Modello virtuale

Un modello virtuale rappresenta un'immagine speculare digitale di un'entità fisica³⁶. Pertanto, riuscire a raggiungere un elevato livello di corrispondenza con le entità fisiche è fondamentale per ottenere la tecnologia del gemello digitale.

Negli ultimi anni sono state condotte diverse ricerche sulla modellazione e proposte diverse metodologie per la costruzione dei modelli virtuali. I metodi di modellazione saranno trattati più diffusamente in altre sezioni dell'elaborato.

4.1.3 Flusso di informazioni

I flussi informativi possono provenire da fonti diverse, che determinano la suddivisione in dati fisici e dati virtuali.

I dati fisici riguardano le informazioni prodotte dal lavoro di un'entità fisica e sono raccolti da sensori; i dati virtuali si generano durante il funzionamento di un modello virtuale. Poiché i dati fisici e quelli virtuali hanno “formati” diversi tra loro, è necessario studiare un protocollo di scambio di dati che li colleghi l'uno all'altro. Come pure, è fondamentale il metodo di acquisizione dei dati e il processo di elaborazione degli stessi.

Metodi di acquisizione dati

Solitamente, la raccolta dei dati avviene mediante sensori. Kong e altri³⁷ hanno proposto, per l'utilizzo di sistemi di gemelli digitali, un metodo di costruzione dei dati stabile ed efficiente. La struttura costruttiva del gemello digitale è divisa in quattro parti: la rappresentazione dei dati, la raccolta dei dati, l'organizzazione dei dati e, infine, la gestione dei dati.

La rappresentazione dei dati si riferisce alla strutturazione gerarchica dei dati di produzione e all'individuazione dei caratteri dell'applicazione. L'organizzazione dei dati, invece,

raccoglie tutte le pre-elaborazioni e le elaborazioni dei dati. Infine, la gestione dei dati si basa su un database e sulle modalità di archiviazione e recupero.

Il metodo di Kong è strutturato in modo tale che i dati grezzi siano raccolti da due sensori (DAQ per l'acquisizione dei dati e RFID per l'identificazione a radiofrequenza), sotto la guida del modulo di rappresentazione dei dati. Successivamente, i dati vengono elaborati nel modulo di gestione dati e archiviati nel database. Infine, attraverso l'elaborazione dei dati, le informazioni appropriate vengono inviate all'applicazione di primo livello.

Il metodo costruttivo di Kong è illustrato in Fig. 5.

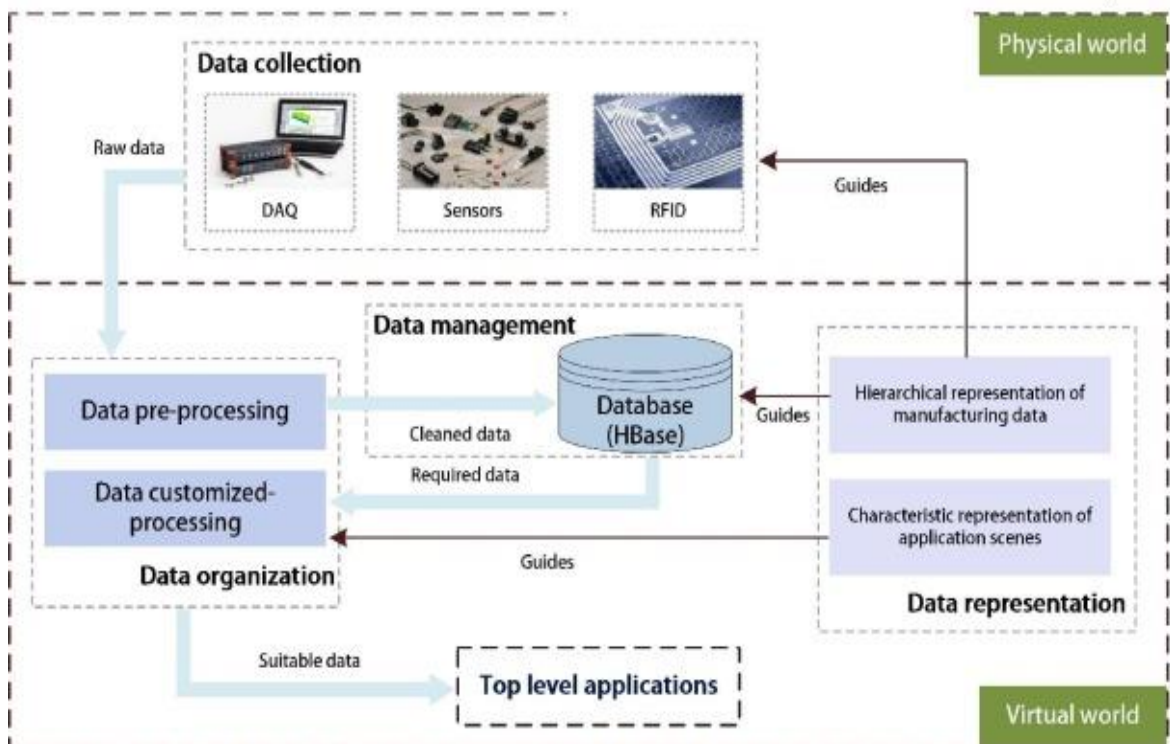


Fig. 5. Framework di costruzione del gemello digitale secondo Kong (da “A systematic review of Digital Twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications”, Xin Liu, Du Jiang, Bo Tao, Feng Xiang, Guozhang Jiang, Ying Sun, Jianyi Kong, Gongfa Li).

L'acquisizione dei dati può avvenire anche utilizzando la tecnologia blockchain.

Infatti, Huan e altri³⁸ hanno proposto un metodo per reperire dati mediante questa tecnologia.

Tale metodologia prevede che i dati del ciclo vita del prodotto vengano registrati sulla

blockchain, mentre i dati del gemello digitale siano interrogati dalla blockchain. Infine, per migliorare l'efficienza della condivisione dei dati, viene creata una rete condivisa, dove ciascun partecipante può inviare direttamente i dati al richiedente.

Un'ulteriore modalità per acquisire e inviare dati è il controllo logico programmabile (PLC). Wang e altri³⁹ hanno individuato un sistema in cui i dati operativi vengono letti in tempo reale dal PLC e dall'interfaccia uomo-macchina (HMI). Il cruscotto digitale e l'HMI sono messi in comunicazione, tramite un protocollo di comunicazione di rete (Modbus TCP/IP), che, sfruttando un protocollo Ethernet, permette lo scambio di dati in modo rapido e affidabile. Infine, i dati sul cruscotto della macchina possono essere memorizzati in tempo reale sul database, mentre i dati presenti nel database possono essere consultati anche sul cruscotto digitale. La Fig. 6 mostra il processo di acquisizione dei dati.

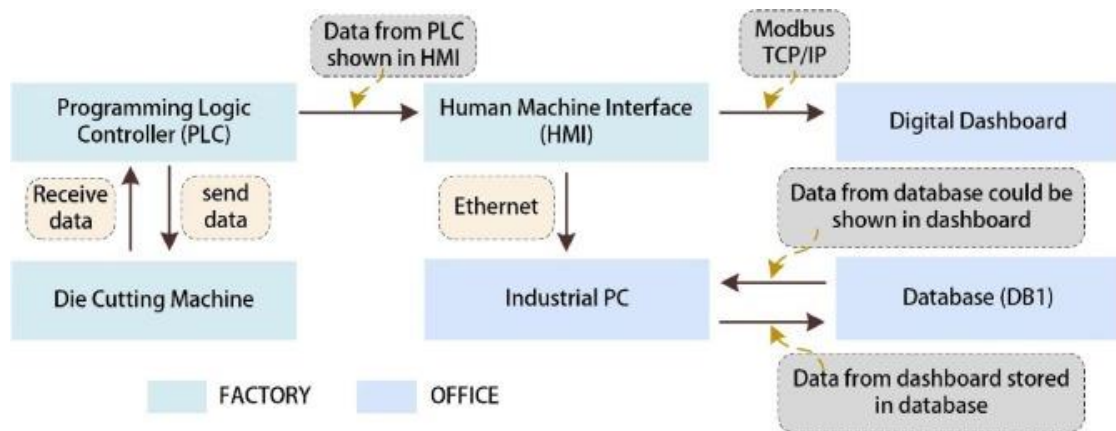


Fig. 6. Processo di acquisizione dati (da “A systematic review of Digital Twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications”, Xin Liu, Du Jiang, Bo Tao, Feng Xiang, Guozhang Jiang, Ying Sun, Jianyi Kong, Gongfa Li).

Protocollo di scambio dati

I dati operativi delle entità fisiche, raccolti dai sensori, non possono essere direttamente ribaltati nell'ambiente virtuale, a causa dei diversi “formati” dei dati; al tempo stesso, i dati

virtuali, prodotti dal modello virtuale, non possono essere trasferiti immediatamente all'entità fisica. Per questo motivo è strategico selezionare un protocollo di scambio dei dati adeguato alla loro interazione virtuale/reale.

Le tecnologie di trasmissione più diffuse utilizzano i principali protocolli di bus industriali (Internet, Profinet, Profibus, Ethernet, ecc.).

4.2 Componenti imperativi

I componenti imperativi completano le proprietà di un DT, per renderlo uno strumento onnicomprensivo di simulazione, monitoraggio in tempo reale e analisi. Tuttavia, l'esistenza di ognuno di questi componenti dipende fondamentalmente dal dominio e dall'applicazione del gemello digitale.

I componenti imperativi sono rappresentati da:

- dispositivi IoT: necessari per acquisire le informazioni dei sensori da diversi sottocomponenti dell'asset fisico. Condizione necessaria è una connessione ad alta fedeltà tra dispositivi IoT, finalizzata ad ottenere un flusso di informazioni veloce e accurato;
- dati: sono raccolti da vari componenti e software IoT. E' importante monitorare il sistema, garantire un comportamento corretto e fornire input al sistema di apprendimento automatico. Si richiede l'analisi dei big data e l'utilizzo di strumenti di archiviazione per estrarre informazioni utili dai dati;
- apprendimento automatico: utile sia per previsioni e feedback, sia per identificare strategie di mitigazione efficaci. E' necessaria una funzione di ottimizzazione congiunta per i sottocomponenti del DT;

- **sicurezza:** riguarda il flusso di dati e informazioni tra le varie componenti coinvolte nel DT. Richiede dei protocolli di sicurezza per la condivisione e l'autenticazione delle informazioni e meccanismi di autorizzazione;
- **valutazione delle prestazioni:** è richiesta una metrica rigorosa, accurata, resiliente, solida, oltre a metodi e test di valutazione adeguati.

La seguente tabella riepiloga i diversi componenti di un DT e il loro ruolo principale.

Componente	Ruolo
<i>Asset fisico</i>	di cosa è gemello il gemello digitale
<i>Risorsa digitale</i>	il gemello digitale
<i>Relazione biunivoca continua</i>	per la sincronizzazione e il gemellaggio
<i>IoT</i>	per la raccolta dei dati e la condivisione delle informazioni
<i>Dati</i>	per la sincronizzazione, l'analisi e l'input per l'apprendimento automatico
<i>Apprendimento automatico</i>	per l'analisi e la previsione
<i>Sicurezza</i>	per prevenire fughe di dati e compromissioni di informazioni
<i>Metriche valutazione/test</i>	per valutare le prestazioni di DT

5 Proprietà di un DT

Ogni gemello digitale possiede delle proprietà che lo rendono molto più di un semplice “gemello” “digitale”; la misura in cui tali proprietà sono incorporate nel DT dipende, per quanto ovvio, dall'applicazione principale del DT stesso.

Le proprietà caratterizzanti qualsiasi gemello digitale sono indicate di seguito:

- **autoevoluzione:** è una proprietà fondamentale, introdotta da Tao e altri, per cui un DT riesce ad apprendere e adattarsi in tempo reale, fornendo feedback sia all'asset fisico (tramite

l'asset umano), sia al DT stesso, grazie soprattutto agli strumenti di apprendimento automatico. La frequenza di questa sincronizzazione dipende dagli scenari di aggiornamento;

- dipendenza dal dominio o da servizi tipici del dominio: a seconda dello specifico dominio, un DT può dare la priorità a particolari servizi del settore dell'asset fisico, piuttosto che ad altri ritenuti poco funzionali;

- autonomia: un DT può essere più o meno autonomo a seconda dello specifico contesto e dei componenti presenti nel gemello digitale; un DT potrebbe, infatti, apportare variazioni all'asset fisico o potrebbe essere modificato dall'asset umano che lo controlla. Rientra in questa fattispecie anche il meccanismo di autoevoluzione del DT, che consente al gemello digitale di apportare cambiamenti, senza necessità di approvazione da parte di un essere umano;

- sincronizzazione dei dati: può avvenire in maniera continua o a intervalli di tempo prefissati. La tempistica di sincronizzazione dipende da alcuni fattori, quali la tecnologia, le risorse disponibili, la necessità di dati ed è correlata all'algoritmo di apprendimento automatico utilizzato. Inoltre, un gemello digitale può avere sottocomponenti che necessitano di sincronizzazione continua ed altri che vengono sincronizzati in base al tipo di evento.

CAPITOLO 3

6 Modellazione di un DT

La modellazione del DT è, dunque, la modellazione digitale nell'ambiente virtuale, sulla base delle proprietà, dei metodi, dei comportamenti e delle altre caratteristiche dell'asset fisico.

La modellazione di un gemello digitale è il fulcro di una rappresentazione accurata dell'entità fisica, che consente al DT di fornire i servizi funzionali (monitoraggio, simulazione, previsione, ottimizzazione e così via) e soddisfare i requisiti dell'applicazione.

6.1 Modelli teorici di un DT

Nel tentativo di definire e implementare l'architettura di un gemello digitale, la gestione del ciclo vita del prodotto (PLM) svolge un ruolo fondamentale; questo perchè il DT è in grado di fornire una visione globale ai componenti diffusi del PLM, che risulta, a sua volta, utile per risolvere i diversi problemi talvolta presenti nel dominio.

Tao e altri¹² evidenziano le limitazioni del PLM e, in particolare, come i suoi dati siano isolati, frammentati e stagnanti. Gli autori presentano anche un quadro teorico dell'applicazione del DT al PLM, individuando tre fasi di progettazione: una concettuale, una dettagliata e, infine, una di verifica virtuale.

Per implementare un DT, Liu e altri⁴⁰ propongono di utilizzare il motore open source Unity3d. Più in dettaglio, viene creato un modello di riferimento per gestire e sincronizzare sistemi AFMS (Automated Flow-Shop Manufacturing System), utilizzando gemelli digitali, che, a loro volta, si occupano anche del disaccoppiamento dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo.

Riguardo all'importanza di un DT nel ciclo vita del prodotto, Schleich e altri⁴¹ teorizzano un quadro di riferimento Digital Twin per i sistemi di produzione e per la specifica geometrica del prodotto (GPS). Schleich, infatti, oltre a proporre di rappresentare il DT quale forma astratta del prodotto fisico, sottolinea che un gemello digitale può essere inteso come lo stesso ciclo di vita del prodotto, piuttosto che il semplice prodotto.

All'interno del sistema teorico di modellazione dei DT sono stati individuati quattro modelli di costruzione: geometrico, fisico, comportamentale e di regole.

6.1.1 Modello geometrico

La costruzione del modello geometrico definisce la forma, le dimensioni, la struttura interna, la posizione, l'atteggiamento e le interfacce di assemblaggio delle entità fisiche. La fedeltà e l'accuratezza dei dati sono elementi imprescindibili per la costruzione di un efficace modello geometrico.

E'previsto, inoltre, un metodo di semplificazione per consentire un rapido trasferimento, caricamento e navigazione del modello geometrico. La semplificazione del modello consente di utilizzare un minor numero di dati per ottenere una rappresentazione ad alta fedeltà delle entità fisiche, con piccoli file di trasferimento che, tuttavia, conservano un adeguato livello di dettaglio.

Il modello geometrico solitamente contiene parametri statici e dinamici. I primi devono essere convalidati una volta sola e, se il modello è coerente con gli oggetti fisici, i parametri non dovrebbero subire variazioni significative; di contro, i parametri dinamici necessitano di essere aggiornati continuamente. Per facilitare l'aggiornamento del modello geometrico, è opportuno costruire le relazioni di mappatura, espresse da vari linguaggi, (per esempio, XML), tra i dati raccolti e i parametri dinamici del modello stesso. Quest'ultimo svolge un

ruolo importante nel fornire una conoscenza degli stati degli oggetti di modellazione in tempo reale, attraverso modalità visive e di sincronizzazione.

In sintesi, se il modello geometrico dovesse risultare incoerente con l'oggetto fisico rappresentato, è possibile effettuare aggiornamenti, come mostrato in Fig. 7.

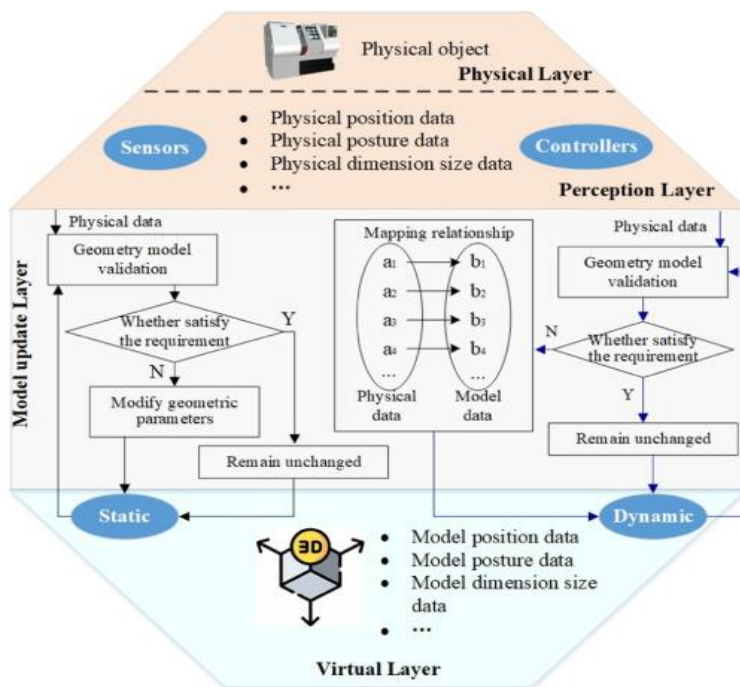


Fig. 7. Framework di aggiornamento del modello geometrico (da "An update method for Digital Twin multi-dimension models", He Zhang, Qinglin Qi, Wei Ji, Fei Tao).

6.1.2 Modello fisico

La costruzione del modello fisico supporta servizi, quali il controllo di qualità, l'analisi e la previsione delle proprietà fisiche e può essere classificata in statica e dinamica.

La modellazione statica è di tipo quantitativo e determinata esclusivamente da entità fisiche con le loro proprietà, il loro stato e comportamento e non è correlata ai diversi metodi di analisi. Poiché le attuali applicazioni ingegneristiche sono diventate sempre più complesse, l'analisi dell'accoppiamento multi-fisico diventa necessaria nella costruzione di modelli fisici e statici. Per un sistema fisico, che varia dinamicamente (come, ad esempio, la

conduzione termica all'interno di una parte meccanica), bisogna creare e calcolare un numero finito di nodi sul dominio della soluzione spazio-temporale, per ottenere la distribuzione dello stato fisico dell'intero sistema.

Tuttavia, il modello fisico non può essere applicato indiscriminatamente a qualsiasi situazione pratica, perché determinati parametri sono influenzati da fattori ambientali; inoltre, alcuni modelli presentano errori dovuti alla mancata considerazione di specifici fattori nell'ipotesi costruttiva.

Pertanto, è necessario l'aggiornamento del modello fisico, secondo la metodologia indicata nella Fig. 8. Dapprima bisogna individuare i parametri fissi e quelli variabili, successivamente, in relazione allo standard di classificazione, si stabilisce se i parametri fissi debbano essere regolati in base alle condizioni dell'applicazione, mentre quelli variabili vengono di solito scelti come parametri di aggiornamento.

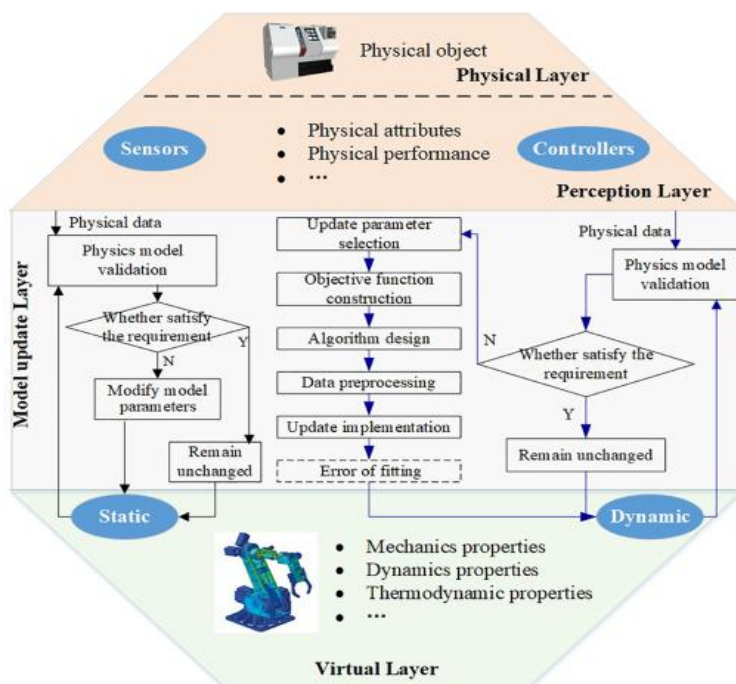


Fig. 8. Framework di aggiornamento del modello fisico (da "An update method for Digital Twin multi-dimension models", He Zhang, Qinglin Qi, Wei Ji, Fei Tao).

In sintesi, gli step di aggiornamento sono i seguenti:

- 1) aggiornare la selezione dei parametri: in alcune condizioni, ci sono molti parametri correlati ai fattori ambientali e, quindi, per ridurre i costi di calcolo derivanti dalla considerazione di tutti i parametri flessibili, vengono generalmente scelti soltanto i parametri con forte correlazione;
- 2) costruzione della funzione dell'oggetto: sulla base dei parametri scelti nel passaggio precedente, è possibile creare la funzione oggetto, il cui obiettivo è quello di rendere i risultati del modello fisico il più possibile aderenti agli effettivi dati misurati;
- 3) progettazione dell'algoritmo: diversi sono gli algoritmi esistenti per risolvere problemi di ottimizzazione, ad esempio l'algoritmo di Newton, l'equazione di Gauss-Newton, l'algoritmo di Levenberg-Marquardt e il metodo iterativo dei minimi quadrati non lineari. Ciascun algoritmo ha le proprie condizioni di applicazione e diversi livelli prestazionali, pertanto, la progettazione di un algoritmo appropriato è fondamentale per individuare i parametri ottimali in modo efficiente;
- 4) elaborazione fisica dei dati: sulla base dei parametri scelti nel passaggio 1) e della funzione dell'oggetto nel passaggio 2), è possibile determinare quali dati fisici è necessario raccogliere. I dati grezzi devono essere affinati attraverso un processo di elaborazione, che ne consenta la pulizia, l'integrazione, la trasformazione e così via, in modo da migliorarne la qualità;
- 5) implementazione dell'aggiornamento del modello: nella maggior parte dei casi, l'aggiornamento del modello può essere implementato sostituendo i parametri iniziali con quelli ottimali, ottenuti sulla base di dati fisici, dopo l'elaborazione e gli algoritmi progettati;

6) funzione di adattamento degli errori: è considerata un elemento aggiuntivo dei modelli fisici ottimizzati, laddove siano richiesti elevati livelli di accuratezza.

6.1.3 Modello comportamentale

Il modello comportamentale consente di rappresentare i comportamenti sequenziali, simultanei, collegati, periodici e casuali di entità fisiche.

L'esattezza del movimento e il controllo del gemello digitale sono strettamente correlati all'accuratezza del modello comportamentale, che, talvolta, può risultare discrepante, a causa dell'esposizione delle entità fisiche ad una varietà di incertezze nel funzionamento pratico. I valori anomali nei dati possono compromettere l'accuratezza del modello comportamentale, rendendolo incoerente con l'entità fisica. Per questa ragione, si ritiene essenziale un'analisi precisa della radice dei dati anomali e della loro rilevanza per altre variabili.

L'accuratezza del modello può essere migliorata attraverso la regolazione dei parametri dell'algoritmo, al fine di individuarne il valore ottimale. La regolazione dei parametri è un processo iterativo e la loro ottimizzazione consente di comprenderne il significato e il loro impatto sul modello.

Il metodo di aggiornamento del modello comportamentale riguarda le modifiche agli elementi, alle relazioni o ad entrambi, in modo da poter adattare gli attributi dinamici ai cambiamenti delle entità fisiche: Il framework di aggiornamento del modello è schematizzato in Fig. 9.

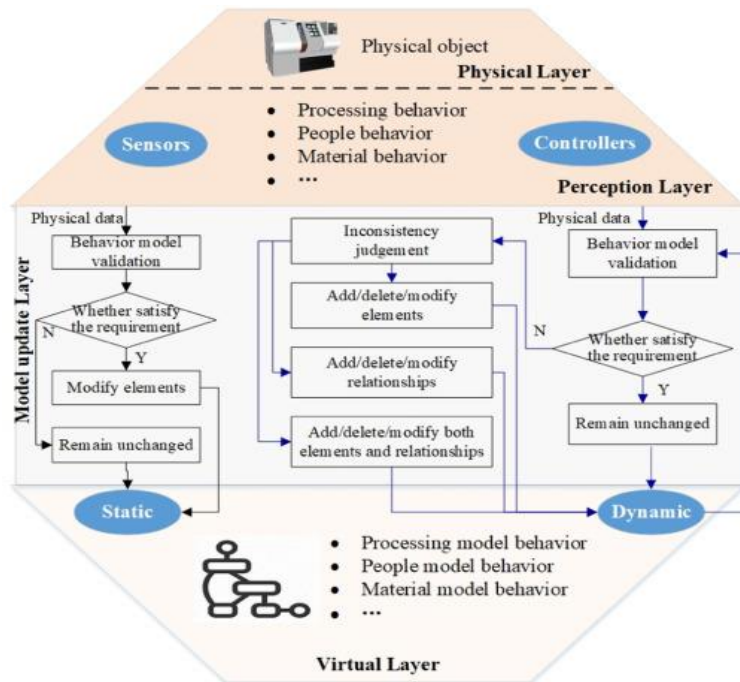


Fig. 9. Framework di aggiornamento del modello comportamentale (da “An update method for Digital Twin multi-dimension models”, He Zhang, Qinglin Qi, Wei Ji, Fei Tao).

6.1.4 Modello di regole

Il modello di regole rappresenta le tendenze evolutive degli asset fisici.

In base all'intero ciclo di vita delle entità fisiche, ci sono due modalità principali di costruzione del modello di regole: l'estrazione/analisi dei dati e la rappresentazione formale dell'esperienza e della conoscenza.

I dati del ciclo di vita costituiscono il limite superiore del modello di regole e la sua costruzione è un processo di approssimazione continua verso tale limite. Pertanto, per una migliore e più completa mappatura dei dati dell'intero ciclo di vita da parte del modello di regole, è richiesta la pre-elaborazione dei dati stessi.

Il modello di regole, inoltre, consente di potenziare l'esperienza e la conoscenza attraverso l'utilizzo di mezzi come l'elaborazione delle informazioni, il data mining, la misurazione delle conoscenze e la mappatura grafica. L'evoluzione della conoscenza e dell'esperienza,

rilevata dai modelli di regole, consente ai gemelli digitali di comprendere e applicare l'intelligenza umana.

Il metodo di aggiornamento del modello di regole prevede tre condizioni essenziali. La prima condizione presuppone che alcune regole siano errate o non applicabili alla specifica situazione e, quindi, dovrebbero essere cancellate. La seconda condizione riguarda l'assenza di qualche regola, che, pertanto, dovrebbe essere aggiunta alle regole iniziali. La terza condizione parte dall'assunto che determinate regole non siano più adeguate allo scenario attuale e, dunque, non riuscendo a gestire i cambiamenti di soglia, causati da variazioni dell'ambiente applicativo, dovrebbero essere aggiornate. Queste tre condizioni operano in sinergia, per rendere i modelli di regole coerenti con le situazioni pratiche. La metodologia di aggiornamento del modello di regole è mostrata in Fig. 10.

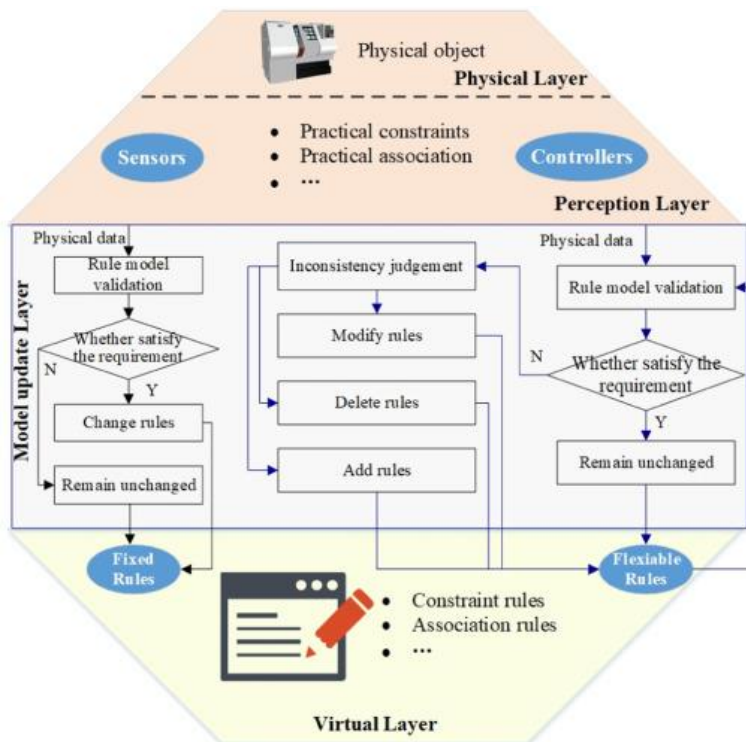


Fig. 10. Framework di aggiornamento del modello di regole (da "An update method for Digital Twin multi-dimension models", He Zhang, Qinglin Qi, Wei Ji, Fei Tao).

E' importante precisare, tuttavia, che non tutti i modelli a quattro dimensioni devono essere aggiornati contemporaneamente in ogni caso applicativo. Perciò, nel processo di implementazione dell'aggiornamento è necessario anzitutto individuare quale modello dovrebbe essere considerato all'inizio e, di conseguenza, scegliere la modalità di aggiornamento del modello stesso, sulla base dei framework e dei metodi proposti, implementati con le relative informazioni fisiche.

6.2 Modelli pratici di un DT

Le applicazioni di un Digital Twin riguardano vari domini, che vanno dalla produzione al settore aerospaziale, ai sistemi cyber-fisici, alla prognosi, alla gestione e alla salute. Tuttavia, l'implementazione più complessa, ma allo stesso tempo più vantaggiosa di un DT, si ha in campo aerospaziale, compresi i velivoli, parti, apparecchiature o sistemi ad essi associati. Uno dei vantaggi principali è quello di poter simulare condizioni estreme (carichi termici, meccanici e acustici), che non possono essere ricreate in laboratorio, poichè i test presentano dei limiti, talvolta vincolanti e difficili da superare. I vantaggi nell'utilizzo di un gemello digitale sono, quindi, molteplici per i vari domini applicativi, motivo per cui un DT deve essere necessariamente plasmato a seconda dei differenti settori d'impiego.

Negri e altri⁴² evidenziano, ad esempio, la performance attesa da un DT in diverse aree, quali CPS (per evitare guasti, supportare l'analisi della salute dei sistemi, studiare la deformazione dei materiali nel gemello fisico o il comportamento a lungo termine in ambienti diversi), simulazione (basata su Computer-Aided Engineering - CAE), settore manifatturiero (per simulare parametri complessi e numerosi del sistema), robotica (per ottimizzare gli algoritmi di controllo durante la fase di sviluppo) e così via.

Poiché un DT è un gemello dell'asset fisico, la sua implementazione richiede una conoscenza approfondita del particolare dominio e delle sue caratteristiche, al fine di individuare sia le complessità coinvolte nella costruzione e nel funzionamento dell'entità fisica, sia il modo in cui i diversi componenti si collegano tra loro, per stabilire, infine, un'adeguata ponderazione dei parametri durante l'ottimizzazione.

6.3 Varianti del metodo di modellazione

Oltre al modello geometrico, fisico, comportamentale e di regole, sono stati proposti alcuni nuovi metodi per la costruzione del modello virtuale.

Wu e altri⁴³ hanno individuato un metodo di modellazione concettuale del DT multi-dimensionale, che descrive in maniera dettagliata la composizione, il comportamento e le regole del gemello digitale.

Zhang e altri⁴⁴, invece, hanno proposto un modello di fusione a cinque dimensioni, dove è presente un modello geometrico (GM), un modello fisico (PM), un modello di capacità (CM), un modello comportamentale (BM) e un modello di regole (RM). A questo modello a cinque dimensioni viene aggiunto anche un modello di abilità, che descrive le capacità di ogni entità nello strato fisico. Lo scopo di tale integrazione è quello di comprendere le capacità e i ruoli delle varie risorse nel sistema produttivo e trasformarle in conoscenze adeguate a supportare la previsione dei risultati, la valutazione delle prestazioni, l'ottimizzazione del piano e così via, in modo da ottenere la ricostruzione automatica del sistema di produzione.

Diversamente dai citati autori, Liu e altri⁴⁵ propongono un metodo di modellazione del gemello digitale ispirato al mimetismo biologico. Questo modello simula il processo fisico sulla base di tre aspetti: geometrico, comportamentale e ambientale e possiede caratteristiche

di variazione adattiva, che consentono la sincronizzazione delle modifiche del pezzo durante la lavorazione. Viene proposto, pertanto, un modello di gemello digitale a sei livelli, rappresentati dal livello di consumo, di servizio, di ragionamento, di persistenza, di ingestione e, infine, dal livello fisico. Quest'ultimo genera i segnali che vengono assorbiti dal livello di ingestione, immagazzinati nel livello di persistenza, calcolati dal livello di ragionamento e forniti al livello di servizio come dati, che verranno successivamente utilizzati nel livello di consumo.

7 Gemelli digitali complessi: caratteristiche e metodi di modellazione

Il gemello digitale sta diventando sempre più complesso, a causa della necessità di supportare simulazioni multi-scala e multi-scenario nella realtà operativa. Il modello complesso del DT è suddiviso in diversi modelli semplici, in base alla composizione, al contesto, al componente e al codice nell'architettura 4C.

Schleich e altri⁴¹ hanno individuato quattro importanti proprietà dei DT: scalabilità, interoperabilità, espandibilità e fedeltà. La scalabilità riguarda la capacità di fornire informazioni su scale diverse; l'interoperabilità si riferisce alla possibilità di convertire, combinare e stabilire l'equivalenza tra diverse rappresentazioni del modello; l'espandibilità consente di integrare, aggiungere o sostituire i DT rapidamente; la fedeltà significa perfetta aderenza della rappresentazione alle entità fisiche.

Il gemello digitale complesso, come accennato ha più funzioni, più scale dimensionali e di composizione, più scenari e così via. La scalabilità per i DT complessi è la capacità di presentare i dati corretti, trascurando quelli poco rilevanti, all'interno di una scala corrispondente.

Platenius-Mohr⁴⁶ ha definito l'interoperabilità dei DT complessi come la capacità di due o più sistemi o applicazioni di scambiarsi le informazioni e di utilizzarle reciprocamente. Poiché i gemelli digitali complessi possono essere composti da molti modelli semplici, l'interoperabilità dei DT complessi è intesa come la capacità di convertire e combinare diverse rappresentazioni di modelli, non soltanto degli stessi oggetti, ma anche di oggetti diversi. Analogamente, l'espandibilità dei DT complessi si riferisce alla capacità di integrare, aggiungere o sostituire i modelli di oggetti diversi. L'alta fedeltà, infine, significa che il gemello digitale può simulare il comportamento del gemello fisico nello spazio virtuale nella maniera più esatta possibile.

Tuttavia, è molto difficile costruire un DT complesso perfettamente equivalente ad un'entità fisica, a causa della limitatezza degli attuali metodi di modellazione e potenza di calcolo. Pertanto, la fedeltà dei DT complessi è da intendersi come la capacità di conservare un'elevata aderenza al prodotto fisico nelle funzioni o nei comportamenti richiesti.

E' da considerare, inoltre, che poiché un gemello digitale complesso comprende scale e contesti diversi, risulta difficile costruirlo direttamente in un'unica soluzione. Per questo motivo, in letteratura vengono proposte soluzioni di modellazione basate sulla divisione-assemblaggio. Innanzitutto, un gemello digitale complesso viene suddiviso in diversi gemelli digitali semplici e implementabili; successivamente, il DT complesso può essere suddiviso in vari livelli, a seconda della scala e dei contesti. Questi semplici gemelli digitali vengono, infine, assemblati in un gemello digitale complesso, che ha una funzione più completa. Il processo di modellazione di gemelli digitali complessi è sintetizzato nella Fig. 11.

Il gemello digitale complesso può essere diviso mediante un'architettura 4C, che contiene numerose caratteristiche, quali composizione, contesto, componente e codice. La composizione divide il gemello digitale in diversi livelli, il contesto rappresenta lo specifico

scenario applicativo, il componente è l'unità funzionale per la creazione di semplici gemelli digitali e il codice esprime l'implementazione specifica dei componenti.

Il processo di implementazione dell'architettura 4C prevede, in primo luogo, la suddivisione del DT complesso in diversi livelli aventi scale differenti, mettendo in evidenza, da un lato, gli elementi di espressione effettivi e, dall'altro, i dettagli che è possibile trascurare. In seguito, ogni gemello digitale semplice viene suddiviso in più componenti funzionali, in base allo specifico processo di implementazione. I componenti vengono sviluppati e incapsulati, utilizzando un linguaggio o una piattaforma di programmazione appropriati. Infine, tutti i componenti appartenenti allo stesso contesto vengono integrati per costruire il semplice DT.

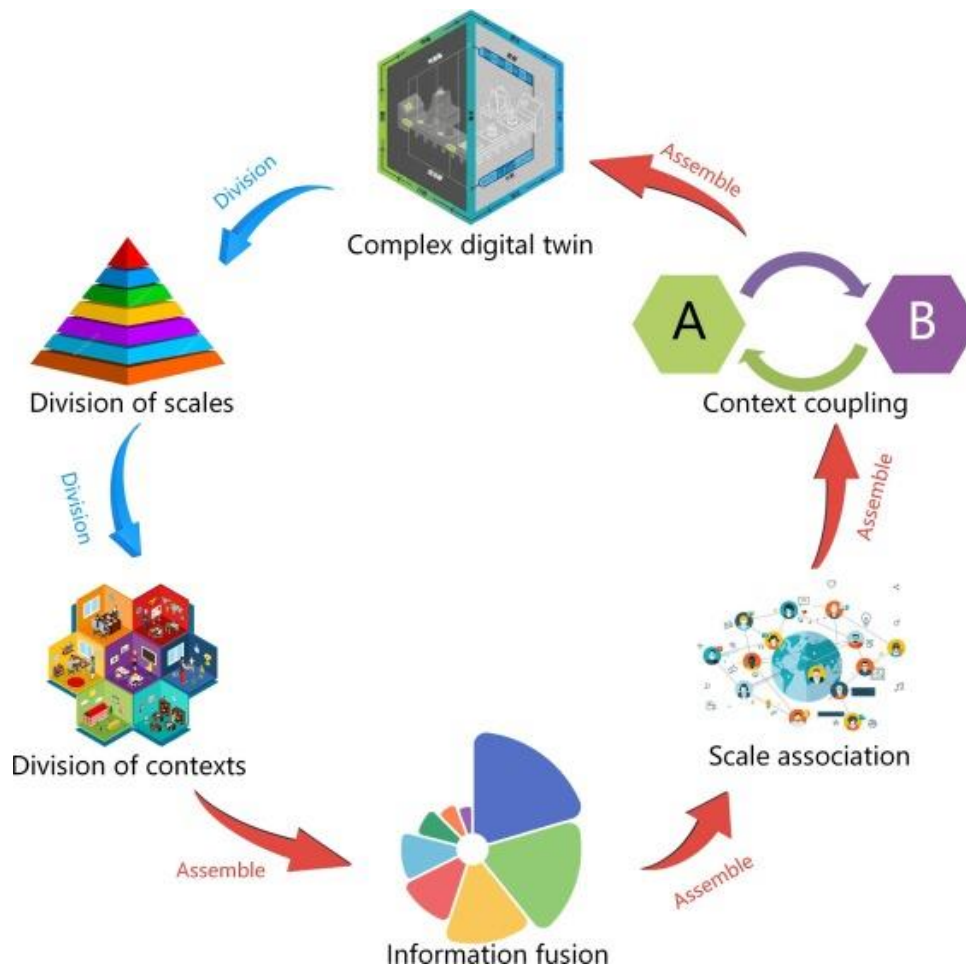


Fig. 11. Processo di modellazione di gemelli digitali complessi (da “From simple Digital Twin to complex Digital Twin part I: a novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin”, Wenjie Jia, Wei Wang, Zhenzu Zhang).

8. Tecnologie dei gemelli digitali

Come accennato in altre sezioni, i tre aspetti principali dei DT sono: l'acquisizione dei dati, la modellazione dei dati e l'applicazione dei dati⁴⁷. Il Digital Twin utilizza quattro tecnologie basilari per raccogliere e archiviare i dati in tempo reale, ottenere informazioni e creare una fedele rappresentazione digitale di un asset fisico. Queste tecnologie includono l'Internet of Things (IoT), l'Artificial Intelligence (AI), l'Extended Reality (XR) e il Cloud Computing, come rappresentato in Fig. 12.

Il DT utilizza, inoltre, una determinata tecnologia, a seconda del tipo di applicazione e in misura maggiore o minore.

- 1) *Internet of Things (IoT)*: si riferisce ad una vasta rete di "cose" connesse. La connessione è tra cose-cose, persone-cose, persone-persone. I gemelli digitali utilizzano l'IoT quale tecnologia principale in ogni applicazione. L'Internet of Things si avvale di sensori per raccogliere informazioni da oggetti del mondo reale, che vengono utilizzati per creare una duplicazione digitale dell'oggetto fisico. La versione digitale, può quindi essere analizzata, modificata e ottimizzata, mentre il costante aggiornamento dei dati dell'IoT aiuta le applicazioni DT a creare una rappresentazione virtuale in tempo reale dell'asset fisico.
- 2) *Cloud Computing*: riguarda la fornitura di servizi ospitati su Internet. La tecnologia archivia e accede in modo efficiente ai dati presenti sulla rete e il cloud computing consente ai gemelli digitali di elaborare i dati e di archivarli nel cloud virtuale, per consultarli facilmente da qualsiasi luogo. Il cloud computing permette ai DT di ridurre drasticamente il tempo di calcolo dei sistemi complessi e superare le difficoltà provenienti da grandi moli di dati.

- 3) *Artificial Intelligence (AI)*: quale disciplina dell'informatica, l'AI cerca di imitare le basi dell'intelligenza umana, per creare una nuova macchina intelligente in grado di rispondere come l'uomo. Le aree di studio includono la robotica, il riconoscimento delle immagini e del linguaggio, le reti neurali, il machine learning, il deep learning e i sistemi esperti; tali strumenti assistono i Digital Twin, consentendo di analizzare automaticamente i dati ottenuti e restituire preziose informazioni, fare previsioni sui risultati e dare suggerimenti su come evitare potenziali problemi.
- 4) *Extended Reality (XR)*: è un termine generico, utilizzato per descrivere tecnologie immersive, come la realtà virtuale (VR), la realtà aumentata (AR) e la realtà mista (MR). Queste tecnologie consentono di fondere il mondo fisico con quello virtuale ed estendere la realtà che sperimentiamo. L'XR crea rappresentazioni digitali di oggetti in cui mondo fisico e virtuale coesistono e interagiscono tra loro in tempo reale. I DT utilizzano le funzionalità XR per modellare digitalmente oggetti fisici, permettendo agli utenti di interagire con i contenuti digitali.

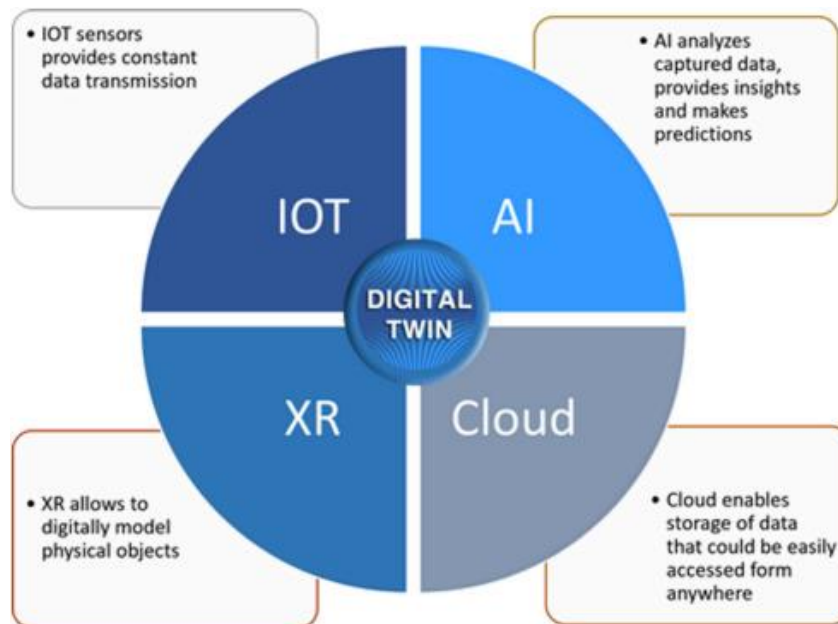


Fig. 12. Tecnologie dei gemelli digitali (da "Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities", Mohsen Attaran, Bilge Gokhan Celik).

CAPITOLO 4

9 Scenari applicativi dei DT attuali e futuri

L'ingegneria e la produzione industriale utilizzano prevalentemente i gemelli digitali per fornire rappresentazioni virtuali accurate di oggetti fisici e simulazioni di processi operativi. L'applicazione dei modelli di DT nella produzione è vasta e, al tempo stesso, dettagliata. Tuttavia, sia i gemelli digitali che i sistemi cyber-fisici possono essere applicati a grandi sistemi industriali e realizzare l'interazione virtuale-reale, mediante i rispettivi metodi di mappatura. Il DT, però, ha un'ampia gamma di applicazioni, anche in altri settori, quali la sanità intelligente e le città intelligenti.

In altri termini, il gemello digitale enfatizza la corrispondenza tra un'entità fisica e il suo modello virtuale, ottimizzando le prestazioni degli asset fisici, attraverso l'interazione di dati virtuali e reali. I sistemi cyber-fisici considerano sistemi composti da più dispositivi fisici ed effettuano operazioni di acquisizione ed elaborazione dei dati dal sistema.

Quindi, i gemelli digitali e i sistemi cyber-fisici rappresentano tecnologie diverse con finalità applicative e metodi di implementazione differenti. A seconda della specifica richiesta di applicazione, è necessario selezionare la tecnologia adeguata.

I modelli di gemelli digitali funzionano in settori come l'energetico, l'aerospaziale, l'automobilistico, nell'ingegneria edile, nell'urbanistica, nella sanità, nell'agricoltura e così via.

9.1 Applicazioni dei DT nella produzione

La crescente automatizzazione dei processi dell'Industria 4.0 spinge verso l'adozione di tecnologie avanzate per ridurre i costi operativi e di gestione, mediante valutazioni

preventive ed ipotesi “what if”. In tale contesto dinamico, la tecnologia Digital Twin esprime un enorme potenziale, essendo in grado di modificare in maniera notevole la produzione.

Esistono numerosi casi d’uso per il DT in campo produttivo, tra cui il monitoraggio, la simulazione, il controllo remoto di risorse fisiche attraverso oggetti virtuali; si tratta di processi finalizzati ad incrementare il livello di soddisfazione della clientela, nel tentativo di comprenderne le esigenze e apportare migliorie a prodotti, operazioni e servizi esistenti.

Le aziende manifatturiere, servendosi dei DT, sono in grado di passare dall’essere reattive all’essere predittive. Questo significa che possono prevedere quando l’asset fisico esaurirà il proprio ciclo di vita o avrà bisogno di riparazioni oppure quando è necessario migliorare le prestazioni della macchina, cercando di prolungarne la vita utile.

Di seguito vengono riportate le fasi della produzione e il ruolo che i DT svolgono in ciascuna fase.

9.1.1 Design del prodotto

Le decisioni relative alla progettazione di prodotti e servizi sono scelte strategiche per i manager, poiché possono avere un notevole impatto su tutta l’organizzazione aziendale. Tuttavia, considerando che un Digital Twin consente di replicare in maniera virtuale un asset di produzione, raccoglie dati e offre la possibilità di creare, costruire, testare, convalidare l’analisi predittiva e l’automazione, gli ingegneri possono utilizzare il prototipo virtuale dei DT durante la fase di progettazione, prima di scegliere un prototipo valido. Ciò permette di avere un numero di modelli ridotto e una contrazione dei tempi e dei costi di produzione.

9.1.2 Progettazione e ottimizzazione dei processi

I Digital Twin supportano i produttori nell'osservazione dei processi in condizioni di prestazioni multiple, cercando di eliminare i problemi prima ancora che si verifichino.

I DT, inoltre, aiutano a trasformare le risorse esistenti in strumenti che consentono di ottimizzare i processi, risparmiare denaro e accelerare l'innovazione.

9.1.3 Gestione della catena di approvvigionamento

Le sfide della catena di approvvigionamento (supply chain), relative alle prestazioni degli imballaggi, alla gestione della flotta e all'efficienza del percorso, possono essere risolte dai Digital Twin. I gemelli digitali, inoltre, risultano di fondamentale importanza anche in altre fasi della supply chain, tra cui la progettazione del prodotto, il suo sviluppo e la sua distribuzione.

9.1.4 Manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva si focalizza sul prevedere quando effettuare la manutenzione di un componente o di un sistema, al fine di ridurre i costi e aumentare il tempo di esercizio della macchina.

L'utilizzo dei Digital Twin nella manutenzione preventiva consente di modificare specifici processi di produzione o modellare singole apparecchiature, per individuare tutte quelle variazioni che indicano la necessità di effettuare riparazioni o manutenzioni. L'obiettivo, dunque, è stimare, prevedere, rilevare o diagnosticare lo stato di un componente o di un sistema per effettuare una manutenzione mirata e più efficace.

9.1.5 Collaborazione interfunzionale

I gemelli digitali vengono utilizzati per raccogliere dati operativi che forniscono, nel tempo, approfondimenti sulle prestazioni del prodotto, sulla distribuzione e sull'esperienza dell'utente finale. Tali dati possono essere condivisi da ingegneri, responsabili della produzione, delle vendite e del marketing.

9.2 Digital Twin in agricoltura

L'agricoltura è un settore primario, ma complesso e incerto. Il processo di produzione è dinamico, perchè, da un lato, le colture sono influenzate da condizioni naturali, come il clima, il terreno, ecc., dall'altro, gli agricoltori, responsabili della gestione e del funzionamento dell'azienda agricola, devono valutare costantemente le strategie di produzione per adattarle alle mutevoli condizioni di mercato.

Il gemello digitale facilita senza dubbio la gestione dei processi operativi nelle aziende agricole, consentendo di pianificare, monitorare, controllare e ottimizzare la gestione aziendale.

Grazie ai DT, ad esempio, gli agricoltori possono gestire da remoto le diverse operazioni, sulla base di informazioni digitali, senza necessità di osservazione diretta e attività manuali in loco. In questo modo gli agricoltori possono agire immediatamente, quando si verificano deviazioni e simulare gli effetti degli interventi, utilizzando modelli di aziende agricole virtuali, basati su dati del mondo reale.

I DT possono essere, inoltre, utilizzati per la gestione del processo di crescita delle colture. La complessità delle filiere agroalimentari pone diversi ostacoli alla tracciabilità e alla gestione dei prodotti, per garantire la qualità del cibo. La tecnologia DT supporta gli agricoltori nel migliorare la tracciabilità e la trasparenza.

L'agricoltura "gemella digitale" è, tuttavia, ancora agli esordi, con molte difficoltà. E' necessario, ad esempio, un buon segnale di rete e una copertura completa, per garantire l'integrità dei dati e ottenere la sincronizzazione in tempo reale; spesso, però, la copertura di rete nelle aree rurali è limitata e non consente il corretto funzionamento del modello.

9.3 Digital Twin nell'industria automobilistica e aeronautica

La forte concorrenza tra i produttori per la costruzione di veicoli innovativi ed intelligenti sta incoraggiando le aziende a investire ingenti capitali nella ricerca e sviluppo dei prodotti e nell'automazione dei processi. Diverse case automobilistiche stanno adottando le tecnologie DT per migliorare l'esperienza e il coinvolgimento dei clienti.

Dallara, azienda leader a livello mondiale nella costruzione di automobili da competizione, anziché sviluppare prototipi di scocche e testarli in gallerie del vento e in altri laboratori, costruisce dei modelli digitali; eseguendo numerose prove e simulazioni sul DT, si arriva alla finalizzazione del progetto. Quando il modello in bit è pronto, attraverso varie tipologie di macchine (stampanti tridimensionali e robot), si "convertono" i bit in atomi, ottenendo il prodotto finale. In questo modo, tutto il processo di progettazione diventa più rapido perché si possono fare verifiche che non sarebbero possibili con un mock-up fisico e, inoltre, risulta più agevole testare anche soluzioni diverse, cambiare forme e materiali, valutare strutture alternative e così via.

Tesla, ad esempio, sfrutta i modelli digitali per offrire un servizio più completo alla clientela. Ogni auto sviluppata, infatti, possiede un proprio Digital Twin che raccoglie costantemente dati relativi agli ostacoli presenti sul percorso oppure dati riguardanti il funzionamento del motore. Queste informazioni contribuiscono a realizzare una mappa costantemente

aggiornata delle strade e consentono di verificare eventuali malfunzionamenti “strutturali”, cioè dipendenti dalla progettazione.

La tecnologia DT è ampiamente adottata anche in ambito aerospaziale. Essa, infatti, viene utilizzata per la manutenzione dei velivoli, il tracciamento, il monitoraggio del peso, la previsione delle condizioni meteorologiche, la misurazione del tempo di volo e il rilevamento dei difetti. Ad esempio, Boeing, la più grande azienda aerospaziale del mondo, sfrutta dei modelli digitali per migliorare la qualità e la sicurezza delle parti e dei sistemi utilizzati per produrre aeroplani commerciali e militari. La Boeing, ma in particolare i suoi fornitori, ricevono le specifiche delle parti con cui il loro componente dovrà interfacciarsi in bit, fornendo una rappresentazione futura, sempre in cifre binarie, all’azienda. Quest’ultima esegue un’integrazione a livello di bit, effettuando test e simulazioni, passando, successivamente, alla produzione.

9.4 Digital Twin nella sanità

Le applicazioni di DT nel settore sanitario sono illimitate e la pandemia di COVID-19 ha costretto tale settore ad accelerare la digitalizzazione.

Nella scoperta e nello sviluppo di farmaci, i Digital Twin rivestono un ruolo fondamentale, poiché il numero di dati da gestire risulta elevato. Tali dati vengono utilizzati per creare modelli mediante gemelli digitali che, a loro volta, possono accelerare le sperimentazioni cliniche nella ricerca sui farmaci.

L’utilizzo di Digital Twin nella ricerca clinica, infatti, è estremamente importante, in quanto essi consentono di prevedere l’impatto dei trattamenti sperimentali sui pazienti, ricavando informazioni utili, senza mettere a repentaglio la vita del paziente stesso. Ad esempio, un’università svedese ha creato un gemello digitale di topi affetti da artrite reumatoide per

comprendere l'effetto, ma, soprattutto, l'efficacia dei farmaci. La tecnologia DT supporta lo sviluppo della medicina personalizzata, individuando il miglior percorso di cura di un determinato paziente e portando più rapidamente sul mercato innovazioni salvavita. Siemens, ad esempio, ha sviluppato un gemello digitale del cuore umano, utilizzando milioni di immagini e rapporti clinici, per facilitare una comprensione approfondita delle condizioni cardiache e prevedere malattie o eventuali altri problemi di salute.

I gemelli digitali, inoltre, possono aiutare le organizzazioni sanitarie ad ottimizzare gli ospedali, nella pianificazione della capacità, dei flussi di lavoro, del personale e nell'erogazione delle cure. La ricerca sta sperimentando l'uso dei gemelli digitali per una comprensione avanzata del corpo umano, generando DT di una singola cellula, genoma oppure organi. In quest'ottica, i chirurghi possono utilizzare la replica digitale virtuale di un paziente per pianificare la procedura chirurgica e identificare i rischi associati all'intervento.

9.5 Digital Twin nell'edilizia

Nel settore edile la tecnologia del gemello digitale si affianca ai modelli di progettazione già esistenti, consentendo il monitoraggio del processo di costruzione, l'identificazione dei potenziali problemi, il controllo e la valutazione della qualità costruttiva, la pianificazione della sicurezza nel cantiere e la logistica delle risorse.

9.6 Digital Twin nel settore energetico

La crescente complessità degli attuali sistemi energetici rende la digitalizzazione dei relativi asset un'esigenza fondamentale nel settore delle utilities.

La tecnologia DT può essere uno strumento utile per l'ottimizzazione delle risorse, migliorare la pianificazione della produzione, la manutenzione, l'efficienza degli impianti e la mitigazione dei rischi connessi.

Un recente studio ha proposto una rete elettrica digitale, basata sulla tecnologia DT, in grado di digitalizzare sia l'intero processo, sia tutti gli elementi e i servizi della rete elettrica fisica.

10 Ricerche future e osservazioni conclusive

Il gemello digitale è una metodologia efficace e con grandi potenzialità, che combina la modellazione, la simulazione, l'autonomia, la prototipazione, l'ottimizzazione e i big data in un unico strumento. Tuttavia, sono ancora numerose le domande senza risposta sui gemelli digitali e, per il loro sviluppo, i passi futuri indispensabili sono i seguenti:

- 1) una definizione formale di DT: poiché non esiste, ad oggi, una definizione univoca di gemello digitale, avere una spiegazione formale di Digital Twin aiuterebbe a chiarire il concetto e progredire verso una definizione universalmente accettata.
- 2) standard di IoT richiesti per i DT: dato che i Digital Twin fanno leva sui dispositivi IoT per l'acquisizione e la condivisione dei dati, la sincronizzazione e il monitoraggio in tempo reale, sapere quali standard IoT siano più adatti per questi processi agevolerebbe l'adozione diffusa dei gemelli digitali.
- 3) normative a livello aziendale e globale: poiché molte aziende collaborano in diversi settori, disporre di normative vincolanti sui dati utilizzati nel DT è fondamentale per un funzionamento del gemello digitale regolare ed efficace.
- 4) collaborare con esperti di dominio per estendere l'uso di DT a tutti i settori: allo scopo di facilitare l'implementazione e l'accettazione dei Digital Twin in nuovi domini, la comunicazione con esperti di dominio risulta cruciale. Infatti, una volta che il progetto

in un formato specifico del dominio è pronto, l'implementazione del framework dei DT può essere gestita da programmatori e sviluppatori.

- 5) implementazioni globali: ad oggi esistono solo implementazioni a livello di area locale o di Paese. Per sistemi più grandi come le reti di supply chain e la logistica, le implementazioni globali potrebbero avere un impatto molto maggiore.

In prospettiva, gli scenari di ricerca potrebbero riguardare, ad esempio, i casi d'uso implementati industrialmente dei DT, per identificare quale il livello di maturità raggiunto.

E' possibile, sempre in ottica futura, valutare in che modo supportare l'utilizzo dei modelli di Digital Twin; ad esempio, se i modelli di DT non sono coerenti con i rispettivi oggetti fisici è fondamentale capire quale strategia adottare per il loro adeguamento, come poterli modificare servendosi di dati in tempo reale e, infine, valutare il loro livello di coerenza.

Ulteriori ricerche future potrebbero incentrarsi sulla modellazione e in particolare sui suoi aspetti. Risulta fondamentale, infatti, porre l'attenzione sulla consistenza, la coerenza e la collaborazione tra gli aspetti di modellazione nella loro implementazione, ma anche sviluppare una piattaforma software che sia in grado di incorporarli tutti. In sintesi, gli attuali studi su come modellare i gemelli digitali si concentra principalmente sulla costruzione del modello e non sull'integrità della modellazione.

Prospettivamente i DT si estenderanno a un maggior numero di settori, dove le soluzioni si combineranno con diverse tecnologie, come la realtà aumentata (AR), per un'esperienza coinvolgente e funzionalità di intelligenza artificiale per connessioni, approfondimenti e analisi.

In conclusione, i Digital Twin stanno generando una vera e propria rivoluzione digitale, altamente avanzata, nel tentativo di rendere il mondo un luogo migliore per l'umanità.

11 ***Bibliografia***

1. Cearley, D. *et al.* Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2020 - Smarter With Gartner. *Gartner* (2019).
2. Gartner. Gartner Top Strategic Technology Trends for 2021. *Smarter with Gartner* (2020).
3. Panetta, K. Gartner Top Strategic Predictions for 2020 and Beyond. *Gartner* (2019).
4. Report N:A.S.A., 1970. *Apollo 13 - Houston, we've got a problem.*
5. Topp A.R., 1988. Use of the tracking and data relay satellite system (TDRSS) with low Earth orbiting satellites (LEO: a decision guide).
6. Boyes, H. & Watson, T. Digital twins: An analysis framework and open issues. *Comput Ind* **143**, (2022).
7. Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R. & Glaessgen, E. Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap. *Technology Area* (2010).
8. Negri, E., Berardi, S., Fumagalli, L. & Macchi, M. MES-integrated digital twin frameworks. *J Manuf Syst* **56**, (2020).
9. Bolton, R. N. *et al.* Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms. *Journal of Service Management* **29**, (2018).
10. Glaessgen, E. H. & Stargel, D. S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles. in *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* (2012).
11. Grieves, M. & Vickers, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (2016).
12. Tao, F. *et al.* Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **94**, (2018).
13. Fu, Y., Z. G., Z. M. *et al.* Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance: An Overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (2022).
14. van der Valk, H. *et al.* A taxonomy of digital twins. in *26th Americas Conference on Information Systems, AMCIS 2020* (2020).
15. Catapult, H. V. M. Untangling the requirements of a digital twin (2021). *Univ. Sheff. Adv. Manuf. Res. Cent. (AMRC)* (2021).

16. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* **51**, 1016–1022 (2018).
17. Terkaj, W. & Urgo, M. Ontology-based modeling of production systems for design and performance evaluation. in *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* 748–753 (IEEE, 2014).
18. Ríos, J., Hernández, J. C., Oliva, M. & Mas, F. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft. in *Advances in Transdisciplinary Engineering* vol. 2 (2015).
19. Miller, A. M. D., Alvarez, R. & Hartman, N. Towards an extended model-based definition for the digital twin. *Comput Aided Des Appl* **15**, (2018).
20. C.Y. Wong, D. M. A. A. Z. V. A. The intelligent product driven supply chain, in: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. **4**, 6–6 (2002).
21. McFarlane, D. C. & Bussmann, S. Developments in holonic production planning and control. *Production Planning and Control* **11**, (2000).
22. Adamenko, D., Kunnen, S. & Nagarajah, A. Digital Twin and Product Lifecycle Management: What Is the Difference? in *IFIP Advances in Information and Communication Technology* vol. 594 (2020).
23. Gill H. *National Science Foundation perspective and status on cyber-physical systems*. (2006).
24. Boyes H. *A security framework for cyber-physical systems*. (2017).
25. Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J. & Watson, T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Comput Ind* **101**, 1–12 (2018).
26. Alam, K. M. & el Saddik, A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access* **5**, (2017).
27. Son, Y. H., Park, K. T., Lee, D., Jeon, S. W. & do Noh, S. Digital twin-based cyber-physical system for automotive body production lines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **115**, (2021).
28. Liu, X. *et al.* A systematic review of digital twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications. *Advanced Engineering Informatics* **55**, 101876 (2023).
29. Wan, J., Yan, H., Suo, H. & Li, F. Advances in cyber-physical systems research. *KSII Transactions on Internet and Information Systems* vol. 5.
30. M. Bevilacqua, E. Bottani, F. E. Ciarapica, F. Costantino, L. Di Donato, A. Ferraro, G. Mazzuto, A. Monteriù, G. Nardini, M. Ortenzi, M. Paroncini, M. Pirozzi, M.

- Prist, E. Quatrini, M. Tronci, G. Vignali *Digital Twin reference model development to prevent operators' risk in process plants*. (2020).
31. Sun, X. *et al.* A digital twin-driven approach for the assembly-commissioning of high precision products. *Robot Comput Integr Manuf* **61**, (2020).
 32. Duan, J. G., Ma, T. Y., Zhang, Q. L., Liu, Z. & Qin, J. Y. Design and application of digital twin system for the blade-rotor test rig. *J Intell Manuf* **34**, (2023).
 33. Choi, S. H. *et al.* An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation. *Robot Comput Integr Manuf* **73**, (2022).
 34. Nikolakis, N., Alexopoulos, K., Xanthakis, E. & Chryssolouris, G. The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor. *Int J Comput Integr Manuf* **32**, (2019).
 35. Aivaliotis, P., Georgoulas, K. & Chryssolouris, G. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing. *Int J Comput Integr Manuf* **32**, (2019).
 36. Wagg, D. J., Worden, K., Barthorpe, R. J. & Gardner, P. Digital Twins: State-of-The-Art and Future Directions for Modeling and Simulation in Engineering Dynamics Applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering* **6**, (2020).
 37. Kong, T., Hu, T., Zhou, T. & Ye, Y. Data Construction Method for the Applications of Workshop Digital Twin System. in *Journal of Manufacturing Systems* vol. 58 (2021).
 38. Huang, S., Wang, G., Yan, Y. & Fang, X. Blockchain-based data management for digital twin of product. *J Manuf Syst* **54**, (2020).
 39. Wang, K. J., Lee, Y. H. & Angelica, S. Digital twin design for real-time monitoring—a case study of die cutting machine. *Int J Prod Res* **59**, (2021).
 40. Liu, Q., Zhang, H., Leng, J. & Chen, X. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *Int J Prod Res* **57**, (2019).
 41. Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. & Wartzack, S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals* **66**, 141–144 (2017).
 42. Negri, E., Fumagalli, L. & Macchi, M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. in *Procedia Manufacturing* vol. 11 (2017).
 43. Wu, C., Zhou, Y., Pereira Pessôa, M. V., Peng, Q. & Tan, R. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model. *J Manuf Syst* **58**, (2021).

44. Zhang, C. *et al.* Digital twin-enabled reconfigurable modeling for smart manufacturing systems. *Int J Comput Integr Manuf* **34**, (2021).
45. Liu, S. *et al.* Digital twin modeling method based on biomimicry for machining aerospace components. *J Manuf Syst* **58**, (2021).
46. Platenius-Mohr, M., Malakuti, S., Grüner, S., Schmitt, J. & Goldschmidt, T. File- and API-based interoperability of digital twins by model transformation: An IIoT case study using asset administration shell. *Future Generation Computer Systems* **113**, (2020).
47. Lv, Z. & Xie, S. Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin* **1**, (2021).