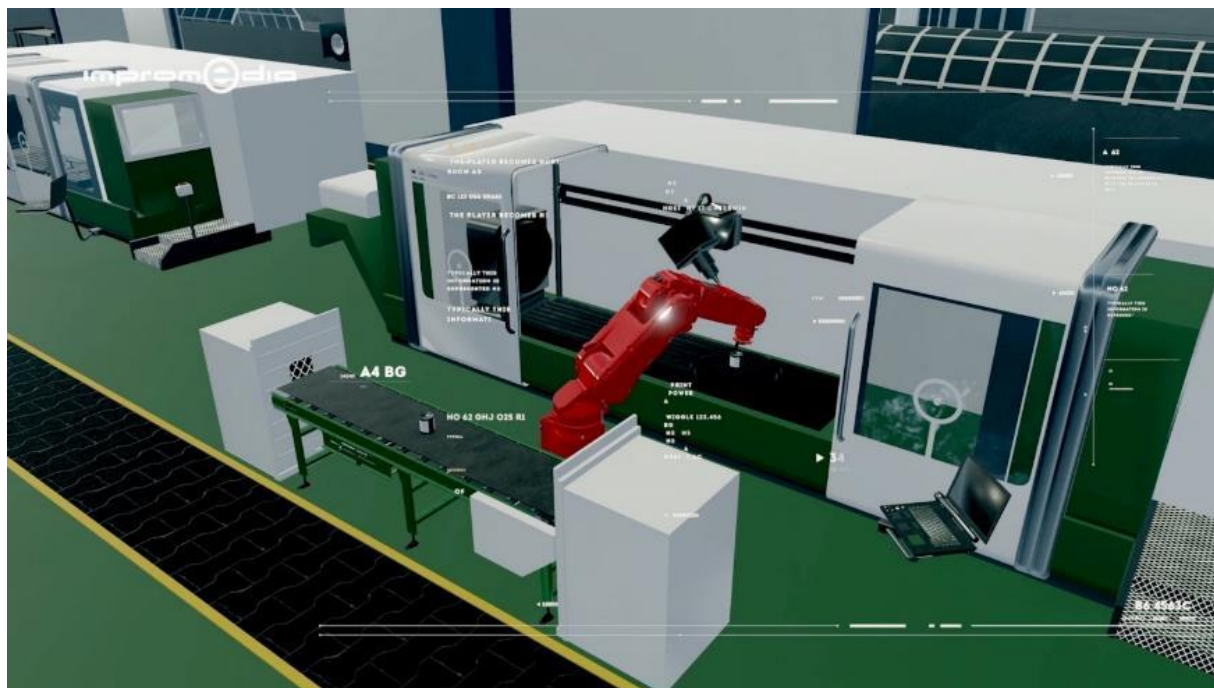




Universitatea Politehnică din București  
Facultatea Inginerie Industrială și Robotică  
Departamentul Mașini și Sisteme de Producție

## Platformă de coordonare a fluxurilor materiale și informaționale în Industria 4.0

- *Rezumat* -



Doctorand: Deac Gicu Călin

Coordonator: Prof. dr. ing. Costel Emil Coteț

2022

# CUPRINS

CUPRINS.....	2
Listă de abrevieri.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Listă de figuri.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1. INTRODUCERE. PILONII INDUSTRIEI 4.0 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1. Introducere .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1.1. Prezentarea domeniului tezei de doctorat. Motivația temei de cercetare .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1.2. Obiectivele tezei de doctorat .....	5
1.1.3. Structura tezei de doctorat .....	6
1.2. Industria 4.0.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.1. 3D Printing .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.2. Nanotehnologia.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.3. Cloud Computing .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.4. Internetul tuturor lucrurilor.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.5. Sistemele cyber-fizice.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.6. Roboții autonomi și colaborativi .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.7. Simularea .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.8. Realitatea augmentată și virtuală.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2.9. Securitatea cibernetică.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3. Lista protocoalelor de automatizare .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3.1. Protocoale de automatizare a proceselor .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3.2. Protocoale de control industrial.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4. Concluzii .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2. STADIUL ACTUAL AL PLATFORMELOR CLOUD INDUSTRIALE	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1. Introducere .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2. Servicii de Cloud Computing.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3. Platforme Cloud pentru aplicații industriale .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3.1. Platforme Cloud industriale dezvoltate de companii industriale	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3.2. Platforme Cloud industriale lansate de către firmele de dezvoltare software	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

2.3.3. Analiza principalelor platforme Cloud industriale	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.4. Concluzii	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3. REALITATEA AUGMENTATĂ ȘI REALITATEA VIRTUALĂ, CA INSTRUMENTE ÎN INDUSTRIA 4.0	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.1. Introducere	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.2. Istoricul realității virtuale și augmentate	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.3. Conceptul de realitate virtuală	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.4. Rezoluția HMD și distanța de percepție maximă	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.5. Dispozitive de deplasare omnidirecțională în mediul virtual	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.6. Concluzii	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4. COORDONAREA FLUXURILOR MATERIALE ȘI INFORMAȚIONALE ÎN INDUSTRIA 4.0	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1. Introducere	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.2. Colectarea datelor furnizate de senzori	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3. Metoda inovativă pentru criptarea, transmiterea, stocarea și citirea volumelor de date de mari dimensiuni	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3.1. Metoda utilizând imagini png 24 bit	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3.2. Metoda utilizând imagini png 32 bit	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3.3. Sistemul online de transmitere și stocare a informațiilor utilizând imaginile	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4. Platforma de realitate virtuală colaborativă 8agora	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.1. Aplicația GOTO	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.2. Aplicația de teleportare în grup	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.3. Aplicația de expresivitate a avatarului	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.4. Aplicația Etichete de nume	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.5. Aplicația de focalizare audio	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.6. Aplicația desktop la distanță	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.7. Aplicația pentru tablă interactivă	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.8. Aplicația de prezentare	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.9. Aplicația de traducere automată	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.10. Aplicația pentru videoconferință	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.11. Aplicația de streaming live	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.12. Aplicația de cameră virtuală automată	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

4.4.13. Aplicația de import și vizualizare a modelelor CAD 3D	Error! Bookmark not defined.
4.4.14. Aplicația middleware pentru IoT	Error! Bookmark not defined.
4.5. Extinderea domeniului de aplicabilitate a platformei ...	Error! Bookmark not defined.
4.5.1. Birouri virtuale pentru lucru colaborativ	Error! Bookmark not defined.
4.5.2. Învățare la distanță	Error! Bookmark not defined.
4.5.3. Conferințe	Error! Bookmark not defined.
4.5.4. Târguri expoziționale	Error! Bookmark not defined.
4.5.5. Divertisment	Error! Bookmark not defined.
4.5.6. Studiouri de televiziune virtuale	Error! Bookmark not defined.
4.6. Concluzii	Error! Bookmark not defined.
5. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE	Error! Bookmark not defined.
5.1. Concluzii generale	Error! Bookmark not defined.
5.2. Contribuții personale	Error! Bookmark not defined.
5.3. Perspective de continuare a cercetărilor	Error! Bookmark not defined.
Bibliografie	23
Anexa 1. Catalogul furnizorilor de platforme IoT	Error! Bookmark not defined.

## **Rezumat**

În ultimii ani, datorită informatizării proceselor de fabricație și a creșterii gradului de utilizare a prototipurilor virtuale de tip „digital twin” (geamăn digital), asistăm la o creștere exponențială a necesității de coordonare și gestionare integrată a fluxurilor informaționale alături de cele materiale. Este necesar a se dezvolta tehnologii, echipamente, metode inovative pentru colectarea, transmiterea, gestionarea, prelucrarea și vizualizarea datelor de mari dimensiuni care să asigure transmiterea datelor provenite din monitorizarea sistemului real către digital twin și a comenzilor dinspre digital twin spre sistemul real.

Dacă modulul de proiectare asistată generează prototipul virtual al produsului, modulul de gestionare a fluxurilor ce constituie nodul central al acestei platforme generează prototipul virtual (digital twin) al arhitecturii de fabricație. Prin simularea fluxurilor materiale la nivelul acestui prototip virtual se pot obține diagnoze și se pot valida soluții de fiecare dată când intervin modificări ale arhitecturii de fabricație ca urmare a introducerii în producție a unor noi produse.

Prototipul virtual al arhitecturii de fabricație reprezintă de asemenea principalul instrument de optimizare atunci când o arhitectură de fabricație preliminară trebuie definitivată și validată. Se poate observa că în aplicațiile sale din ingineria industrială acest modul particularizează practic o serie de algoritmi generali de optimizare din teoria fluxurilor materiale (Cotet CE et al., 2014). Modulul central al platformei propuse în această teză va asigura în același timp și gestionarea fluxurilor informaționale între prototipul virtual și sistemul real.

### **Obiectivele tezei de doctorat**

Pornind de la analiza contextului celei de-a patra revoluții industriale și a soluțiilor software existente pe piață în zona IIoT (Industrial Internet of Things – internetul lucrurilor în domeniul industrial), cercetările realizate în această teză pornesc de la o abordare diferită, inovativă în implementarea unei platforme IIoT care să ofere o alternativă în procesul de colectare, stocare și prelucrare a datelor dar și a modului de vizualizare și interacțiune cu acestea.

**Obiectivul principal** al cercetărilor realizate în cadrul tezei s-a concentrat în concepția și dezvoltarea unei platforme colaborative ce folosește realitatea virtuală (VR) pentru a permite vizualizarea, simularea și optimizarea fluxurilor materiale și informaționale în arhitecturile de fabricație.

Pentru atingerea acestui obiectiv principal a fost necesară abordarea unor **obiective secundare** ale cercetării, după cum urmează:

- cercetări teoretice preliminare privind conceptul de Industrie 4.0, stadiul actual al platformelor Cloud industriale, realitatea virtuală și augmentată;
- dezvoltarea unei metode de transmitere și stocare a datelor de mari dimensiuni, utilizând ca mediu de stocare imaginile în format PNG;
- dezvoltarea unei aplicații middleware bazată pe mesaje pentru sincronizarea mașinilor virtuale;
- dezvoltarea unui sistem vision pentru monitorizarea liniilor de fabricație;
- integrarea unei platforme de realitate virtuală colaborativă, ca mediu de dezvoltare,
- proiectarea de aplicații integrate pentru această platformă;
- extinderea domeniului de aplicabilitate al platformei.

### **Structura tezei de doctorat**

Prezenta cercetare este structurată după cum urmează:

În partea a doua din primul capitol sunt analizate instrumentele pilon ale conceptului de Industrie 4.0 și identificate cele utile în concepția și dezvoltarea platformei.

În al doilea capitol sunt prezentate cercetări privind stadiul actual al platformelor Cloud industriale, pentru a evidenția acele insuficiențe ale soluțiilor existente ce conduc la necesitatea realizării platformei propuse în teză.

În capitolul al treilea este realizat un studiu privind realitatea virtuală (concept, istoric, stadiu actual) cu un accent pe acele elemente utilizate în cadrul platformei pentru a soluționa unele limitări identificate la platformele existente. Toate cele trei capitole fundamentează teoretic concepția și dezvoltarea soluțiilor originale înglobate în platforma realizată în cadrul tezei pornind de la rezultatele analizei sintetizate în concluziile fiecărui capitol.

Capitolul patru descrie cercetările privind concepția și dezvoltarea unei platforme IIoT originale, ce include o metodă inovativă și un sistem online de criptare, transmitere, stocare și citire a volumelor de date de mari dimensiuni (cerere Brevet de invenție național, OSIM A 2017 00174) integrând realitatea virtuală colaborativă și aplicații ale acesteia pentru coordonarea fluxurilor materiale și informaționale din industrie utilizând un twin digital al arhitecturilor de fabricație. Sunt incluse și studii privind extinderea domeniului de utilizare al platformei pentru birouri virtuale, învățare la distanță, conferințe, târguri expoziționale, divertisment și studiouri de televiziune virtuale.

Capitolul cinci prezintă concluziile generale, contribuțiile personale și perspectivele de continuare a cercetărilor.

## **Metoda inovativă pentru criptarea, transmiterea, stocarea și citirea volumelor de date de mari dimensiuni**

În prezent, datorită creșterii nivelului de automatizare și a trecerii la Industria 4.0 există la nivel mondial o cerere ridicată de dezvoltare și implementare a unor sisteme de preluare, arhivare și interpretare a volumelor de date de mari dimensiuni (Big Data) în Cloud, care să asigure integritatea datelor, criptarea lor în vederea protejării și posibilitatea accesării valorilor istorice arhivate în vederea analizei și a optimizării proceselor.

Se cunosc în prezent sisteme de preluare și de arhivare a datelor istorice conform brevetelor de invenții EP 2042958 A2, US 7853568 B2, US 7831317 B2, WO 2014001037 A2, (<https://portal.unifiedpatents.com>), dar acestea nu au fost concepute pentru replicarea în Cloud, ele arhivând datele local. De asemenea, pentru comprimarea volumului de date aceste metode utilizează algoritmi de compresie care pot afecta valoric datele arhivate.

***“O imagine valorează cât zece mii de cuvinte!”***

*(Proverb Chinezesc)*

Nici una dintre metodele, programele de calculator sau sistemele prezentate în brevete de invenție sau în literatura de specialitate nu conține o referire cu privire la utilizarea imaginilor ca mediu de stocare a volumelor de date istorice de mari dimensiuni prin crearea și citirea lor iterativă directă la nivel de pixel.

În acest context, în cadrul tezei de doctorat s-a dezvoltat o metodă inovativă de arhivare a datelor numerice (întregi, float) sau text (UTF8) prin utilizarea imaginilor sau a fluxurilor video continue create din succesiuni de imagini generate într-un interval de timp. Această metodă implementează o soluție de criptare/decriptare a datelor utilizând o criptare/decriptare de suprafață la nivel de pixel pe baza unei imagini cheie (criptare simetrică).

În plus, generalizarea metodei propuse ca soluție alternativă de back-up a datelor pentru sistemele de baze de date clasice în vederea criptării, arhivării, transmiterii și restaurării acestora, se poate realiza și printr-un sistem online.

Metoda propusă (figura 1) constă în crearea unor imagini color (24 biți, 16 milioane de culori) ale căror pixeli sunt generați pe baza valorilor numerice sau alfanumerice de stocat.

Culoarea fiecărui pixel poate fi definită prin cele trei valori componente R, G și B cu valori între 0 și 255, respectiv 0 și FF în hexazecimal. (Deac G. et al., 2019)

Pentru encodare există mai multe variante de generare a pixelilor în funcție de tipul valorilor ce urmează a fi stocate:

- În cazul numerelor întregi pozitive, cuprinse între 0 și 16777215 encodarea se poate face direct prin convertirea numărului zecimal în hexazecimal (de exemplu 16777215 devine FFFFFFFF), șirul hexazecimal de 6 digiți se explodează în trei grupuri de câte doi digiți și fiecare din acest grup este convertit apoi în zecimal (ex. FF, devine 255) și se

crează pixelul având componentele RGB (R=255, G=255 și B=255, în acest caz un pixel alb, corespunzător valorii maxime ce poate fi stocată);

- În cazul numerelor întregi pozitive și negative poate fi utilizată aceeași variantă de encodare ca mai sus prin înjumătățirea valorii maxime la +/- 8388607, numerele encodându-se prin însumarea valorii la stocare cu 8388607, la decodare scăzând această valoare;
- În cazul numerelor float (standardul IEEE 754 dublă precizie) ([https://en.wikipedia.org/wiki/Double-precision\\_floating-point\\_format](https://en.wikipedia.org/wiki/Double-precision_floating-point_format)) acestea pot fi convertite în valori hexazecimale de 16 digiți: 00.00.00.00.00.00.00, necesitând astfel un număr de trei pixeli pentru stocare (R1G1B1, R2G2B2 și R3G3, ultima componentă B3, nemaifiind utilizată). Astfel, orice valoare float cu orice număr de zecimale, pozitivă sau negativă poate fi arhivată utilizând un grup de trei pixeli consecutivi. Imaginea va avea un număr de pixeli de trei ori mai mare decât numărul valorilor float arhivate. Pixelul neutilizat, poate fi disponibil pentru encodarea valorilor următoare.

```
function floathex64($num){
    $float64 = pack("d", $num);
    $binarydata64 = unpack('H*',
        $float64);
    return $binarydata64[1];
}
```

```
function hexfloat64($num){
    $binarydata64 = pack('H*',
        $num);
    $float64 = unpack("d",
        $binarydata64);
    return $float64[1];
}
```

- În cazul valorilor alfanumerice (UTF8) se face conversia fiecărui caracter alfanumeric în hexazecimal conform tabelii de encodare UTF8 sau unei tabele proprii definite de programator (spre exemplu A devine hex: 41, z devine hex: 7a), astfel că pe fiecare pixel se va putea stoca după conversia din hexazecimal în zecimal un număr de 3 caractere alfanumerice, câte unul pentru fiecare componentă R, G, respectiv B. Imaginea va avea un număr de pixeli egal cu o treime din numărul total de caractere.
- În cazul valorilor de tip boolean (adevărat, fals), acestea pot fi stocate câte trei pe fiecare pixel (unul pe fiecare componentă R,G sau B), ca valori 0 respectiv FF (255)



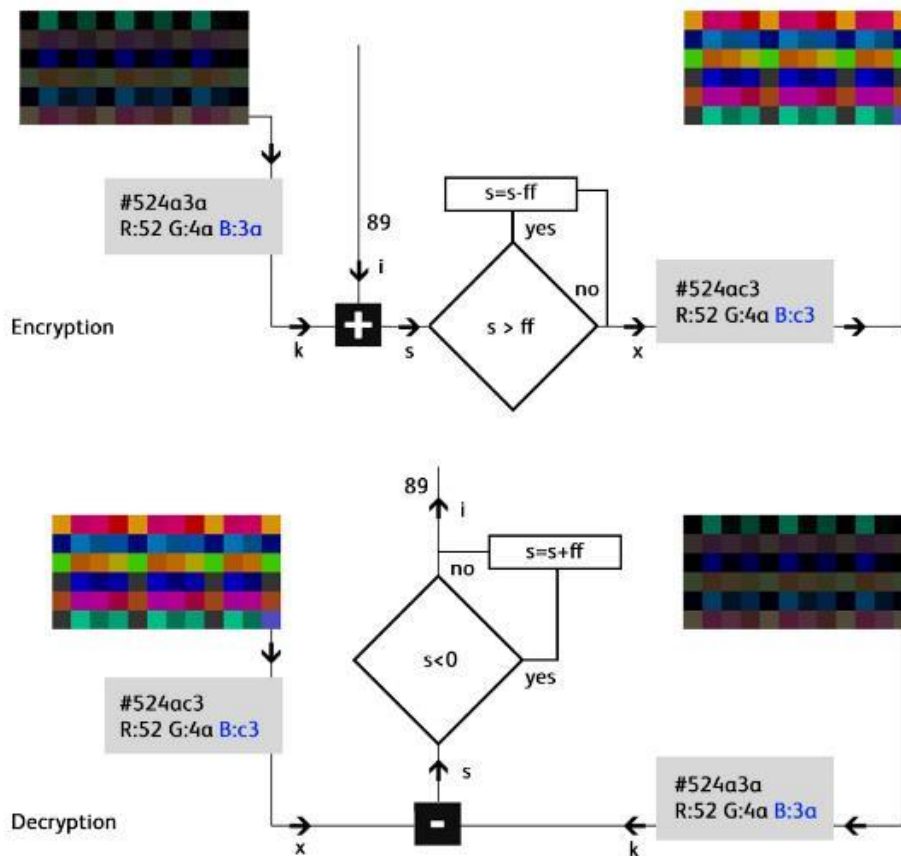


Figura 1 procesul de encriptare si decriptare

Dimensiunea imaginii poate fi definită în funcție de numărul valorilor ce urmează a fi arhivate și de tipul acestora utilizând formula:

$$p = FLOOR(i/3) + FLOOR(a/3) + FLOOR(b/3) + f*3 \quad (1)$$

$p$  este numărul total de pixeli ai imaginii generate

$i$  - numărul de valori întregi mai mici de 16777215,

$a$  - numărul de caractere alfanumerice,

$b$  - numărul de valori de tip Boolean,

$f$  - numărul de valori de tip float.

În cazul în care se dorește un aspect pătrat al imaginii generate, numărul de pixeli va fi egal pe  $x$  și  $y$  și poate fi calculat cu formula:

$$px = py = FLOOR(SQRT(p)) \quad (2)$$

Pentru criptarea datelor de orice tip, corespunzător variantelor de encodare prezentate anterior, se utilizează conform metodei prezentate o imagine de criptare (cheie simetrică), la valorile ce urmează a fi encodate adăugând sau scăzând valori corespunzătoare pixelilor din imaginea

cheie de criptare generată. Pot fi concepuți diverși algoritmi de criptare în funcție de numărul și tipul valorilor ce se encodează și de dimensiunea imaginii cheie de criptare (Figura 1).

Imaginea cheie de criptare poate fi generată unic, periodic sau în cazul valorilor de tip serii de date istorice, pot fi utilizate ca și imagini cheie de criptare imagini anterior generate la momente prestabilite.

Sistemul online de transmitere și stocare a informațiilor utilizând metodele dezvoltate și prezentate anterior, care oferă o securitate ridicată a datelor în momentul transmiterii și stocării și poate înlocui bazele de date clasice. Sistemul online este compus din următoarele module (figura 4.5) (Cotet C. E et al., 2020):

- (a) Modulul de citire a datelor care citește secvențial datele de encodat fie dintr-o bază de date locală temporară, fie direct prin intermediul unei interfețe OPC-UA ce asigură protocolul de comunicare directă cu senzorii și alte componente de proces;

- (b) Modulul de encodare și criptare a datelor care primește secvențial valorile returnate de modulul de citire a datelor și generează imaginile de arhivare. În funcție de numărul de valori distincte de arhivat și de tipul de date, acest modul calculează dimensiunea în pixeli pentru imaginile de arhivare. Spre exemplu, dacă un proces generează 10000 de valori distincte de tipul float cu o frecvență de 50 de înregistrări pe secundă, modulul va genera în fiecare secundă 50 de imagini cu dimensiunea de 300x100 pixeli.

Aceste imagini se salvează având în denumire un prefix de identificare a locației, urmat de o valoare numerică egală cu marca de timp din momentul generării (exemplu: BU-1488545592358). Marca de timp (Unix time, POSIX sau epoch) reprezintă numărul de milisecunde scurse începând cu data de 1 ianuarie 1970 ora 00:00:00 UT;

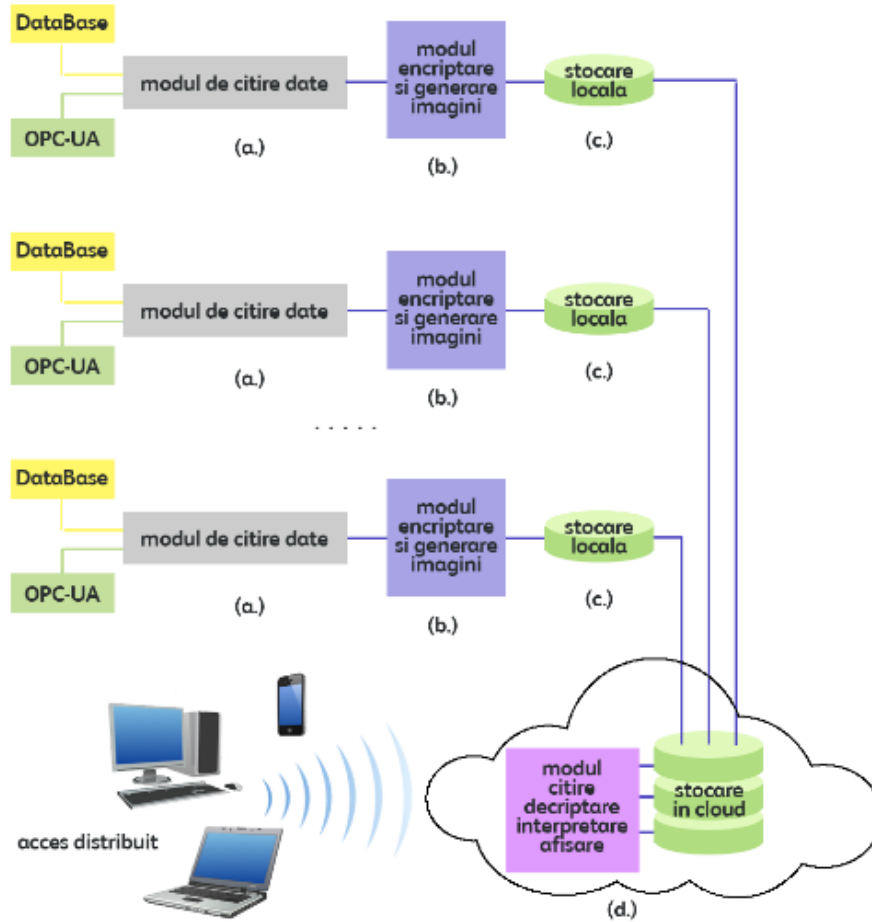


Figura 2. Schema bloc a sistemului online

- (c) Modulul de stocare locală și de replicare în Cloud, care stochează imaginile generate într-un buffer definit local pentru a se păstra chiar dacă există probleme de conectare în Cloud. Ulterior, la umplerea acestui buffer, noile valori se pot suprascrie peste cele anterioare. Imaginile generate sunt trimise automat și în Cloud pentru stocare.

Pe baza imaginilor generate pot fi encodeate fluxuri video cu o durată prestabilită, de exemplu 60 minute, care vor conține toate imaginile generate în acest interval. În exemplul nelimitativ din descriere, aceasta reprezintă  $50 \times 3600 = 180000$  frame-uri/oră la o rezoluție de  $300 \times 100$  pixeli.

Pentru fiecare senzor sau element de proces monitorizat se cunosc poziția coordonatelor pixelilor (în coordonate x, y) și detaliile despre elementul respectiv, aceste date fiind definite în momentul configurării sistemului.

- (d) Modulul de citire, decriptare și afișare a datelor, care cuprinde aplicații software ce rulează în Cloud. Acestea, pe baza unui protocol de interogare, pot accesa, decripta, decoda, afișa și transmite diverse rapoarte numerice sau grafice. Spre exemplu, interogarea "Selectează valorile senzorilor 2 și 4 începând cu 08.03.2017, ora 13:55:00 pe o perioadă de 10 minute" se traduce în selectarea pixelilor corespondenți coordonatelor x:4, 5, 6, respectiv x:10, 11, 12 și y:1 (deoarece fiind vorba despre valori float, encodarea valorilor se face utilizând 3 pixeli consecutivi) din seria de imagini începând cu BU-148898130000 până la BU-148898190000.

Se citesc secvențial valorile pixelilor, iar din aceste valori se scad valorile pixelilor corespondenți din imaginea cheie de criptare. După decodare se obțin valorile arhivate (conform metodei și a variantelor prezentate anterior).

Pentru o bună organizare a datelor se pot defini fișiere în mediul de stocare din Cloud, după modelul:

#### **locăție/an/lună/zi/oră/minut.**

Astfel, imaginile vor fi stocate în ultimele foldere corespunzătoare minutelor. Acest mod de arhivare oferă un acces ușor și rapid la date în vederea replicării lor și pe alte medii de stocare. Astfel, dacă se dorește prelucrarea locală a anumitor date, se descarcă din structura de fișiere doar perioada dorită.

Pe baza imaginilor stocate pe parcursul unei zile, prin rularea unor scripturi temporizate (cron) se vor genera o dată pe zi imagini distincte pentru fiecare proprietate (senzor), conținând toate valorile acelei proprietăți din ziua respectivă. Astfel, se face o reducere a numărului de imagini stocate, cu unele de dimensiuni mai mari, distincte pentru fiecare proprietate, care asigură o și mai bună compresie a datelor (aprox. x10) și o viteză sporită la interogarea valorilor. Acestea vor fi stocate în foldere, după modelul:

#### **locăție/an/lună/zi/proprietate/**

Totodată, utilizând aceleași scripturi temporizate, pot fi generate imagini conținând medii agregate pe oră sau pe întreaga zi pentru fiecare proprietate, ce pot fi ulterior utilizate pentru analize ale trendurilor pe perioade lungi de timp și pentru analize utilizând machine learning sau deep learning pentru mentenanță predictivă. Acestea vor putea fi stocate în foldere, după modelul:

#### **locăție/an/lună/zi/proprietate/medieorara**

#### **locăție/an/lună/zi/proprietate/mediezi**

În momentul generării acestora pot fi incluse module de optimizare a compresiei PNG, cum ar fi zopfli, care este o librărie software de encodare a imaginilor de tip PNG prin encodarea acestora în formate DEFLATE, gzip și zlib (dezvoltată și distribuită gratuit sub Apache Licence version 2 de către Google, în anul 2013).

Prin utilizarea acestor librării de optimizare, care deși sunt mai lente (80 până la 100 de ori) decât utilizarea formatului DEFLATE implicit al compresiei PNG, conferă o mult mai bună optimizare, prin identificarea pixelilor cu aceeași culoare, crearea unui index și înlocuirea valorilor cu indecșii corespunzători. Într-un exemplu implementat pentru valorile unui senzor (float) pentru 7 zile, cu o eșantionare de 2 date/secundă prin utilizarea zopfli s-a obținut o compresie a imaginii PNG de la 4.3 Mb la 2.1 Mb, iar ca timpi de compresie, DEFLATE implicit PNG 0.03 secunde, iar zopfli 2.8 secunde.

Sistemul permite și monitorizarea în timp real a valorilor care se arhivează, fie direct prin afișarea imaginii, fie sub o altă formă grafică. Dacă se dorește compararea în timp real a valorilor furnizate de senzori sau de alte instrumente de proces cu valorile de referință furnizate

de o aplicație a modelului virtual operațional (în engleză, twin) din Cloud, imaginile generate de fluxul tehnologic se combină substractiv cu imaginile generate pe baza valorilor de referință (etalon), rezultând imagini compuse, care în caz ideal sunt formate din pixeli de culoare neagră. În momentul în care apar abateri la anumite valori de proces, pixelii corespunzători din imaginile rezultante se colorează conform acestor abateri. Astfel, utilizând resurse de calcul și hardware extrem de reduse se asigură monitorizarea în timp real a unui volum foarte mare de date. Prin click cu mouse-ul sau touch pe ecran în zona pixelilor cu abateri din imagine se afișează detalii referitoare la senzori și valorile absolute sau ale abaterilor.

Prezenta metodă prezintă următoarele avantaje:

- permite criptarea și arhivarea datelor având ca mediu de stocare imaginile color;
- bazele de date de imagini pot fi ușor replicate printr-o simplă copiere;
- comprimare semnificativă a volumului de date stocat și transmis în Cloud datorita compresiei nedistructive de tip PNG;
- descentralizarea generării și stocării datelor istorice;
- acces în timp real la date, utilizând resurse hardware reduse;
- posibilitatea accesului la date pentru mai multe procese ce rulează independent și în același timp în Cloud;
- posibilitatea procesării datelor direct în mod grafic prin modificarea culorii pixelilor, fără a fi necesară decodarea, prelucrarea și re-encodarea acestora;
- forma grafică de arhivare permite vizualizarea compactă și în timp real a variației valorilor prin simpla afișare a imaginii;
- posibilitatea comparării în timp real a valorilor de proces cu cele etalon prin suprapunerea substractivă a celor două imagini generate pe baza acestora și afișarea imaginii rezultate.

Pe baza metodei propuse s-a implementat o platformă IIoT, realizată pe tehnologie web PHP HTML Java Script (figura 3 și 4). Platforma are două ecrane principale: ecranul de vizualizare a datelor istorice și ecranul de interogare a bazei de date de imagini.

Platforma de monitorizare a stării și performanței echipamentelor industriale (IIoT) este dezvoltată pe baza metodei de învățare automată aplicată la procesarea de date în timp real. Aceasta permite detectarea precoce a defecțiilor și optimizarea proceselor industriale, reducând astfel costurile de întreținere și creșterea eficienței.

Metoda de învățare automată aplicată la procesarea de date în timp real este dezvoltată pe baza metodei de învățare automată aplicată la procesarea de date în timp real.

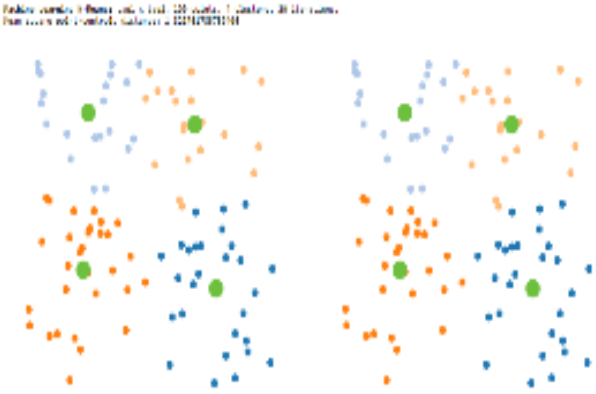
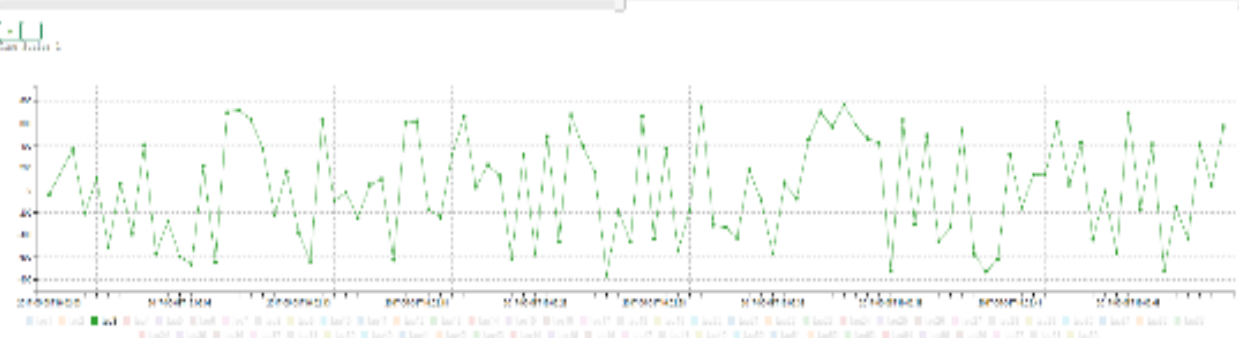
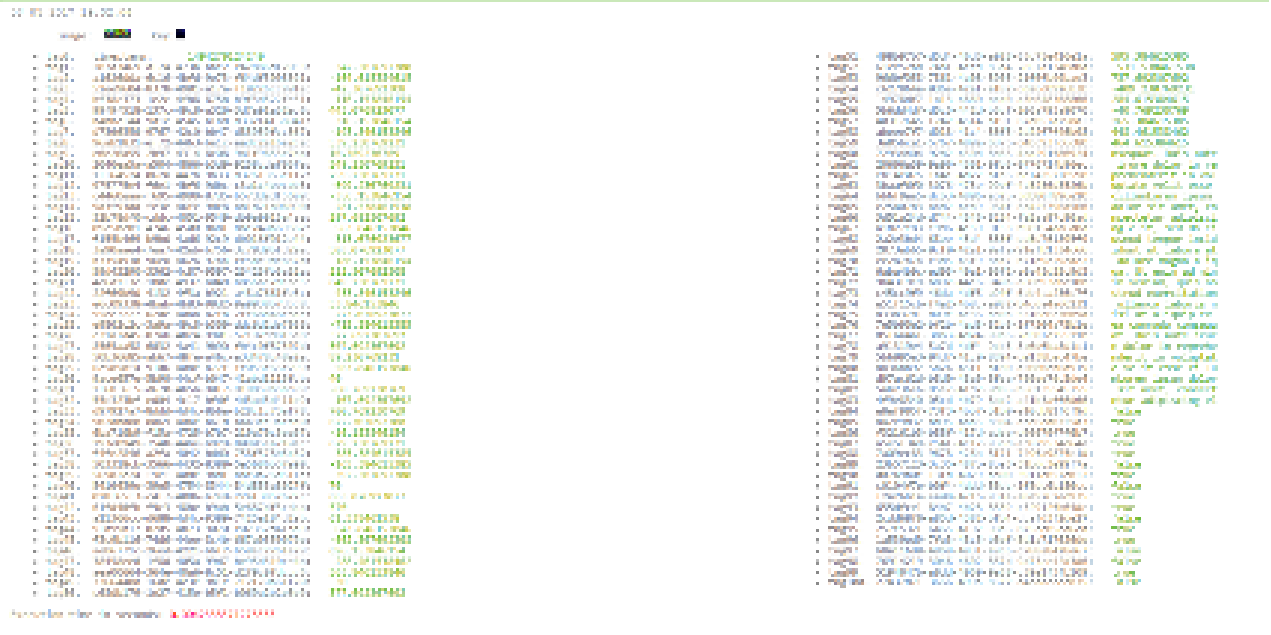


Figura 3. Platforma IIoT implementată pe baza metodei

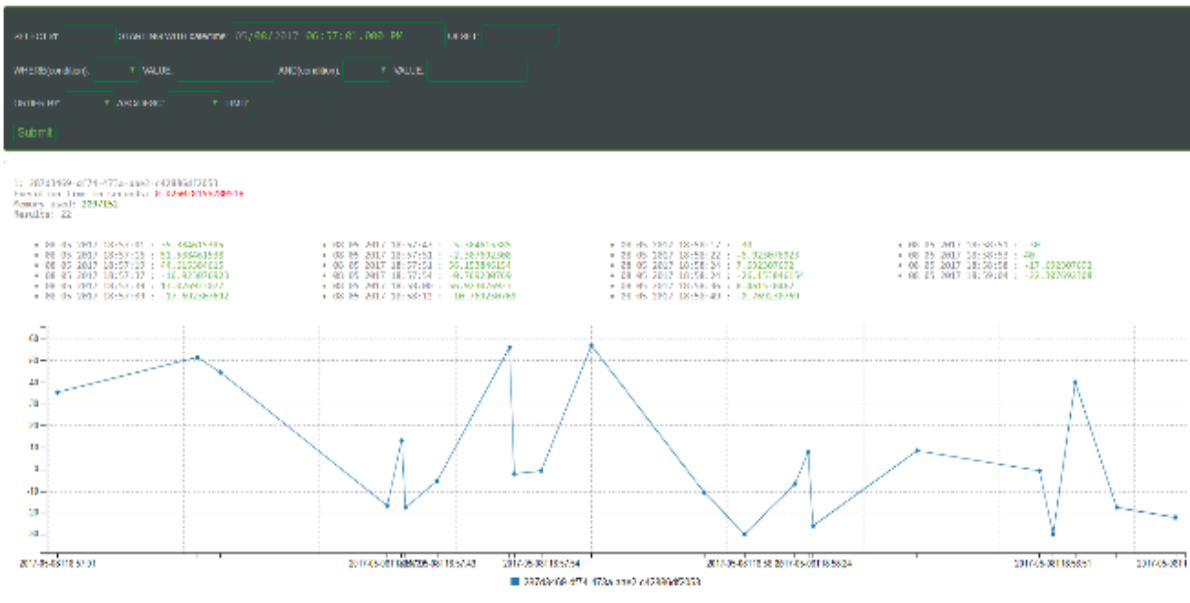


Figura 4 Platforma IIoT – API pseudo-SQL

Ecranul de vizualizare a datelor istorice conține un selector pentru dată, oră, minut secundă, în urma selecției unui moment istoric, valorile tuturor proprietăților din acel moment sunt afișate numeric și sub forma grafică pe un interval de  $\pm 50$  înregistrări pentru a se putea vizualiza variația istorică a acestor date. Graficul permite selectarea proprietăților dorit a fi afișate. De asemenea s-a implementat un slider ce permite selectarea valorilor consecutive pe axa timpului, având ca increment unitatea de timp de eșantionare (în acest caz, 0.5 secunde, deoarece frecvența de capturare a datelor telemetrice a fost stabilită la 2 înregistrări pe secundă).

În același ecran de vizualizare au fost incluse instrumente de machine learning: K-means și regresie liniară, ce asigură o bună vizualizare a variației pe intervale a datelor istorice.

Ecranul de interogare a bazei de date de imagini conține un formular de selecție a datelor ce simulează interogări de tip SQL. Platforma are integrat un-API de interogare de tip SQL (figura 4.7) ce poate fi accesat de aplicații externe, prin apelarea unei adrese de forma:

```
query.php?id=1&s=2017-05-08T18:57:01&o=2m10s&c=>&n=33&d=<&m=58
&r=ASC&k=t&l=100&key=0
```

unde:

id este id-ul proprietății,

s - momentul de start aaaa-mm-ddThh:mm:ss,

o - offset (perioada de căutare a datelor istorice) poate fi exprimat numeric (numărul de înregistrări) sau ca timp hh:mm:ss,

c - conditie mai mic mai mare, egal, diferit etc.,

n - valoarea de comparat prin condiție,

d - condiția a doua,

- m: valoarea de comparat a celei de a doua condiții,
- r - ordonarea datelor (ASC sau DESC),
- k - t, v principiul de ordonare (timp sau valoare a datelor),
- l - limita (numărul maxim de valori returnat),
- key - cheia de criptare (0, 1..., n) datele pot fi criptate cu chei diferite.

Pentru efectuarea testelor comparative ale metodei propuse cu sistemele de baze de date actuale am utilizat date istorice între 08 05 2017 18:57:01 și 14 05 2017 13:50:20 (1 milion de înregistrări a 100 proprietăți distincte (59 float, 24 text, 17 boolean) transmise cu o rată de eșantionare de 0,5 sec).

Datele brute: 1 milion de imagini PNG (fiecare PNG are 960 octeți 4,00 KB pe disc), total 562 dosare, dimensiune 954 MB, dimensiune pe disc 3,86 GB.

Date indexate: 86 de fișiere PNG (59 float, 24 text, 1 boolean), dimensiune 260 MB, dimensiune pe disc **260 MB**.

Baza de date Cassandra: **20 GB**. Baza de date PostgreSQL: **18 GB**.

### **Platforma de realitate virtuală colaborativă 8agora**

Cercetările realizate în cadrul tezei s-au materializat în concepția și dezvoltarea unei platforme VR colaborative ce integrează un prototip (twin) digital ce permite vizualizarea, simularea și optimizarea fluxurilor materiale și informaționale în arhitecturile de fabricație.

Prin dezvoltarea unor aplicații de tip middleware, platforma este capabilă să colecteze, să proceseze și să afișeze în timp real date de telemetrie, informații despre mentenanță, poate afișa biblioteci de documentații tehnice, poate sincroniza și vizualiza stocurile de materiale din depozite, poate sincroniza mașinile și liniile de fabricație virtuale cu cele reale și permite controlul la distanță al mașinilor și proceselor direct din mediul virtual.

Această aplicație a fost dezvoltată pe o arhitectură server – client și poate fi utilizată atât în mod VR imersiv, utilizând ochelari HMD și controlere, dar și în mod desktop, pe orice calculator sau dispozitiv mobil.

În cazul dispozitivelor mobile (tablete, telefoane), dar și în cazul utilizării unor calculatoare cu resurse hardware limitate, există posibilitatea rulării aplicației client în Cloud, pe un server GPU, utilizatorii accesând aplicația direct dintr-un browser web printr-o aplicație de control la distanță cu latență redusă și accelerare hardware (Deac G.C. et al., 2020).

8agora a fost dezvoltată pornind de la un proiect open-source: highfidelity.com cu o arhitectură constând în componente interconectate care comunică între ele (figura 4.8):

- Interfața client rulează pe computerul utilizatorului sau la distanță pe un server GPU în Cloud și permite conectarea și participarea la simulări live.
- Aplicația server este componenta principală care găzduiește conținutul, cum ar fi modele 3D, scripturi, fișiere, modulul de comunicație audio și gestionează setările pentru



atenuarea audio, spațializarea audio, codec-urile utilizate pentru comunicație, zonele, permisiunile utilizatorilor, numărul maxim de utilizatori concurenți și politicile de backup.

- Serviciile globale permit utilizatorilor să se conecteze și să navigheze în diferite locații de pe un domeniu, sau să se conecteze la alte domenii.

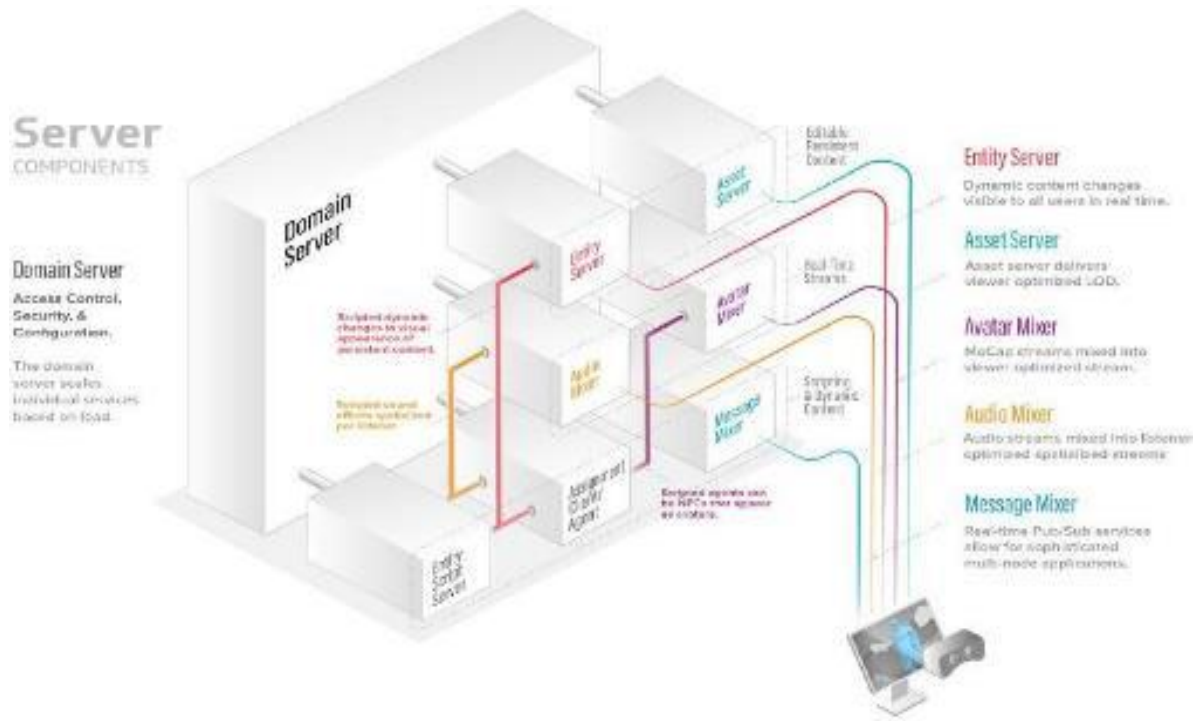


Figura 5. VR Componentele serverului de aplicații

În cadrul aplicației server, serverul de domeniu creează joburi pentru diferite servicii de tip client și comunică atât adresele IP, cât și porturile pentru fiecare serviciu client către aplicațiile utilizator conectate.

Serviciile client sunt responsabile pentru diferite funcționalități ale domeniului. Lucrează împreună și comunică în mod direct cu aplicațiile utilizator conectate.

### Aplicația middleware pentru IoT

Pentru integrarea modelului twin digital pe platforma 8agora a fost creată aplicația middleware care cuprinde următoarele module: achiziție și stocare de date, driver de animație, telecomandă și bibliotecă digitală (Deac G.C. et al., 2020).

#### a. Modulul de achiziție și stocare de date

Acest modul este compus din câteva aplicații client OPC UA care vor citi toate valorile de la senzori și de proces pe cicluri temporizate cu o frecvență predefinită (fiecare secundă de exemplu) și utilizează metoda de codificare și criptare a datelor utilizând imaginile PNG și stocarea acestora în Cloud (conform metodelor prezentate anterior).

#### b. Modulul de driver de animație (Deac G.C. et al., 2020).

Modulul de driver de animație a fost creat pentru a sincroniza mișcarea tuturor mașinilor, roboților, AGV-urilor (Automated Guided Vehicle – vehicule cu ghidare automată) AMR-

urilor (Autonomous Mobile Robot – roboți mobili autonomi), produselor și materialelor din liniile de producție (figura 4.13). Într-o fabrică există un număr foarte mare de date în timp real care trebuie capturate, transmise, analizate și procesate pentru a crea un twin digital.

De la fiecare mașină se pot colecta date de la senzori: presiune, temperatură, rotație, accelerații, vibrații, stare de funcționare, stări, alarme, erori, de la accelerometrele AMR, valorile de accelerație pe X, Y, Z, poziționarea GPS, nivelul bateriei, sarcina curentă, din liniile de producție automate, de asemenea trebuind a fi citite o multitudine de date. Această complexitate și volum mare de date conduce la imposibilitatea creării unor modele animate în timp real pentru fabrica virtuală doar bazându-ne pe valorile telemetrice, deoarece ar fi necesară realizarea unor algoritmi extrem de complecși și care ar necesita puteri mari de calcul, iar experiența utilizator nu ar fi mult îmbunătățită.



Figura 6. Exemplu de implementare pentru un twin digital utilizând platforma 8agora

Luând în considerare acest lucru, a fost dezvoltat un model simplificat bazat pe declanșatoare, iar datele de telemetrie au fost utilizate numai pentru vizualizarea în timp real a stării componente selectate. Pentru fiecare mașină a fost creat un model 3D precis cu animații diferite pentru fiecare proces de lucru. Viteza animațiilor poate fi ajustată pentru a fi sincronizată cu mișcarea reală a mașinii.

Pentru afișarea stocurilor de materiale în depozite a fost utilizată o conexiune la baza de date ERP astfel încât stocurile curente și poziția fiecărei componente, produs sau materie primă sunt citite în timp real. Folosind o bibliotecă extensibilă de modele 3D pentru componente și materiale și citind poziția fiecărei piese de inventar, pot fi populate rafturile din simularea 3D pentru a fi identice cu cele din fabrica reală.

Pentru sincronizarea produselor de pe liniile de fabricație pot fi utilizate cu ușurință cititoarele RFID, dar deoarece nu toate liniile actuale de fabricație au inclusă monitorizarea proceselor de fabricație bazată pe această tehnologie, s-a integrat o soluție de machine vision care clasifică

și numără obiectele în mișcare în timp real și care poate fi utilizată pentru orice implementare (Deac G.C. et al., 2017).

După analizarea soluțiilor tehnice existente pe piață în acest moment, a fost proiectat următorul sistem, a cărui diagramă este prezentată în figura 7.

Sistemul este compus din mai multe camere video plasate în diferite puncte ale liniei de producție. Semnalul video de la toate camerele este procesat de un multiplexor video, rezultând un singur flux video cu toate imaginile combinate.

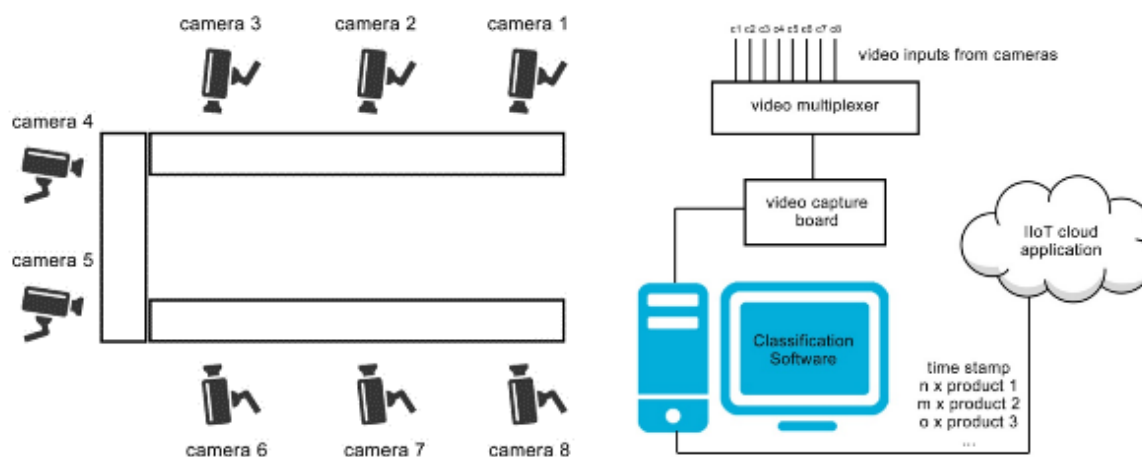


Figura 7. Schema sistemului de viziune

Acest flux video este capturat de o placă de captură video și procesat de aplicația de clasificare care rulează pe computerul de viziune (Deac G. C. et al., 2017).

Pentru a obține o clasificare în timp real, a fost utilizat YOLO9000 (Redmon, J. et al., 2016) compilat cu suport CUDA. Arhitectura paralelă CUDA oferă o putere suplimentară de procesare la un cost redus. Procesarea se face în timp real; folosind o placă video Nvidia GeForce RTX3090, putem analiza fluxul video la 60 de cadre pe secundă. În procesul de clasificare, imaginea combinată este mărită și urmărită.

**Modulul de control la distanță** a fost implementat pentru a facilita o vizualizare în timp real a mașinilor, accesul la panoul de control al mașinii pentru a regla parametrii și a declanșa comenzi.

Modulul de control la distanță conține aceste componente:

- Autentificare utilizator
- Conexiune desktop la distanță la panoul de comandă al mașinii
- Stream live cu latență redusă

Modulul de autentificare utilizator bazat pe nume de utilizator / parolă permite utilizatorului să treacă de la modul de vizualizare la modul de comandă de pe panoul de la distanță. Fiecare utilizator poate avea acces la comenzi la distanță numai pe anumite mașini sau procese.

Fluxul modulului de conexiune desktop la distanță transmite în direct ecranul panoului de control al mașinii și captează (după autentificare) acțiunile utilizatorului și execută aceste acțiuni pe panoul de control al mașinii.

Această componentă utilizează protocolul VNC și este dezvoltată în Node.js, utilizând socket-uri web și permite sesiuni desktop la distanță de la sistemele de operare Linux și Windows. Fereastra de control de la distanță este afișată într-o entitate de browser web din cadrul platformei VR.

Această abordare, folosind conexiunea Desktop la distanță, permite o implementare ușoară a sesiunilor la distanță pentru toate tipurile de mașini, având o latență scăzută (40-100 ms) (figura 4.19), mult mai bună decât utilizarea serviciilor web (800 ms) sau CyberOPC (400 ms) (Bechtold, J., et al., 2014).

Componenta de streaming live cu latență scăzută utilizează camere video și pe baza unei implementări WebRTC asigură o vizualizare la distanță a mașinii. Această vizualizare în timp real a mașinii este obligatorie pentru controlul de la distanță (figura 8). Demonstrativ, s-a realizat un stand cu două imprimante 3D Prusa MK3. Pentru imprimanta 3D din stânga s-a realizat un interpretor de gcode ce permite încărcarea și printarea, iar pentru cea din dreapta, o interfață de comandă ce permite sincronizarea cu o imprimantă reală.

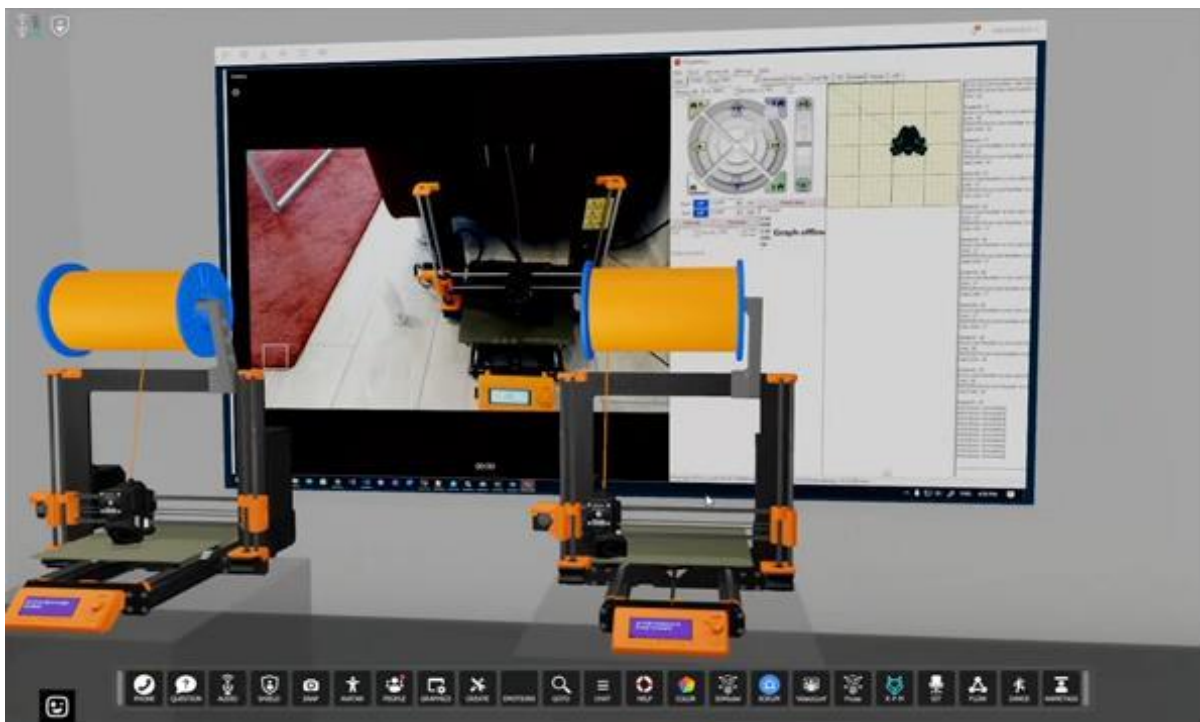


Figura 8 Ecrane de control și vizualizare live

Pe modelele 3D ale mașinilor au fost implementate câteva zone la nivelul componentelor mașinii iar atunci când un utilizator face clic cu controlerul său pe unul dintre aceste zone, poate afișa datele de telemetrie de la senzori, informații privind întreținerea (poate fi implementată și o aplicație Cloud pentru întreținere predictivă pentru a vedea orele de funcționare rămase pentru fiecare componentă) (figura 9) (Deac C.N. et al., 2019), (Deac C. N. et al., 2020), (Deac C. N. et al., 2021).



Figura 9. Linie de asamblare virtuală



Figura 10. Centru de prelucrare deservit de un robot industrial de tip braț articulat

De asemenea, a fost inclusă o bibliotecă tehnică și toți utilizatorii pot avea acces în timp real la informații tehnice privind mașinile și procesele făcând clic pe sigla mărcii mașinii (Deac C. N. et al., 2017).

### **Extinderea domeniului de aplicabilitate a platformei**

Cu toate că platforma 8agora a fost dezvoltată în scopul utilizării pentru implementări IIoT ca interfață de vizualizare colaborativă a twinului digital, datorită arhitecturii și funcționalităților acesteia, domeniile de utilizare pot fi multiple. Astfel pot fi cu ușurință extinse utilizările prin implementarea unor simulări dedicate pentru e-Learning, office virtual, conferințe, team building, expoziții și târguri expoziționale virtuale, entertainment (cluburi, cinematografe, expoziții de artă, teatre virtuale, mall-uri și magazine virtuale, studiouri de televiziune virtuale), singura limită fiind imaginația (<https://8agora.com>).

## Contribuții personale

Contribuțiile personale au fost structurate în conformitate cu obiectivele fixate în primul capitol al acestei lucrări. Astfel, principala contribuție a cercetărilor realizate în cadrul tezei constă în concepția și dezvoltarea unei platforme colaborative ce folosește realitatea virtuală pentru a permite vizualizarea, simularea și optimizarea fluxurilor materiale și informaționale în arhitecturile de fabricație. Platforma de coordonare a fluxurilor materiale și informaționale dezvoltată în cadrul tezei prezintă o serie de contribuții personale, care o diferențiază față de platformele existente pe piață, avantaje conferite de componentele proiectate și integrate atât ca produs integrat, cât și prin soluțiile originale pe care le înglobează. Astfel, principalele contribuții personale înglobate în realizarea platformei sunt următoarele.

1. Au fost realizate o serie de cercetări teoretice privind conceptul de Industrie 4.0. Finalitatea acestor cercetări a fost selectarea unor soluții pilon ale Industriei 4.0 pentru a fi înglobate în concepția platformei (capitolul 1).

2. Au fost realizate o serie de cercetări privind stadiul actual al platformelor Cloud industriale. Finalitatea acestor cercetări a fost identificarea limitărilor acestor platforme ceea ce a fundamentat necesitatea platformei propuse. Limitările existente au stat la baza unor soluții inovative înglobate în concepția platformei (capitolul 2), după cum urmează:

- dezvoltarea unei metode de transmitere și stocare a datelor de mari dimensiuni, utilizând ca mediu de stocare imaginile în format PNG;
- dezvoltarea unei aplicații middleware bazată pe mesaje pentru sincronizarea mașinilor virtuale;
- dezvoltarea unui sistem vision pentru monitorizarea liniilor de fabricație.

3. Au fost realizate o serie de cercetări teoretice privind realitatea virtuală și augmentată. Finalitatea acestor cercetări a fost selectarea unor soluții pentru a fi înglobate în concepția platformei (capitolul 3) rezolvând unele din limitările platformelor existente identificate în capitolul 2. Aceste soluții au stat la baza următoarelor contribuții personale:

- concepția și dezvoltarea unei platforme de realitate virtuală colaborativă, ca mediu de dezvoltare;
- proiectarea de aplicații integrate pentru această platformă;
- extinderea domeniului de aplicabilitate al platformei.

Dintre contribuțiile personale enumerate mai sus considerăm necesară detalierea concepției și dezvoltarea unei metode de transmitere și stocare a datelor de mari dimensiuni, utilizând ca mediu de stocare imaginile în format PNG datorită posibilităților de extindere a aplicabilității.

Astfel, metoda și sistemul online (protejate prin cerere de brevet) pentru criptare, transmitere, stocare și citire a volumelor de date de mari dimensiuni înglobează următoarele contribuții proprii:

- permite criptarea și arhivarea datelor având ca mediu de stocare imaginile color;
- asigură o bună securizare a datelor prin utilizarea unor metode de criptare utilizând o cheie simetrică de tip imagine;

- bazele de date de imagini pot fi ușor replicate printr-o simplă copiere;
- comprimă semnificativ volumul de date stocat și transmis în Cloud datorită compresiei nedistructive de tip PNG (spațiu de stocare de aproximativ 100 ori mai mic comparativ cu bazele de date actuale);
- descentralizează generarea și stocarea datelor istorice;
- permite acces în timp real la date, utilizând resurse hardware reduse;
- oferă posibilitatea accesului la date pentru mai multe procese ce rulează independent și în același timp în Cloud;
- oferă posibilitatea procesării datelor direct în mod grafic, prin modificarea culorii pixelilor, fără a fi necesară decodarea, prelucrarea și re-encodarea acestora;
- forma grafică de arhivare permite vizualizarea compactă și în timp real a variației valorilor prin simpla afișare a imaginii;
- oferă posibilitatea comparării în timp real a valorilor de proces cu cele etalon prin suprapunerea substractivă a celor două imagini generate pe baza acestora și afișarea imaginii rezultate.

În concluzie putem spune că obiectivul principal al tezei a fost îndeplinit prin integrarea soluțiilor ce au constituit obiective secundare. Astfel, prin integrarea metodei de codificare a datelor utilizând imaginile PNG și a modelului simplificat bazat pe declanșatoare în modulul de achiziție și stocare a datelor, prin dezvoltarea modulului de driver de animație și a modulului de comandă la distanță și prin utilizarea tehnologiilor pilon ale Industriei 4.0 s-a reușit sintetizarea conceptuală și dezvoltarea unei platforme de realitate virtuală (8agora) ce integrează funcția de coordonare a fluxurilor materiale și informaționale în arhitecturile de fabricație. Platforma permite o vizualizare naturală a twin-ului digital de către mai mulți utilizatori simultan, aceștia putând să comunice și să interacționeze între ei și să acceseze în timp real informații despre liniile de producție cum ar fi date telemetrice, date de proces, de mentenanță, biblioteci tehnice etc și să comande mașinile și procesele reale direct din mediul virtual.

Platforma 8agora, datorită arhitecturii, ușurinței de integrare și dezvoltare bazată pe importul de modele 3d în format FBX, OBJ și GLTF, a librăriei API expuse în java script și instrumentelor de comunicare și multimedia integrate reprezintă o interfață modernă, imersivă pentru vizualizarea datelor unui twin digital și constituie o platformă deschisă pentru dezvoltarea de aplicații colaborative complementare, cum ar fi: e-Learning, office virtual, conferințe, team building, expoziții și târguri expoziționale virtuale, entertainment (cluburi, cinematografe, expoziții de artă, teatre virtuale, mall-uri și magazine virtuale, studiouri de televiziune virtuale), etc. <https://8agora.com>

## Perspectivă de continuare a cercetărilor

În urma sintetizării concluziilor generale au reieșit o serie de perspective de continuare a cercetărilor, după cum urmează:

- implementări ale soluției prezentate pentru gestionarea fluxurilor materiale și informaționale ale fabricației prin utilizarea twin-ului digital în industrie;
- dezvoltarea și îmbunătățirea platformei 8agora cu noi aplicații;
- integrarea platformei IIoT VR cu simulatoare de flux (Witness, FlexSim, Simcad Pro etc.);
- proiectarea și realizarea unor echipamente hardware dedicate pentru rularea aplicației client;
- proiectarea și realizarea unor echipamente Cloud pentru aplicația client și streaming live către utilizatori;
- implementarea platformei 8agora ca support pentru învățare la distanță în Universitatea Politehnică din București;
- spin-off 8agora pentru servicii SAAS (software as a service) și customizate pentru aplicații VR colaborative <https://8agora.com> – pe baza planului de afaceri dezvoltat și premiat în cadrul programului doctoral “Be Antreprenor” (<https://8agora.com/8agora-business-plan.pdf>).

## Bibliografie

1. Amazon Web Services IoT - <https://aws.amazon.com/iot>, ultima accesare 23 iulie 2021
2. Arkian, H. R., Diyanat, A., Pourkhalili, A., 2017, MIST: Fog-based data analytics scheme with cost-efficient resource provisioning for IoT crowdsensing applications. J Netw Comput Appl 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.01.012>.
3. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., 2010, The internet of things: a survey. Comput Networks 2010,54:2787–805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
4. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., Nitti, M., 2012, The social internet of things (siot) when social networks meet the internet of things: Concept, architecture and network characterization. Computer Networks, Volume 56, Issue 16 (November 2012) 3594-3608
5. Autodesk Fusion Connect - <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/FUSIONCONNECT-Help/What-Is-Fusion-Connect.html.html>, ultima accesare 23 mai 2019
6. Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., Lee, J., 2015, Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment, IFAC Conference 38-3 (2015) 1622–1627.
7. Bauernhansl T., Hompel M., Vogel-Heuser B., 2014, Die vierte industrielle revolution – der weg in ein wertschaffendes produktionsparadigma BT - industrie 4.0 in produktion, automatisierung und logistik: anwendung · technologien · migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. p. 5–35. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8_1).
8. Bechtold, J., Lauenstein, C., Kern, A., Bernhofer, L., 2014, Industry 4.0 - The Capgemini consulting view. Sharpening the picture beyond the hype, 2014.
9. Benitez G. B., Ayala N. F., Frank A. G., 2020, Industry 4.0 innovation ecosystems: an evolutionary perspective on value cocreation. Int J Prod Econ 2020,228:107735. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107735>.



10. Bergmann, N.W., Robinson, P., 2012, Server-based internet of things architecture. The 9th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (2012)
11. Bortolini M., Botti L., Galizia F. G., Mora C., In: Benyoucef L, 2020, Safety, ergonomics and human factors in reconfigurable manufacturing systems BT - reconfigurable manufacturing systems: from design to implementation. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 123–38. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5_6).
12. BRIDGE: Building radio frequency identification solutions for the global environment. (2009) <http://www.bridge-project.eu>, ultima accesare 23 iulie 2021
13. Buckholtz B., Ragai I., Wang L., 2015, Cloud manufacturing: current trends and future implementations. *J Manuf Sci Eng Trans ASME* 2015. <https://doi.org/10.1115/1.4030009>.
14. Burdea G., Coiffet Ph., 1995, *La réalité Virtuelle*, Ed. Hermes, Paris, 1995
15. CASAGRAS: Casagras project. 2009, <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4461/2>, ultima accesare 23 mai 2019
16. Cerasis Publications, 2016, *The Future Of Supply Chain, Logistics & Manufacturing: How Technology Is Transforming Industries*
17. Chen J., Cao X., Cheng P., Xiao Y., Sun Y., 2010, Distributed collaborative control for industrial automation with wireless sensor and actuator networks. *IEEE Trans Ind Electron* 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2043038>.
18. Cisco: Jasper IoT - <https://www.jasper.com/>, ultima accesare 23 mai 2019
19. Cotet, C. E., Popescu, D., Popa, C .L., *Managementul fluxurilor materiale în ingineria industrială*, Editura POLITEHNICA PRESS, COD CNCSIS 19, ISBN 978-606-515-581-7, 2014.
20. Cotet, C. E., G. C. Deac, C. N. Deac, C. L. Popa, 2020, An Innovative Industry 4.0 Cloud Data Transfer Method for an Automated Waste Collection System, *Sustainability* 2020, 12(5), 1839, <https://doi.org/10.3390/su12051839>
21. Cruz Salazar L. A., Ryashentseva D., Lüder A., Vogel-Heuser B., 2019, Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent’s design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *Int J Adv Manuf Technol* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03800-4>.
22. Da Xu EL, Xu EL, Li L., 2018, Industry 4.0: state of the art and future trends. *Int J Prod Res* 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.
23. Dashchenko A. I., 2006, Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories. 2006. <https://doi.org/10.1007/3-540-29397-3>.
24. Dassault Systèmes Netvibes - <https://www.3ds.com/products-services/netvibes/>, ultima accesare 23 iulie 2021
25. Deac, C. N., Deac, G. C., Chiscop, F. and Popa, C. L., 2019, Methods to identify time series abnormalities and predicting issues caused by component failures, 9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution” 21 August 2019
26. Deac C. N., Deac G. C., Popa C. L., Coteț C. E., 2020, Computerized Maintenance Management System (CMMS) Iotia – Maintenance Platform Implementation for Industry 4.0 *Proceedings in Manufacturing Systems*, Bucharest Vol. 15, Iss. 3, (2020): 103-111.
27. Deac C. N., Deac G. C., Popa C. L., Ghinea M., Cotet C. E., 2017, Using Augmented

- Reality In Smart Manufacturing, 28th Daaam International Symposium On Intelligent Manufacturing And Automation, DOI: 10.2507/28th.Daaam.Proceedings.102
28. Deac C. N., Deac G. C., Chiscop F., Popa C. L., Cotet C. E., 2019, Video Working Instruction System, Proceedings in Manufacturing Systems, Volume 14, Issue 2, 2019, 67-72 ISSN 2067-9238
  29. Deac, C. N., Deac G. C., Parpală R. C., Popa C. L., and Cotet C. E., 2021, Vibration Anomaly Detection using Deep Neural Network and Convolutional Neural Network, International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 11, No. 1, February 2021
  30. Deac, C. N., Deac G. C., Cotet C. E., Ghinea M., 2018, Virtual Reality Broadcasting Studio, 29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DOI: 10.2507/ 29th.daaam. proceedings.
  31. Deac, C. N., Deac G. C., Cotet C. E., Ghinea M., 2017, Self-Learning Improvement by Means of Cloud Computing, ICESBA, Procedia of Economics and Business Administration, ISSN: 2392-8174, ISSN-L:2392-8166, <https://doi.org/10.26458/v4.i1.11>
  32. Deac, C. N., Deac, G. C., Parpala, R. C., Popa C. L., Popescu, C. A., 2021. Vibration Anomaly detection using multivariate time series, International Conferences on 4th Space Launching and 16th Artificial Intelligence applied in the fields of Aerospace, Robotics, Manufacturing Systems, Mechanical, Engineering, Technology of Materials, Power Energy and Neurohabilitation
  33. Deac G. C., Deac C. N., Cotet C. E., Ghinea M., 2015, TIMV-PLUS, A New Approach of The Immersive E-Learning Platforms, ICESBA, Procedia of Economics and Business Administration, ISSN: 2392-8174, ISSN-L:2392-8166, <https://doi.org/10.26458/v4.i1.12>
  34. Deac, G. C., Deac C. N., Cotet C. E., Mihalache G., 2019, Social Virtual Reality Collaborative Platform, RST Journal Supplement 1/2019 ISSN-E 2344-007 / ISSN-L 2344-0007
  35. Deac, G. C., Deac C. N., Popa C. L., Ghinea M., Cotet C. E., 2017, Machine Vision in Manufacturing Processes and The Digital Twin of Manufacturing Architectures, 28th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing And Automation DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.103
  36. Deac, G. C., Georgescu C. N., Popa C. L., Ghinea M., Cotet C. E. (2018). Virtual Reality Exhibition Platform, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, pp.0232-0236, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-20-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.033
  37. Deac, G. C., Georgescu C. N., Popa C. L., Cotet C.E., Chiscop F., 2019, New Method for Sending Data to the Cloud from an OPC-UA Client Application, ISSN 2343-7472, <http://icmas.eu>, Vol.14, Issue 1, 2019
  38. Deac, G. C., Georgescu C. N., Popa C. L., Cotet C. E., 2020, Implementation of a virtual reality collaborative platform for industry 4.0 offices, Proceedings in Manufacturing Systems, Bucharest Vol. 15, Iss. 3, (2020): 95-102.
  39. Deac, G. C., Popa C. L., Ghinea M., Cotet C. E., Carutasu N., 2017, Development and Implementation of Software Solutions for Weee Identification, Weighing and Sorting, MIT Sinaia Conference, Research and Science Today Supplement No.2/2017
  40. Deac, G. C., Deac C. N., Cicerone L. P., Cotet C. E., 2020, Virtual Reality Digital Twin

for a Smart Factory, *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 10, No. 6, December 2020

41. Deac, G. C., Deac, C. N., Nita, F.A., 2021, Virtual Reality Laboratory for distance learning, *International Conferences on 4th Space Launching and 16th Artificial Intelligence applied in the fields of Aerospace, Robotics, Manufacturing Systems, Mechanical, Engineering, Technology of Materials, Power Energy and Neurorehabilitation*
42. Derler P., Lee E.A., Vincentelli A.S., 2011, Modeling cyber–physical systems. *Proc IEEE* 2012,100:13–28. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2160929>.
43. Dunkels, A., Vasseur, J., Internet protocol for smart objects. IPSO Alliance, White Paper 1 (september 2008) <http://www.ipso-alliance.org>., ultima accesare 23 mai 2019
44. Dutra D. S., Silva J. R., 2015, Product-Service Architecture (PSA): toward a Service Engineering perspective in Industry 4.0, *IFAC Conference* 39- 31 (2016) 91–96.
45. E-ISSN: 2415-1521, Volume 5, 2017 "
46. El Zaatari S., Marei M., Li W., Usman Z., 2019, Cobot programming for collaborative industrial tasks: an overview. *Rob Auton Syst* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>.
47. El-Sayed H., Sankar S., Prasad M., Puthal D., Gupta A., Mohanty M., et al., 2019, Edge of things: the big picture on the integration of edge, IoT and the cloud in a distributed computing environment. *IEEE Access* 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780087>.
48. Erol S., Jäger A., Hold P., Ott K., Sihn W., 2016, Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production, 6th CLF - 6th CIRP Conference on Learning Factories, *Procedia CIRP* 54 (2016) 13 – 18.
49. Frei R., McWilliam R., Derrick B., Purvis A., Tiwari A., Di Marzo Serugendo G., 2013, Self- healing and self-repairing technologies. *Int J Adv Manuf Technol* 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5070-2>.
50. Gerrikagoitia J.K., Unamuno G., Urkia E., Serna A., 2019, Digital manufacturing platforms in the industry 4.0 from private and public perspectives. *Appl Sci* 2019. <https://doi.org/10.3390/app9142934>.
51. Ghinea M., Deac G. C., Deac C. N., 2015, Theory and concept of e-learning platforms, ISBN 978-606-610-162-2, Publisher BREN, Bucharest, 2015
52. Ghinea M., Deac G. C., Deac C. N., 2016, Developing e-learning platforms through integration of 3D virtual immersion into user's world - a new concept, *Proceedings of the International Conference on Augmented Reality for Technical Entrepreneurs, ARTE 2016*, pg. 73, ISBN 978-606-23-0563-5, Bucharest 2016
53. Ghinea M., Deac G. C., Deac C. N., 2015, Developing e-learning platforms, ISBN 978-606-610-163-9, Publisher BREN, Bucharest, 2015
54. Ghinea M., Deac G. C., Deac C. N., 2017, Training Application for Industries by Means of Virtual Reality Technology, *WSEAS TRANSACTIONS ON COMPUTER RESEARCH*, Print ISSN: 1991-8755
55. Ghinea M., Deac G. C., Deac C. N., Nita F. A., 2021, The Importance of Virtual Immersion in the Rapid Prototyping of Industrial Products, published under licence by IOP Publishing Ltd *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1935, 5th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions InnoVeTAS 2021 13 May

2021, Eger, Hungary

56. Grangel-Gonzalez I., Baptista P., Halilaj L., Lohmann S., Vidal M.E., Mader C., et al., 2017, The industry 4.0 standards landscape from a semantic integration perspective. IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA 2017. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247584>.
57. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M., 2013, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, Future Generation Computer Systems, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, 2013.
58. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M., 2007, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, Volume 29, Issue 7 (2007) 24
59. Hadim, S. and Mohamed, 2006, Middleware: Middleware challenges and approaches for wireless sensor networks, IEEE distributed systems online, no. 3, p. 1, 2006.
60. Hao Y., Helo P., 2017, The role of wearable devices in meeting the needs of cloud manufacturing: a case study. Robot Comput Integr Manuf 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.10.001>.
61. Hofmann E., Rüsç M., 2017, Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. Comput Ind 2017,89:23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>.
62. <https://8agora.com/8agora-business-plan.pdf>
63. <http://cerasis.com/2015/09/30/industry-4-0-and-manufacturing/>
64. <https://blogs.microsoft.com/blog/2014/12/17/microsoft-business-predictions-2015-iot-matures-cybersecurity-bulks-machine-learning-gives-businesses-big-advantage/>
65. [https://cefima.org/wiki/History\\_of\\_Virtual\\_Reality](https://cefima.org/wiki/History_of_Virtual_Reality)
66. [https://en.wikipedia.org/wiki/Double-precision\\_floating-point\\_format](https://en.wikipedia.org/wiki/Double-precision_floating-point_format)
67. <https://gartner.com/en/newsroom>
68. ISO/ASTM 52921:2013 - Standard terminology for additive manufacturing - Coordinate systems and test methodologies
69. Ivanov D., Sokolov B., Ivanova M., 2016, Schedule Coordination in Cyber-Physical Supply Networks Industry 4.0, IFAC conference 39-12 (2016) 836–839.
70. Jazdi, N., 2014, "Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0, 2014, 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, pp. --, 2014.
71. Kamath V., Morgan J., Ali M.I., 2020, Industrial IoT and digital twins for a smart factory: an open source toolkit for application design and benchmarking. 2020 glob. Internet things summit. 2020. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/GIOTS49054.2020.9119497>.
72. Koren Y., Fotsch C., Najid N. M., Martin P., Wang G., Bortolini M., et al., 2020, Reconfigurable manufacturing systems: from design to implementation. Springer Nature Switzerland AG 2020.
73. Kreutz D., Ramos F. M. V., Verissimo P. E., Rothenberg C. E., Azodolmolky S., Uhlig S., 2015, Software-defined networking: a comprehensive survey. Proc IEEE 2015. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999>.
74. Lasi H., Fettke P., Kemper H. G., Feld T., Hoffmann M., 2014, Industry 4.0. Bus Inf Syst Eng 2014,6:239–42. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.

75. Lee E., 2008, Cyber physical systems: design challenges. *Electr Eng Comput Sci* 2008: 363–9. <https://doi.org/10.1109/ISORC.2008.25>.
76. Lee J., Kao H. A., Yang S., 2014, Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment, *Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, Procedia CIRP* 16 (2014) 3 – 8.
77. Leng J., Liu Q., Ye S., Jing J., Wang Y., Zhang C., et al., 2020, Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model. *Robot Comput Integr Manuf* 2020,63:101895. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101895>.
78. Leu J., Chen C., Hsu K., 2014, Improving heterogeneous SOA-Based IoT message stability by shortest processing time scheduling. *IEEE Trans Serv Comput* 2014,7:575–85. <https://doi.org/10.1109/TSC.2013.30>.
79. Liu Q., Zhang H., Leng J., Chen X., 2019, Digital twin-driven rapid individualized designing of automated flow-shop manufacturing system. *Int J Prod Res* 2019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471243>.
80. Liu Y., Xu X., 2017, Industry 4.0 and cloud manufacturing: a comparative analysis. *J Manuf Sci Eng Trans ASME* 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4034667>.
81. Longo F., Nicoletti L., 2017, Padovano A. Smart operators in industry 4.0: a human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. *Comput Ind Eng* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.016>.
82. Lopez F., Shao Y., Mao Z. M., Moyne J., Barton K., Tilbury D., 2018, A software-defined framework for the integrated management of smart manufacturing systems. *Manuf Lett* 2018,15:18–21. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.12.015>.
83. Lu Y., Xu X., 2019, Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services. *Robot Comput Integr Manuf* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.006>.
84. Microsoft Azure IoT Platform - <https://azure.microsoft.com/en-us/suites/iot-suite/>, ultima accesare 23 iulie 2021
85. Milgram, P., Kishino, F., 1994 A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, Vol. E77-D, No. 12, pp 1321–1329
86. Miorandi, D., Sicari, S., Pellegrini, F. D., Chlamtac, I., 2012, Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*
87. Morgan J., O'Donnell G. E., 2015, The cyber physical implementation of cloud manufacturing monitoring systems. *Procedia CIRP* 2015,33. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.007>.
88. Morgan J., O'Donnell G. E., 2017, Enabling a ubiquitous and cloud manufacturing foundation with field-level service-oriented architecture. *Int J Comput Integr Manuf* 2017:30. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1032355>.
89. Mourtzis D., Vlachou A., Zogopoulos V., 2017, Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: a product-service system approach. *J Manuf Sci Eng Trans ASME* 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4035721>.
90. O'Donovan P., Gallagher C., Leahy K., O'Sullivan D. T. J., 2019, A comparison of fog and cloud computing cyber-physical interfaces for Industry 4.0 real-time embedded

- machine learning engineering applications. *Comput Ind* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.016>.
91. Panicucci S., Nikolakis N., Cerquitelli T., Ventura F., Proto S., Macii E., et al., 2020, A cloud- to-edge approach to support predictive analytics in robotics industry. *Electron* 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9030492>.
  92. Park K. T., Lee J., Kim H. J., Do Noh S., 2020, Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production. *Int J Adv Manuf Technol* 2020,106:1–24. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04653-7>.
  93. Plaza I., Medrano C., Blesa A., 2006, Analysis and implementation of the IEC 61131-3 software model under POSIX Real-Time operating systems. *Microprocess Microsyst* 2006. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2006.06.001>.
  94. Popescu D., Marinescu R., Laptioiu D., Deac G. C., Cotet C.E., 2021, DICOM 3D viewers, virtual reality or 3D printing – a pilot usability study for assessing the preference of orthopedic surgeons, June 2021, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine DOI: 10.1177/09544119211020148
  95. Porambage P., Okwuibe J., Liyanage M., Ylianttila M., Taleb T., 2018, Survey on multi-access edge computing for internet of things realization. *IEEE Commun Surv Tutor* 2018. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2849509>.
  96. PTC Thingworx - <https://www.ptc.com/en/products/thingworx>, ultima accesare 23 iulie 2021
  97. Ray P. P., 2016, A survey of IoT cloud platforms. *Futur Comput Informatics J* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2017.02.001>.
  98. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., 2016. You only look once: Unified, real-time object detection, pp. 779-788, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, ISBN 978-1-4673-8851-1
  99. Redmon, J., Farhadi, A., 2016, YOLO9000: Better, Faster, Stronger, Available from: <https://arxiv.org/abs/1612.08242>, Accessed: 2017-08-09.
  100. Ren L., Zhang L., Tao F., Zhao C., Chai X., Zhao X., 2015, Cloud manufacturing: from concept to practice. *Enterp Inf Syst* 2015. <https://doi.org/10.1080/17517575.2013.839055>.
  101. Rüßmann M., Lorenz M., Gerbert P., Waldner M., 2015, Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, (April09, 2015) 1-14.
  102. Satyanarayanan M., Simoens P., Xiao Y., Pillai P., Chen Z., Ha K., et al. 2015, Edge analytics in the internet of things. *IEEE Pervasive Comput* 2015. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2015.32>.
  103. Scholz S., Mueller T., Plasch M., Limbeck H., Adamietz R., Iseringhausen T., et al. 2016, A modular flexible scalable and reconfigurable system for manufacturing of Microsystems based on additive manufacturing and e-printing. *Robot Comput Integr Manuf* 2016,40:14–23. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2015.12.006>.
  104. Schuh G., Potente T., Wesch-Potente C., Weber A.R., 2014, Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0, Robust Manufacturing Conference (RoMaC 2014), *Procedia CIRP* 19 (2014) 51 – 56.
  105. Schumacher A., Erol S., Sihna W., 2016, A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises, Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production, *Procedia CIRP* 52 (2016) 161 – 166.

106. Shafique M., Theocharides T., Bouganis C. S., Hanif M. A., Khalid F., Hafiz R., et al., 2018, An overview of next-generation architectures for machine learning: roadmap, opportunities and challenges in the IoT era. Proc. 2018 Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib. DATE 2018 2018. <https://doi.org/10.23919/DATE.2018.8342120>.
107. Sicari S., Rizzardi A., Coen-Porisini A., 2020, 5G in the internet of things era: an overview on security and privacy challenges. Comput Networks 2020,179:107345. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107345>.
108. Simons S., Abé P., Naser S., 2017, Learning in the AutFab – the fully automated Industrie 4.0 learning factory of the University of Applied Sciences Darmstadt, 7th Conference on Learning Factories, CLF 2017, Procedia Manufacturing 9 (2017) 81 – 88.
109. Ștefănescu, B., Blumenfeld D., Bucătaru N., Ciutac M., 2000, Tehnici moderne de generare a mediilor virtuale prin sinteză grafică asistată de calculator", Editura ICI, București, 2000.
110. Stock T., Seliger G., 2016, Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing -Decoupling Growth from Resource Use, Procedia CIRP 40 (2016) 536 – 541.
111. Teerapittayanon S., McDanel B., Kung H. T., 2017, Distributed deep neural networks over the cloud, the edge and end devices. Proc - Int Conf Distrib Comput Syst 2017. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2017.226>.
112. Thames L., Schaefer D., 2016, Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. Procedia CIRP 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>. J. Morgan et al.
113. TheThings.iO - <https://thethings.io/>, ultima accesare 23 iulie 2021
114. Vyatkin V., 2011, IEC 61499 as enabler of distributed and intelligent automation: state-of-the-art review. IEEE Trans Ind Informatics 2011. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2166785>.
115. Wang L., Gao R., Vancza J., Krüger J., Wang X. V., Makris S., et al., 2019, Symbiotic human-robot collaborative assembly. CIRP Ann 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>.
116. Wang X. V., Wang L., Mohammed A., Givehchi M., 2017, Ubiquitous manufacturing system based on Cloud: a robotics application. Robot Comput Integr Manuf 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.01.007>.
117. Wang Y., Zhang G., Han L., 2019, A methodology of setting module groups for the design of reconfigurable machine tools. Int J Adv Manuf Technol 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03337-6>.
118. Zheng C., Qin X., Eynard B., Bai J., Li J., Zhang Y., 2019, SME-oriented flexible design approach for robotic manufacturing systems. J Manuf Syst 2019,53:62–74. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2019.09.010>.
119. Zhou J., Zhou Y., Wang B., Zang J., 2019, Human–Cyber–Physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. Engineering 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.015>.