

# Mogućnosti primjene koncepta Industrije 4.0 u području studija rada i vremena

---

Prtenjak, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:664177>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Lovro Prtenjak**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Mogućnosti primjene koncepta Industrije 4.0 u području studija rada i vremena**

Mentor:

Doc. dr. sc. Tihomir Opetuk, mag. ing. mech

Student:

Lovro Prtenjak

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Tihomiru Opetuku na izdvojenom vremenu te pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom dosadašnjeg studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1        |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -           |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovro Prtenjak**

JMBAG: **0035216972**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnosti primjene koncepta Industrije 4.0 u području studija rada i vremena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Possibilities of application of the Industry 4.0 concept in the field of work and time study**

Opis zadatka:

Područje studija rada i vremena dio je projektiranja tehnoloških procesa koji određuje redoslijed tehnoloških operacija za izradu proizvoda. Pomoću njega određuju se normativi, odnosno komadno vrijeme izrade proizvoda. Ukupno vrijeme izrade proizvoda sastoji se od pripremno-završnog vremena, pomoćnog vremena i tehnološkog vremena. Pravilno definirani normativi omogućuju adekvatno planiranje proizvodnje, a isto tako omogućavaju i praćenje efikasnosti radnika i mogućnosti njihovog nagrađivanja. Razvojem računala, senzora, vizijskih sustava, odnosno primjenom koncepta Industrije 4.0 dolazi do razvoja područja studija rada i vremena.

U radu je potrebno:

- dati pregled područja studija rada i vremena (norma, proizvodnost, proizvodni ciklus, struktura vremena izrade),
- opisati i definirati koncept Industrije 4.0,
- prikazati programska rješenja za područje studija rada i vremena,
- napraviti i prikazati mogućnosti primjene koncepta Industrije 4.0 na područje studija rada i vremena.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao: *Opetuk*

Doc. dr. sc. Tihomir Opetuk

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

*Branko Bauer*  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2. STUDIJ RADA .....  | 2  |
| 2.1. Organizacijski položaj studija rada.....                                 | 3  |
| 2.2. Studij rada - dio organizacije rada .....                                | 3  |
| 2.3. Studij i analiza vremena .....   | 5  |
| 2.3.1. Pripremno- završno vrijeme.....  | 6  |
| 2.3.2. Tehnološko vrijeme .....   | 6  |
| 2.3.3. Pomoćno vrijeme .....  | 7  |
| 2.3.4. Dodatno vrijeme.....   | 7  |
| 2.4. Načini određivanja vremena izrade .....                                  | 8  |
| 2.4.1. Određivanje vremena izrade snimanjem.....                              | 8  |
| 2.4.2. Određivanje vremena izrade formulama za strojni rad [1] .....          | 9  |
| 2.4.3. Određivanje vremena izrade sistemima unaprijed određenih vremena ..... | 10 |
| 3. INDUSTRIJA 4.0.....  | 11 |
| 3.1. Povijest i razvoj Industrije 4.0 [2] .....                               | 11 |
| 3.2. Ključni pojmovi u Industriji 4.0 .....                                   | 13 |
| 3.2.1. Internet stvari (Internet of things – IoT) .....                       | 13 |
| 3.2.2. Kibernetičko-fizički sustav (CPS) .....                                | 14 |
| 3.2.3. Računalni oblak (eng. cloud) [6] .....                                 | 15 |
| 3.2.4. Big Data i analiza podataka .....                                      | 16 |
| 3.3. Ostale značajke Industrije 4.0.....                                      | 17 |
| 3.3.1. Autonomni roboti.....  | 17 |
| 3.3.2. Horizontalna i vertikalna integracija.....                             | 17 |
| 3.3.3. Aditivna proizvodnja .....   | 18 |
| 3.3.4. Proširena stvarnost (AR).....  | 18 |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.3.5. Cyber sigurnost .....  | 18 |
| 4. SOFTVERI U PODRUČJU STUDIJA RADA I ANALIZI VREMENA .....                                   | 19 |
| 4.1. SimData [8].....   | 19 |
| 4.2. OTRS10 [9] .....   | 21 |
| 4.3. UmtPlus [10].....  | 22 |
| 5. DIGITALIZACIJA PODRUČJA STUDIJA RADA I ANALIZE VREMENA .....                               | 25 |
| 5.1. ToF tehnologija.....   | 25 |
| 5.2. ToF kamera.....  | 26 |
| 5.3. LIDAR .....  | 27 |
| 5.4. Beacon [20].....   | 29 |
| 5.5. Senzor vibracija .....   | 32 |
| 5.6. Senzor svjetlosti [25].....  | 33 |
| 6. PRIMJENA TEHNOLOGIJA ZA POTREBE STUDIJA RADA I ANALIZE VREMENA... 35                       |    |
| 6.1. ToF.....   | 35 |
| 6.2. Senzor vibracija .....   | 35 |
| 6.3. Beacon .....   | 36 |
| 6.4. Senzor svjetlosti.....   | 37 |
| 6.5. LIDAR .....  | 39 |
| 6.6. Sustav snimanja pokreta za studij repetitivnih ljudskih pokreta u proizvodnji [31] ..... | 40 |
| 6.6.1. Eksperiment izvođenja gibanja na traci .....   | 42 |
| 6.6.2. Eksperiment segmentacije pokreta .....   | 43 |
| 6.6.3. Eksperiment dizanja tereta .....   | 43 |
| 6.7. Primjena neuronske mreže [35].....   | 45 |
| 7. ZAKLJUČAK .....  | 50 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Prikaz povezanosti pomoću IoT [4] .....  | 14 |
| Slika 2. Korištenje SimData softvera na računalima i pametnim uređajima [8] .....                         | 20 |
| Slika 3. Sučelje SimData softvera [8] .....   | 21 |
| Slika 4. Uravnoteženje proizvodnih linija uz pomoć OTRS softvera [9].....                                 | 22 |
| Slika 5. Prikaz tri moguća modula rada UmtPlus softvera [10] .....  | 23 |
| Slika 6. Princip rada ToF tehnologije [13] .....  | 26 |
| Slika 7. ToF kamera [15].....   | 27 |
| Slika 8. Primjer korištenja Lidar sustava u automobilske industriji [17].....                             | 28 |
| Slika 9. Primjer senzora LIDAR [19].....  | 29 |
| Slika 10. Mogućnost povezivanja beaкона pomoću Bluetooth tehnologije [20] .....                           | 30 |
| Slika 11. Beacon [21] .....   | 32 |
| Slika 12. Senzor vibracija [24] .....   | 33 |
| Slika 13. Senzor svjetlosti [26].....   | 34 |
| Slika 14. Primjer upotrebe senzora vibracija [27] .....   | 36 |
| Slika 15. Primjer upotrebe beaкона uređaja za unutarnju navigaciju [28].....                              | 37 |
| Slika 16. Primjer regala i kolica za odlaganje alata u kojima je moguće koristiti senzor svjetlosti ..... | 38 |
| Slika 17. Upotreba LIDAR sustava za detekciju ljudi [30].....   | 39 |
| Slika 18. Sustav za praćenje pokreta [32] .....   | 40 |
| Slika 19. Qualisys oqus infracrvena kamera [33].....  | 41 |
| Slika 20. Hexoskin prsluk za praćenje fizioloških podataka [34] .....                                     | 42 |
| Slika 21. Odnos Borgovog broja sa otkucajima srca [31] .....  | 44 |
| Slika 22. Redoslijed provođenja istraživanja .....  | 47 |



## POPIS KRATICA

AI – eng. artificial intelligence (umjetna inteligencija)

ANN – eng. artificial neural network ( umjetna neuronska mreža)

AR – eng. augmented reality (proširena stvarnost)

BLE – eng. Bluetooth low energy (Bluetooth niska energija)

CNN- eng. convolutional neural network (konvolucijska neuronska mreža)

CPS – eng. cyber - physical system (kibernetско-fizički sustav)

DTW – eng. dynamic time warping (dinamičko ispravljanje vremena)

IaaS – eng. Infrastructure as a service (infrastruktura kao usluga)

IMU – eng. inertial measurement unit ( inercijalna mjerna jedinica )

IoT – eng. Internet of things (internet stvari)

IR – eng. infrared (infracrveno)

ITU – eng. International telecommunication unit (Međunarodna telekomunikacijska unija)

LDR – eng. light dependent resistor (fotootpornik)

LIDAR – eng. light detection and ranging (svjetlosni detektor i detektor raspona)

MoCap - eng. motion capture (snimanje pokreta)

PaaS – eng. platform as a service (platforma kao usluga)

RTLS – eng. real time location system (sustav praćenja lokacije u realnom vremenu)

SaaS – eng. softwer as a service (softver kao usluga)

SPC – eng. statistical process control (statistička kontrola procesa)

ToF – eng. time of flight (vrijeme letenja)

## **SAŽETAK**

Tema ovog rada su moguća unapređenja u području studija rada i analize vremena koja su omogućena pojavom Industrije 4.0. U prvom dijelu rada opisan je studij rada i analiza vremena te je dan pregled softvera koji se koriste u tom području. Uz to, pojašnjen je koncept Industrije 4.0 te su opisani njeni najbitniji čimbenici. U zadnjem dijelu rada opisana su rješenja koja predstavljaju implementaciju Industrije 4.0 u području studija rada i analize vremena. Time je obrađen pregled senzora koji mogu pomoći u modernizaciji proizvodnje i organizaciji rada te su priložena dva istraživačka rada na temelju kojih se mogu uvidjeti mogućnosti napretka u praćenju ljudskog rada prilikom korištenja neuronske mreže i moderne tehnologije praćenja pokreta.

Ključne riječi: studij rada i analiza vremena, Industrija 4.0, senzori

## **SUMMARY**

Topic of this thesis are possible improvements in the field of work study and time analysis which were possible by the emergence of Industry 4.0. Work study and time analysis are described in first part of thesis and is given an overview of the software used in that area. In addition, the concept of Industry 4.0 is clarified and its most important factors are described. In the last part of the thesis are described solutions that indicate the implementation of Industry 4.0 in the field of work study and time analysis. In this way, an overview of sensors that can help in the modernization of production and organization of work is processed, also two research papers are attached, on the basis of which one can see the possibilities of progress in monitoring human work when using neural networks and modern motion tracking technology.

Key words: work study and time analysis, Industry 4.0, sensors

## 1. UVOD

Studij rada i analiza vremena znanstvena je disciplina koja se u svijetu pojavila prije stotinjak godina, dok se u Hrvatskoj počela razvijati tek u šezdesetim godinama prošlog stoljeća. Studij rada i analiza vremena u svom fokusu ima čovjekov rad. Izračunavanje potrebnog vremena za proizvodnju i određeno normiranje čovjekova rada, uz obraćanje pažnje na povećanje produktivnosti i osiguranje kvalitetnih uvjeta rada glavni su zadaci studija rada i analize vremena. U posljednje vrijeme značajnim povećanjem automatizacije proizvodnih sustava dolazi do složenijeg odnosa u radu pri kojem čovjek značajnije surađuje sa strojevima i robotima. Industrija 4.0 pojavila se kao koncept u Njemačkoj kojim Europa ponovno želi zauzeti značajniju ulogu na svjetskoj karti proizvodnih sila. Europa malo kaska za nekim drugim svjetskim područjima te se na ovaj način to želi promijeniti. Industrija 4.0 podrazumijeva značajniju modernizaciju proizvodnih pogona sa velikim ulaganjima na području automatizacije i digitalne povezanosti svih čimbenika u proizvodnom lancu. Ulaganjem u automatizaciju određenih procesa, nabavku novih autonomnih robota i interakciju u radu između čovjeka i robota želi se povećati produktivnost i smanjiti nepotreban i zamoran čovjekov rad. Budući da Industrija 4.0 znači modernizaciju cijele proizvodnje jasno je da postoje i određena poboljšanja koja se mogu uvesti u područje studija rada i analize vremena. Novi načini praćenja ljudskog rada te lakše i preciznije analize vremena glavni su benefiti koje Industrija 4.0 može ponuditi. U ovom radu dat će se pregled glavnih zadataka, ciljeva i mogućnosti studija rada i analize vremena. Također, dat će se pregled koncepta Industrije 4.0 te će se ponuditi određena rješenja i metode koje Industrija 4.0 nudi, a mogu biti korisna u području studija rada i analize vremena.

## 2. STUDIJ RADA

Studij rada u području organizacije proizvodnje je disciplina čiji je zadatak da se znanstvenim metodama, logičkim, cjelovitim i sustavnim analizama nekog rada dođe do:

1. Optimalno oblikovanog načina rada, prilagođavanjem radnog mjesta, metoda i uvjeta tada čovjeku
2. Realno potrebnog vremena izradbe te ispravno izračunate norme.

Da bi se ostvarili zadaci, cilj i svrha studija rada moraju se obuhvatiti studij i analiza vremena te pojednostavljenje rada. Zadaci studija i analize vremena su utvrđivanje vremena izrade, analiziranje vremena izrade i gubitaka u radu, izračunavanje potrebnog vremena izrade i norme te izrada podataka potrebnih za normiranje. Sve se to provodi kako bi se proizišlo sa realnim potrebnim vremenom koje će moći poslužiti kao organizacijsko mjerilo u radu.

Pojednostavljenje rada koje se često naziva i racionalizacija, ima za cilj da se nakon analize odvijanja rada, radno mjesto i uvjeti rada prilagode čovjeku te se postigne optimalno oblikovan način rada. Glavni zadaci koji se pritom moraju izvršiti su: analiza rada na radnom mjestu, analiza tehnološkog i proizvodnog procesa, pronalaženje i utvrđivanje boljeg i lakšeg načina rada te provođenje poboljšanog načina rada.

Oba navedena procesa studija rada provode se u svrhu smanjenja zamora radnika i povećanja njihove sigurnosti te smanjenja troškova i povećanja proizvodnosti. Jasno je da su oba dijela studija rada podjednako važna i da se moraju promatrati u međuzavisnosti. Za potpuni uspjeh metoda studija rada prilično je važno da svi sudionici uključeni u taj proces budu anažirani i voljni sudjelovati, ponajprije je ovdje riječ o radnicima koji su često skeptični prema ovim metodama budući da se promatra njihov rad i mjeri vrijeme izrade, a oni sami nisu dovoljno upoznati sa svrhom tog procesa. Jedino na način postizanja suradnje sa radnicima može se očekivati potpuni uspjeh metoda studija rada. Brzim napretkom tehnologije te porastom automatizacije odnosi u proizvodnji između čovjeka, radnog mjesta i okoline postali su vrlo složeni. Budući da je potrebno pronaći optimalno rješenje, a sustav je kompleksan, primijenjivat će se i postavke matematičke statistike i teorije vjerojatnosti, ali i saznanja iz drugih područja koje promatraju čovjeka u radu, poput medicine rada i psihofiziologije. [1]

## 2.1. Organizacijski položaj studija rada

Prilikom određivanja položaja studija rada valja uzeti u obzir postoji li već takav odjel, služba ili ljudi koji se time bave u određenom poduzeću te kakva je organizacijska struktura poduzeća. Metode studija rada mogu pomoći pri strukturiranju svih odjela poduzeća te se zbog toga kao najbolje rješenje nameće da studij rada bude odvojena služba poduzeća koja će biti u mogućnosti usko surađivati sa svim ostalim odjelima. Ukoliko nije moguće osnivanje samostalnog odjela, najlogičnije je sa metodama studija rada krenuti u odjelu pripreme proizvodnje gdje se već susreću sa dodjeljivanjem vremena pojedinim operacijama te često i sa pojednostavljenjem rada. Prilikom uvođenja studija rada bitno je izjednačiti važnost analitičara vremena sa tehnologom budući da će njihovi zadaci biti direktno povezani te se ne mogu promatrati odvojeno. Podrška upravljačke strukture poduzeća stručnjacima studija rada te osiguranje dovoljno vremena vrlo je bitno kako bi se rješenja do kojih se došlo stigla isprovести i dokazati u praksi. Metode studija rada u interesu su svih povezanih sa poduzećem budući da osiguravaju bolje uvjete rada te smanjuju troškove i povećavaju proizvodnost. [1]

## 2.2. Studij rada - dio organizacije rada

Govoreći o studiju rada kao dijelu organizacije rada, odnosno dijelu organizacije proizvodnje, prvo treba rastumačiti pojmove organizacije te organizacije rada. Organizacija podrazumijeva smišljeno, cjelovito i sustavno usklađivanje neke djelatnosti, kao i rješavanje svih problema koji kod toga nastaju, a uvijek sa ciljem postizanja uspješnosti. Organizacija rada je znanstveno područje u kojem se prilikom racionalnog ograničavanja rada uporedno rješava tehničke, gospodarske, psiho-sociološke i informatičke probleme, primjenjujući kod toga sve teorije i metode koje omogućuju optimalno rješenje. [1]

Iz povijesnog razvitka studija rada uočava se mnogo primjera još iz antičkog doba prilikom radova u kojima je sudjelovalo više ljudi, potreba organizacije kako bi se rad što kvalitetnije izveo i kako bi se održali zadani rokovi. Organizirani rad postaje temelj svake uspješne proizvodnje. Frederick Winslow Taylor može se slobodno proglasiti osnivačem područja organizacije rada. Prvi je, na samom početku 20. stoljeća shvatio važnost sustavne organizacije rada te da nije riječ samo o usputnoj službi, već da je ispravna organiziranost rada preduvjet za postizanje uspješnosti u radu. Od Taylorovih početnih načela s vremenom su se razvijala i postavljala određena načela i od ostalih stručnjaka. Analizirajući ih dolazi se do nekoliko ključnih: [1]

- čovjek je najvažniji dio u organiziranju rada
- pravo odlučivanja i odgovornost za donesene odluke su nerazdvojni
- jasna i nedvosmislena odluka je neophodna
- informacija mora biti točna, potpuna, pravovremena i jasna
- vrijeme je osnovno organizacijsko mjerilo.

Organizacija proizvodnje počela se razvijati nastavno na Taylorove i Gilbrethove radove i usmjerena je na rješavanje tehničkih problema prvenstveno u proizvodnji. Može se stručno definirati kao znanstveno područje u oblasti tehničkih znanosti koje se bavi istraživanjem, projektiranjem i usavršavanjem proizvodnog sustava te istraživanjem, projektiranjem i usavršavanjem kao i pripremanjem, koordiniranjem i praćenjem odvijanja tehnološkog i proizvodnog procesa. Svrha mu je da se proizvod dobije u utvrđenom roku, u traženoj količini i kvaliteti uz optimalne troškove. Da bi se proizvodnja mogla normalno odvijati organizacija proizvodnje obuhvaća sljedeće znanstvene discipline:

1. Projektiranje proizvodnih sustava
2. Projektiranje tehnološkog i proizvodnog procesa
3. Studij rada
4. Planiranje i praćenje proizvodnje
5. Kontrola kvalitete
6. Rukovanje materijalom
7. Održavanje

Činjenica jest da je upravo studij rada bio početak u povijesnom razvoju organizacije rada, a posve sigurno i danas je temelj prilikom svakog organiziranja rada. Znanstvena disciplina studij rada će biti i u novim proizvodno-tehnološkim uvjetima važan čimbenik koji će svojim djelovanjem uvelike utjecati na cijenu proizvoda i rok isporuke. Njegovo djelovanje će se zbog toga usmjeriti na racionalizaciju i humanizaciju rada uz primjenu ergonomskih načela, podučavanje ljudi i njihovo uvježbavanje u radu, određivanje realnog vremena potrebnog za izvođenje rada te stvaranje vremenskih standarda i uvođenje novih fleksibilnih oblika radnog vremena. [1]

### 2.3. Studij i analiza vremena

U organiziranju proizvodnje najvažniji je segment utvrđivanje vremena potrebnog za izradu pojedinog proizvoda, utvrđivanje gubitaka vremena te izračunavanje opravdanih gubitaka i norme. Izračunavanje norme je bitno kako bi se mogle donositi optimalne odluke te odrediti potrebne kalkulacije u poslovanju poduzeća. Pravilno izračunata norma ključan je podatak u smanjivanju troškova i povećanju proizvodnje. Norma mora služiti kao orijentacija za sve ono što se može i mora postići, a ne za ono što već postoji ili je postignuto. [1] Izvršavanje normi realno je jedino ukoliko su ispunjena tri uvjeta: realna količina, optimalna kvaliteta i poštivanje metoda rada.

U pojedinim poduzećima postoji problem stavljanja norme u kontekst plaćanja radnika. Radnik koji premaši normu bude nagrađen i dodatno plaćen, međutim problem je u tome što ako je norma optimalno izračunata, a radnik poštuje sva tri uvjeta pravilno izračunate norme, norma ne može biti mnogo premašena. Trebalo bi težiti tome da svi uspiju postignuti normu uz realna odstupanja. Ako se na normu gleda kao organizacijsko mjerilo humano oblikovanog rada, a ne kao sredstvo plaćanja, ona će omogućiti da se točno znaju mogućnosti u proizvodnji što će olakšati poslovnu i prodajnu politiku poduzeća.

Definicija norme koja mora biti izražena jedino u vremenu jest da je norma vrijeme koje je potrebno prosječno uvježbanom i određeno kvalificiranom radniku da pod normalnim pogonskim okolnostima s propisanim sredstvima, na točno određeni način, uz normalno zalaganje i zamor, obavi točno definirani posao. [1]

Filozofija proizvodnje u kojoj je vrijeme glavni čimbenik započela je u Japanu 1980. godine na postavkama S.Shinga. Postavljeno je načelo JIT (eng. Just in time) što označava da sve mora biti točno na vrijeme, odnosno gotovo se izbacuje skladištenje. U tom je pristupu misao vodilja da je dobit rezultat odbitka troškova od prodajne cijene. Budući da tržište diktira prodajnu cijenu jedini način za povećati dobit je smanjenje troškova, a vrijeme u tom proizvodnom procesu ima veliku ulogu.

Ukupno vrijeme rada koje je potrebno da se izvede neki posao zadan radnim nalogom sastoji se od slijedećih elemenata: [1]

- pripremno- završno vrijeme ( $t_{pz}$ ),
- tehnološko vrijeme ( $t_t$ ),
- pomoćno vrijeme ( $t_p$ ),
- dodatno vrijeme ( $t_d$ ).



### 2.3.1. Pripremno- završno vrijeme

Vrijeme potrebno za pripremanje radnog mjesta za neki posao te uređenje tog mjesta nakon rada. Kako bi se rad mogao ispravno obavljati potrebno je vrijeme za pripremu, vrijeme pripreme ( $t_p$ ). Nakon završetka posla i obavljanja svih operacija potrebno je radno mjesto vratiti u prvobitno stanje, a vrijeme potrebno za obavljanje tih radnji naziva se završno vrijeme ( $t_z$ ). Oba vremena skupa se nazivaju pripremno - završno vrijeme ( $t_{pz}$ ) te se rad predviđen za to vrijeme obavlja jednom u jednoj seriji. Iz tog razloga se njegov udio u ukupnom vremenu za jedan proizvodni komad smanjuje porastom broja komada u seriji. Utjecaj ovog vremena na normu, a neposredno i na troškove proizvodnje, naročito je osjetan pri dugotrajnim podešavanjima i malom broju proizvoda u jednoj seriji. [1] Uvijek se teži tome da najveći dio u ukupnom vremenu otpada na vrijeme izrade, a pripremno – završno vrijeme potrebno je što je moguće više skratiti te na taj način postignuti veću ekonomičnost podjele vremena.

Pripremni radovi su:

- upoznavanje s dokumentacijom, radom i uputstvima,
- dobivanje na radno mjesto materijala pripremljenog za obradu, alata i pribora,
- pripremanje radnog mjesta (namještanje, provjera, učvršćenje i skidanje pribora i alata),
- izvršavanje postupka u vezi s pokusnom obradom. [1]

Završni radovi su:

- predaja gotovog izratka, materijala i dijelova,
- pospremanje radnog mjesta i dovođenje u početno stanje,
- vraćanje alata, naprava i pribora u skladište. [1]

### 2.3.2. Tehnološko vrijeme

Tehnološko vrijeme je onaj dio vremena izradbe koji je potreban da se obavi posao direktno povezan s promjenom oblika, položaja, izgleda ili osobina materijala ili predmeta obrade u smislu tehnološkog procesa, bez obzira da li se to obavlja ručno ili strojem. Tehnološko vrijeme je jedino u normi direktno korisno pa zato treba nastojati da njegov udio bude najveći. [1]

Na tehnološko vrijeme može se utjecati parametrima obrade kao što su brzina rezanja, posmak, dubina rezanja. Tehnološko vrijeme može biti:

- strojno vrijeme,
- strojno- ručno vrijeme,
- ručno vrijeme.

Strojno vrijeme, budući da nema nikakvog ručnog rada određuje se iz formula, tablica i dijagrama ako su poznati režimi rada. Strojno-ručno i ručno vrijeme određuju se snimanjem ili pak sustavom unaprijed određenih vremena. [1]

### **2.3.3. Pomoćno vrijeme**

Pomoćno vrijeme je vrijeme potrebno za obavljanje pomoćnih poslova koji omogućuju izvođenje tehnoloških aktivnosti. Pomoćna vremena mogu biti ručna, strojna, dakle automatizirana, a mogu biti i strojno – ručna. Neki od pomoćnih radova su:

- namještanje, premještanje i skidanje predmeta obrade,
- razna mjerenja i kontrole unutar rada,
- puštanje stroja u rad i zaustavljanje prekidačem,
- uključivanje ili isključivanje vretena,
- promjena režima rada u toku rada,
- promjena alata, naprava na stroju u toku rada,
- pomak ili posmak materijala, prazan hod alata i stroja.

Pomoćna vremena treba svesti na minimum kako bi sa što manjim udjelom sudjelovala u normi, budući da direktno ne pridonose promjeni proizvoda u procesu rada. [1]

### **2.3.4. Dodatno vrijeme**

Ako bi se normu određivalo na način da se uzima samo vrijeme izrade, nastali bi gubici i radnik nebi mogao ostvariti normu uz normalno zalaganje. Gubitci koji bi nastali bili bi opravdani, budući da radnik iz opravdanih razloga ne može raditi u apsolutnom vremenu koje provede na poslu. Za nadomještanje tih opravdanih gubitaka upravo se uvodi dodatno vrijeme. Dodatno vrijeme daje se u postocima vremena izradbe, a izražava ga se pomoću tri koeficijenta dodatnog vremena: [1]

Koeficijent zamora  $K_n$ :

- zamor zbog savladavanja tereta,

- zamor zbog položaja tijela pri radu,
- zamor zbog monotonije u radu.

Koeficijent djelovanja okoline  $K_a$ :

- utjecaj temperature zraka,
- utjecaj relativne vlažnosti zraka,
- utjecaj brzine strujanja zraka,
- utjecaj zagađenosti zraka.

Dopunski koeficijent  $K_d$ :

- dodatak za propisani odmor,
- dodatak za fiziološke potrebe,
- dodatak za organizacijske gubitke.

## **2.4. Načini određivanja vremena izrade**

Postoji više načina određivanja vremena izrade, od kojih svaki ima svoje prednosti i mane. U načelu se svaki od tih načina može primijeniti u svim uvjetima proizvodnje, ali obično neće biti ekonomično upotrebljavati neki drugi osim upravo onoga koji najbolje odgovara tim prilikama.

Tri načina određivanja vremena izrade koje su najrašireniji u industriji su:

- snimanje,
- formule za strojni rad,
- sistemi unaprijed određenih vremena. [1]

Osim navedenih načina određivanja vremena izrade treba spomenuti i još jedan način koji se sve više gubi iz industrije, jer se ne može održati zbog netočnosti podataka koji se njime dobivaju. To je određivanje vremena izrade u cjelosti procjenom. Tim načinom određuje se norma za neki posao koji treba obaviti po načelu sjećanja na neke slične već obavljene poslove. Taj je način subjektivan i ovisi o iskustvu i procjeni pojedinca, što može rezultirati velikim greškama. [1]

### **2.4.1. Određivanje vremena izrade snimanjem**

Najstarija, najraširenija i najpoznatija metoda određivanja vremena izradbe po sastavnim elementima je snimanje vremena kronometrom (štopericom). Iako jedna od najstarijih metoda, još

je uvijek najviše primjenjivana, a u novije vrijeme i znanstveno razrađena te poboljšana, temeljena na matematičkoj statistici i teoriji vjerojatnosti. Uzima li se snimanje samo kao metoda kojom se mora odrediti vrijeme izradbe za neki posao koji je u tijeku, naići će se na određene nedostatke, budući da radnik normu dobiva prekasno, a često se moraju vršiti i dugotrajna snimanja kako bi se postigla dovoljna točnost rezultata. Metodu snimanja kronometrom treba koristiti za prikupljanje osnovnih podataka za tipične vrste poslova. Promotri li se bilo koji rad, dolazi se do zaključka kako se on uvijek sastoji od istih grupa operacija, zahvata ili pokreta te iako se izrađuju različiti dijelovi, uvijek se prilikom izrade služi istim ili sličnim grupama operacija. Prema tome može se grupirati pojedine grupe srodnih operacija, zahvata ili pokreta te samo njih snimati kako bi se ustanovilo njihova vremena izrade te ih se kasnije svrstalo u tablice i dijagrame zbog normiranja. Snimajući metodom trenutnih zapažanja pripremno- završna, tehnološka i pomoćna vremena prikupit će se mnogo podataka o istovrsnim operacijama, zahvatima i pokretima, a pridodajući tome još i podatke o dodatnom vremenu za razna radna mjesta, stvorit će se kompletna dokumentacija o potrebnom vremenu izrade za razne vrste radova. [1]

#### 2.4.2. Određivanje vremena izrade formulama za strojni rad [1]

Iako se za određivanje vremena strojnih radova može primijeniti i metoda snimanja vremena kronometrom, ipak se za strojna vremena moraju određivati pomoću već poznatih formula. Pri tome se mora dobro poznavati tehnološki proces i režime rada. Osnovna jednadžba za određivanje vremena strojnih radova dana je izrazom:

$$t_a = \frac{L}{n \cdot s} \quad (\text{min}) . \quad (1)$$

Ako postoji više prijelaza pri konstantnom odvijanju rada vrijeme će biti:

$$t_a = \frac{L \cdot i}{n \cdot s} = \frac{L \cdot Z}{n \cdot s \cdot a} \quad (\text{min}) \quad (2)$$

gdje su:

$t_a$  - strojno vrijeme (vrijeme automatike stroja),

$L$  - put alata po duljini (mm),

$n$  - broj okretaja ili dvostrukih hodova na min,

$s$  - posmak (mm/okretaju),

i - broj prijelaza,

a - dubina rezanja (mm),

Z - dodatak za obradu (mm).

### **2.4.3. Određivanje vremena izrade sistemima unaprijed određenih vremena**

Promatrajući rad, dolazi se do zaključka da ljudi za izvođenje radova upotrebljavaju uvijek nekoliko istih jednostavnih pokreta. Kombiniranjem tih osnovnih pokreta čovjek može obavljati vrlo različite poslove. Iz tog razloga došlo se na ideju da bi se moglo određivati i vrijeme izrade na temelju tih osnovnih pokreta, odnosno na temelju vremena koja su potrebna za obavljanje pojedinih osnovnih pokreta. Da bi se moglo određivati vrijeme izrade prema osnovnim pokretima, trebalo je odrediti koliko dugo traje izvršenje svakog od njih. Budući da je riječ o vrlo kratkim vremenima, nemoguće je pratiti ih okom i snimati kronometrom, znajući da čak i najbolji snimači mogu snimati tek zahvate koji nisu kraći od 2 do 3 sekunde. Zato se za snimanje osnovnih pokreta koristi kamera, jer se na projekciji može točno pratiti put kretanja ruke ili nekog drugog dijela tijela. Ideja o osnovnim pokretima bila je vrlo primamljiva za određivanje vremena izrade, jer se kod snimanja vremena kronometrom vrši procjena zalaganja za koju se tvrdilo da je subjektivna. Do sistema unaprijed određenih vremena izrade došlo se sustavnim radom na velikom broju snimljenih osoba, vodeći računa o mnogo faktora koji utječu na vrijeme izradbe, kao naprimjer: dužina pokreta, težina tereta, oblik predmeta, vrsta pokreta i slično. [1]

### **3. INDUSTRIJA 4.0**

Primjena računala u industriji prisutna je već nekoliko desetljeća, a danas gotovo da ne postoji industrijska grana u kojoj ono nije od neizmjernog značaja. U Industriji 4.0 računalo nije ključna tehnologija, već internet. Industrija 4.0 označuje umrežavanje svih uređaja i strojeva koji sudjeluju u proizvodnji, ali i procesa koji se odvijaju pomoću telekomunikacijske tehnologije. Zamišljeno je da se sinergistički poveže više aktualnih trendova kao što su: automatizacija, mrežno povezivanje, mobilnost, globalizacija i sigurnost. Proizvodni procesi se unapređuju pomoću mrežnog povezivanja te dalje automatiziraju, tako da proizvodi, strojevi, pogoni i ljudi međusobno komuniciraju i surađuju. Takav pristup omogućuje optimiranje cijelog lanca proizvodnje te praćenje cijelog ciklusa proizvoda.

U Industriji 4.0 cilj je postići vitku, fleksibilnu i individualiziranu proizvodnju sa što manje škarta. Obraća se pažnja kako što više umanjiti sve gubitke koji ne pridonose većoj proizvodnosti. Proizvodnja mora biti fleksibilna iz razloga što serije nisu velike kao u prošlosti, već je uglavnom riječ o manjim i zahtjevnijim serijama proizvoda, a fleksibilnost isto tako omogućuje ispunjavanje različitih zahtjeva koji se moraju izvršiti u vrlo kratkom roku. Proizvodnja je individualizirana, jer se okreće potrebama i željama kupaca. Za implementaciju Industrije 4.0 bitno je imati kvalitetnu organizaciju rada, sofisticiranu opremu i strojeve te obrazovanu radnu snagu. Razvojem Industrije 4.0 čovjeka će u mnogo teških i nepoželjnih poslova zamijeniti strojevi. To nužno ne znači da će se smanjiti broj radnih mjesta, već će se pojaviti potreba na drugim radnim mjestima gdje će ljudi koji se odluče dodatno obrazovati ili prekvalificirati moći kontrolirati rad strojeva te u suradnji sa njima postizati bolje rezultate proizvodnje.

#### **3.1. Povijest i razvoj Industrije 4.0 [2]**

Industrija 4.0 je četvrta industrijska revolucija koja se nadovezuje na tehnološke revolucije koje su donijele energija vode i pare (industrijska revolucija 1.0), električna energija (industrijska revolucija 2.0) i računalstvo/kompjuterizirana automatizacija (industrijska revolucija 3.0). Industrija 4.0 (I40) je pokrenuta kao nacionalna strateška inicijativa njemačke vlade donesena preko Ministarstva obrazovanja i istraživanja i Ministarstva za ekonomska pitanja i energetiku. Inicijativa je pokrenuta 2011. godine od strane Grupe za promicanje komunikacije IndustryScience Research Alliance koju je sazvalo i organiziralo Ministarstvo obrazovanja i istraživanja čime je također usvojen "Akcijski plan Strategije visoke tehnologije 2020". Naime, njemačka vlada je

2006. godine pokrenula svoju Strategiju visoke tehnologije za koordinaciju aktivnosti istraživanja i inovacija s ciljem očuvanja konkurentnosti i poticanja tehnoloških inovacija. U srpnju 2010. najavljena je "HighTech strategija 2020." kako bi se olakšao položaj Njemačke kao vodećeg pružatelja tehnologije, znanosti i inovacija. Kao dio vladinog "Akcijskog plana Strategija visoke tehnologije 2020." iz ožujka 2012., razvijeno je deset "Budućih projekata", uključujući I40 koji podržavaju Strategiju visoke tehnologije.

Sve uključene strane smatrale su I40 strateškom mjerom za konsolidaciju njemačkog tehnološkog vodstva u strojarstvu i osiguravanja industrije prikladne za buduću proizvodnju u Njemačkoj. 2015. godine proširena je platforma I40. Osnovni cilj platforme bio je osiguravanje i razvitak vodeće pozicije za Njemačku u industrijskoj proizvodnji. Uz to, zadatak platforme je promicanje digitalne strukturne promjene, razvijanje preporuka i savjetovanje kreatora politika o implementaciji I40, pružanje podrške u stvaranju znanja, mobilizacija malih i srednjih poduzeća te promoviranje globalnog umrežavanja i osiguravanje praktičnog funkcioniranja I40.

U početku je glavni problem bio okupiti sve zainteresirane strane. Različiti ciljevi između tvrtki, sindikata i predstavnika industrije u početku su zakočili širu rasprostranjenost platforme. Vlada se u početku suzdržavala od uključivanja, međutim odlučila se uključiti kako bi poboljšala koordinaciju između uključenih te proširila domet platforme. Platforma je pokrenuta u poslovnom svijetu, no tek je uključivanjem ministarstava kroz političko vodstvo i propagiranje uspjela dostići današnje razmjere.

Nakon što se uspjelo upoznati svijet sa pojmovima i standardima koje donosi I40, u predstojećem razdoblju morat će se više baviti malim i srednjim poduzećima na operativnoj razini, gdje se zapravo digitalna transformacija i događa, u smislu integracije novih digitalnih i industrijskih procesa i prilagođavanja organizacije rada.

Iako je pokrenuta tek 2011. godine kao istraživački program, I40 je u vrlo kratkom vremenu već ušla u mainstream u smislu suradnje i implementacije pojmova i standarda. Također, iako je I40 još uvijek u ranoj fazi svog razvoja, inicijativa je uspješna u prijenosu istraživanja u praksu. Njemačka je sa svojom politikom inicijative I40 prva pokrenula novi način razvijanja proizvodnje, no danas je industrijska transformacija globalni trend. Mnoge zemlje kao što su Nizozemska, Francuska i UK poduzeli su određene korake za podršku primijeni I40 standarda u proizvodnji. Na temelju dosadašnjeg iskustva zaključeno je kako treba povećati platformu I40, uključiti što više sudionika te platformi dati jaču političku podršku kako bi prevladala konkurenciju među

industrijskom grupama kroz suradnju na zajedničkim normama i standardima kao i integriranje industrijskih domena.

### **3.2. Ključni pojmovi u Industriji 4.0**

Industrija 4.0 sadrži nekoliko ključnih elemenata. Internet stvari koje će omogućiti umrežavanja cjelokupnog proizvodnog sustava, kibernetičko – fizički sustav koji prati rastuću automatizaciju, računalni oblak koji omogućava pohranu velike količine podataka te big data kao pojam koji označava upravljanje svim podacima koji kolaju u ovom digitalnom sustavu. Navedeni pojmovi bit će detaljnije pojašnjeni u ovom potpoglavlju.

#### **3.2.1. Internet stvari (Internet of things – IoT)**

Internet stvari (eng. Internet of things - u daljnjem tekstu IoT ) kao izraz prvi je spomenuo Kevin Ashton 1999. godine sa poveznicom u upravljanju lancima opskrbe. Koncept IoT vrti se oko riječi pametno, to jest misli se na sposobnost samostalnog stjecanja i primjene znanja. IoT se odnosi na objekte, uređaje ili senzore koji su pametni, imaju svoju jedinstvenu adresu temeljenu na svojim komunikacijskim protokolima te su prilagodljivi i autonomni sa svojom sigurnošću. IoT se može opisati u tri vizije:

- orijentirana na internet - vizija se fokusira na povezanost između objekata,
- usmjerenost na stvari - vizija se fokusira na generičke objekte,
- usmjerenost na znanje - vizija se fokusira na to kako predstaviti, pohraniti i organizirati informacije. [3]

Ove su vizije definirane prema prvotnoj viziji Međunarodne telekomunikacijske unije (eng. International telecommunication unit - ITU) o IoT-u koja ga definira kao „povezivost bilo kada i s bilo kojeg mjesta za bilo koga, a sada ćemo imati i mogućnost povezivanja za bilo što.“

Postoje tri komponente koje čine osnovu IoT arhitekture:

- 1) Hardver: sastoji se od senzorskih čvorova, njihove ugrađene komunikacije i sklopova sučelja.
- 2) Middleware: sastoji se od resursa za pohranu podataka, analizu i rukovanje.



- 3) Prezentacijski sloj: Sastoji se od učinkovitih alata za vizualizaciju koji su kompatibilni s različitim platformama za različite aplikacije i prikazuju podatke krajnjem korisniku u razumljivom obliku. [3]

Parametri koji utječu na arhitekturu IoT-a su višestruki. Stoga su trenutni istraživački napori usmjereni na osmišljavanje optimizirane arhitekture koja rješava probleme mreže kao što su skalabilnost, sigurnost, adresabilnost i učinkovito korištenje energije. [3]

Dakle, internet stvari omogućuju umrežavanje cijelog proizvodnog procesa čime tvornice postaju pametno okruženje. Internet stvari uključuju sirovine, dijelove u izradi, strojeve, gotove proizvode koji su svi međusobno povezani i komuniciraju. Cilj je povezati sve komponente koji sudjeluju u procesu proizvodnje te provesti umrežavanje do najsitnijih dijelova sustava. Na taj način cijeli proces postaje automatiziran, može se pratiti tijekom proizvodnje u realnom vremenu, olakšava se proces upravljanja logistikom i povećava se učinkovitost proizvodnje. [3]



Slika 1. Prikaz povezanosti pomoću IoT [4]

### 3.2.2. Kibernetičko-fizički sustav (CPS)

Kibernetičko – fizički sustav (eng. cyber physical system- u daljnjem tekstu CPS) spaja robotiku, IoT i strojno učenje. CPS u svom temelju označuje bilo kakav strojarski proces koji je automatski

softverski kontroliran. Koristeći dobivene ulazne podatke sa senzora, softver pokreće algoritam koji određuje kako treba upravljati strojevima, opremom i tvorničkom infrastrukturu. Preko tog softvera pokreću se i operacijske radnje bez čovjekovog uplitanja. Objekti u proizvodnji, budući da su dio istog umreženog sustava, ali opet zasebni dijelovi, mogu vršiti nezavisnu kontrolu jedni nad drugima te samim time prepoznavati određene greške u prethodno izvedenim postupcima. [5]

### **3.2.3. Računalni oblak (eng. cloud) [6]**

Računalni oblak donosi mnoge prednosti u informatičko poslovanje poduzeća. Mogućnost umrežavanja strojeva, automatizacija proizvodnje, ali i olakšavanje administracije i upravljanja proizvodnje; sve to je mnogo lakše uz postojanje računalnog oblaka koji je zapravo prostor za pohranu svih podataka koji kolaju među navedenim faktorima. Postoje tri varijante računalnog oblaka:

Softver kao usluga (SaaS):

- Najobuhvatiji oblik računalnog oblaka gdje cjelokupnu aplikaciju isporučuje pružatelj usluga putem web preglednika.
- Ovaj način jednostavan je za grupno korištenje, a ažuriranjem aplikacije, potencijalnim poteškoćama i održavanjem softvera bavi se pružatelj usluge.
- Primjer ovakvog programa je ERP - planiranje resursa poduzeća (eng. enterprise resource planning).

Platforma kao usluga (PaaS):

- Pružatelj usluga omogućava korisniku pristup aplikaciji, međutim pružatelj usluga osigurava hardver i softver na vlastitoj infrastrukturi potreban za nesmetan rad aplikacije.
- Primarno je koristan za programere i developere; PaaS dozvoljava korisniku pokretanje, razvoj i upravljanje vlastitim aplikacijama bez potrebe za izgradnjom i održavanjem vlastite infrastrukture ili platforme.

Infrastruktura kao usluga (IaaS):

- Usluga koja omogućava infrastrukturnu potporu, kao što je pohrana i virtualizacija putem oblaka ili interneta.
- Korisnik je odgovoran za operativni sustav i sve podatke i aplikacije, međutim pružatelj usluga daje pristup i upravljanje mrežom, poslužiteljima, virtualizacijom te mjestom za pohranu koje je potrebno.
- Korisnik ne treba ažurirati ili održavati vlastiti podatkovni centar, jer za njega to čini pružatelj usluge.
- Pristup i kontrola infrastrukture omogućena je preko aplikacije za programiranje sučelja.
- IaaS daje fleksibilnost u vidu kupovanja samo potrebnih komponenti, na vremenski period u kojem se potrebne i omogućava njihovo skaliranje.
- Kada komponente više nisu potrebne, može se prestati plaćati za njihovo korištenje.
- Najrašireniji i najpoznatiji IaaS je Google Cloud.

### **3.2.4. Big Data i analiza podataka**

Povećanjem digitalizacije povećava se i broj podataka koji kola unutar poduzeća. Koncept Big data odnosi se na velike i raznolike skupine podataka koji direktno utječu na poslovnu strategiju poduzeća. Povećanje broja podataka omogućuje mnoga poboljšanja. Zahvaljujući ovoj tehnologiji povećava se proizvodnost tvrtke, smanjuju se gubitci u proizvodnji, izbjegava se gomilanje zaliha ili pak nedostatak materijala, omogućavaju se poboljšanja proizvoda kroz povratne informacije nakon izlaska proizvoda iz proizvodnje. Analizom svih podataka koji se mogu isčitati također je moguće izbjegnute greške koje se potencijalno mogu dogoditi u procesu proizvodnje, može se dobiti više podataka o preferencijama kupaca i općenito djelovati brže i kvalitetnije u svakoj fazi vijeka trajanja proizvoda. Daljnim napretkom tehnologije i spoznavanjem svih mogućnosti big data analitike te prednosti koje ona donosi, očekuje se da tvrtke prošire upotrebu big data u sva svoja područja poslovanja. [7]

### **3.3. Ostale značajke Industrije 4.0**

Industrija 4.0 kao četvrta industrijska revolucija donosi mnoge inovacije u industriju. U ovom potpoglavlju navedeni su pojmovi na koje treba obratiti pozornost kada se govori o Industriji 4.0. Autonomni roboti, proširena stvarnost i aditivna proizvodnja donose nove mogućnosti u proizvodnju, dok su horizontalna i vertikalna integracija kao i cyber sigurnost preduvjeti za uspješno funkcioniranje modela Industrije 4.0 kao i za njen daljni razvitak. Svi ovi pojmovi bit će detaljnije pojašnjeni u nastavku rada.

#### **3.3.1. Autonomni roboti**

Roboti su počeli biti korišteni u industriji kako bi obavljali poslove koji su štetni ili teški za ljude. Bez primjene autonomnih robota kompanije neće moći odgovoriti najmodernijim zahtjevima proizvodnje i njihova primjena u bližoj budućnosti je neizbježna. Razvojem tehnologije primjena robota u proizvodnji neće biti toliko komplicirana kao dosad i omogućit će jednostavnu suradnju čovjeka i robota. Tvrtke koje se primarno bave robotikom predstavile su nekolicinu novi tehnologija od kojih se izdvaja Kuka LBR IIWA. Ovaj robot ima sposobnost učenja od svojih kolega, ljudi, kao i provjeru, optimiziranje i dokumentaciju zadataka pomoću cloud tehnologije. [7]

#### **3.3.2. Horizontalna i vertikalna integracija**

Horizontalna integracija odnosi se na integraciju različitih softvera i hardvera koji se koriste u proizvodnji. Bez obzira na to od koliko različitih dobavljača je opremljena tvornica, oprema mora funkcionirati povezano i svrsishodno. Takav način rada omogućuje ispunjavanje zahtjeva proizvodnje i uspostavu predvidljivog održavanja. [5]

Vertikalna integracija odnosi se na efikasnu suradnju različitih odjela unutar poduzeća. Cilj povezivanja je sagledavanje cjelokupne situacije te donošenje najboljeg rješenja. Drugim riječima, različiti odjeli međusobno dijele informacije kako bi se pri donošenju odluka uzeo u obzir utjecaj te odluke na cjelokupno poduzeće. Tako doneseno rješenje, sa podacima iz svih odjela, optimalno je rješenje za tvrtku u cjelini. [5]

### 3.3.3. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja, poznata i kao 3D printanje odnosi se na proizvodnju dobara prilagođenih i zahtjevanih od kupca. Najčešći način su metode prototipa i 3D printanje gdje se želi staviti naglasak na proizvodnju manjih serija proizvoda prilagođenih kupcu, a također se želi ići u smjeru smanjenja zaliha i prekomjerne proizvodnje, što odgovara JIT filozofiji poslovanja. Primjer ovakve proizvodnje među prvima se javio u zrakoplovnoj industriji gdje se 3D printanjem nekih dijelova smanjila težina zrakoplova te smanjila upotreba nekih sirovina poput titana. Glavne prednosti aditivne proizvodnje su smanjenje vremena isporuke, obujma proizvodnje, povećanje proizvodnje masovne prilagodbe kupcu i zadržavanje agilnosti. [7]

### 3.3.4. Proširena stvarnost (AR)

Proširena stvarnost (eng. augmented reality - u daljnjem tekstu AR) definira se kao interaktivna tehnologija koja omogućuje sklad između virtualnog svijeta i njegovih korisnika dok se virtualni svijet koristi kao dio stvarnog okruženja. Prve naočale proširene stvarnosti na svijetu izbacio je Google pod nazivom *Google Glass*. Također, 2011. godine osnovan je *Magic Leap* koji se prilagođava ljudskom oku pretvaranjem kuta i dubine svjetlosnog polja. Ova tehnologija poboljšava interakciju čovjeka i stroja, daljinsko upravljanje zadacima održavanja i vizualnu kontrolu čovjeka. Može se koristiti u mnogim aplikacijama kombiniranjem računalno generirane grafike i fizičkih objekata. AR pruža mogućnost kontrole kretanja svojih korisnika koristeći različite senzore u cilju ispunjenja određenih zadataka. [7]

### 3.3.5. Cyber sigurnost

Cyber sigurnost je još jedno pitanje koje ima vrlo važnu ulogu u modernom poslovnom okruženju. Zbog potencijalnih hakerskih napada na poslovanje, nužna su rješenja koja mogu takve napade spriječiti te je važan razvoj obrambenih mehanizama protiv negativnih učinaka ovakvih prijetnji. Postoje određena rješenja koja uništavaju cyber napade prije nego što se oni dogode, a mogu se prepoznati analizom prethodnih napada pomoću kontrolnih radara. Osim toga, bitno je izgraditi nacionalne obrambene sustave zaštite od cyber napada te obrazovati zaposlenike koji znaju djelovati u takvim situacija. Iako se može činiti da je ovakav način obrane protiv cyber napada skup, u odnosu na potencijalnu štetu koja može nastati cyber napadom, trošak obrane je vrlo isplativ. Cyber sigurnost jedna je od ključnih stavki u daljnjem ulaganju i razvoju digitalizacije proizvodnje. [7]

## **4. SOFTVERI U PODRUČJU STUDIJA RADA I ANALIZI VREMENA**

U prošlosti se u području studija rada većina mjerena izvodila ručno pomoću štoperice. Takav način rada ima mnoge negativne posljedice poput problema zapisivanja svih rezultata mjerenja, pohrane tih podataka te u manjoj mjeri nedovoljne preciznosti. Razvojem tehnologije pojavili su se softveri koji u mnogo čemu olakšavaju posao u području studije rada i analize vremena. Osim što je moguće vrlo jednostavno snimiti određene operacije i ubaciti ih u program, mogu se mnogo detaljnije i svestranije promatrati procesi unutar proizvodnje. Moguće je analizirati vremena na pojedinim proizvodnim jedinicama te sukladno tome izvoditi operacije poput balansiranja proizvodnih linija. Softveri u području studija rada i analize vremena ne predstavljaju značajno ulaganje za tvrtke, nerijetko su i besplatni te su vrlo jednostavni za korištenje. U daljnjem dijelu ovo poglavlje bit će opisani neki od softvera koji su često upotrebljavani u industriji.

### **4.1. SimData [8]**

SimData je softver studija vremena i kretanja osmišljen kako bi omogućio korisnicima učinkovito korištenje studija vremena na postojećim operacijama. SimData dozvoljava kreiranje drugačijih entiteta koji pomažu u vođenju procesa prikupljanja podataka. Dodatno, SimData pruža različite metode mjerenja vremena:

- Kroz unaprijed definirane skupne zbirke koje definira korisnik.
- Odabir mreže projekta koja omogućava korisnicima da kreiraju i dodaju procese u hodu tijekom prikupljanja podataka o vremenskim mjerenjima s različitih stanica ili procesa.



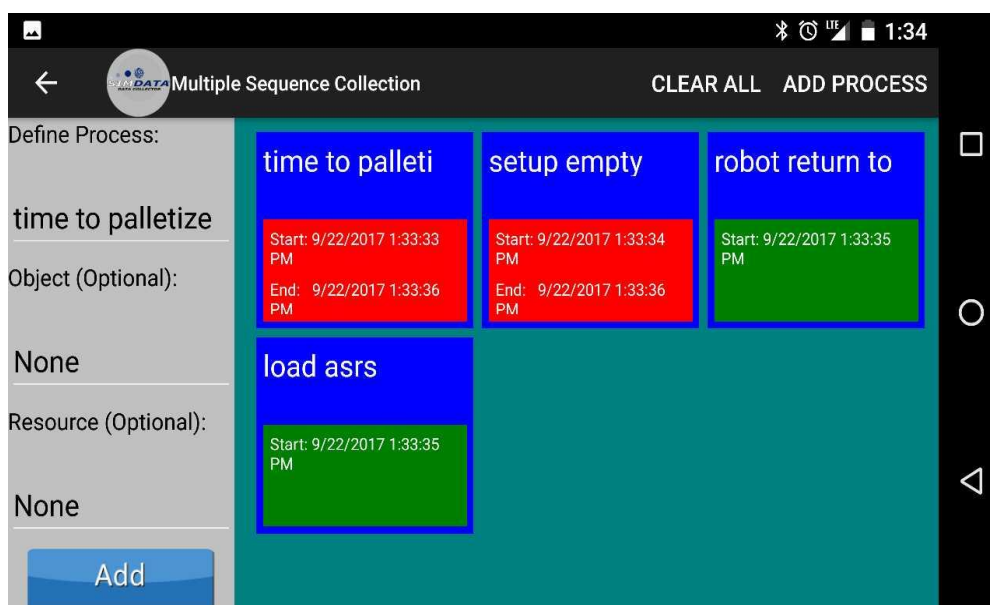
Slika 2. Korištenje SimData softvera na računalima i pametnim uređajima [8]

Svi prikupljeni podaci mogu se grafički prikazati unutar SimData sučelja, mogu se izvesti kao datoteke odvojene zarezom u druge programske pakete ili mogu biti direktno umetnuti u SimCad Process Simulator.

SimData je besplatan softver koji se može direktno preuzeti za uređaje sa sutavima Windows 8.x i 10.x, uključujući pametne telefone i tablete.

Najvažnije mogućnosti SimData softvera su:

- Pojednostavljenje procesa prikupljanja točnih podataka za potrebe analize vremena.
- Mogućnost kretanja određenim radnim prostorom i obavljanja studija vremena na različitim procesima.
- Dinamičko sinkroniziranje za umetanje prikupljenih podataka u Simcad i primjena promjene u načinu rada.
- Istovremeno prikupljanje podataka sa različitih stanica.
- Analiziranje i grafičko prikazivanje podataka u tijeku i nakon prikupljanja.
- Izvoz prikupljenih podataka u Simcad simulator procesa za simulacijsku analizu.



Slika 3. Sučelje SimData softvera [8]

#### 4.2. OTRS10 [9]

OTRS je softver za studij vremena temeljen na videozapisu osmišljen da se lakše postigne smanjenje troškova i rada unutar operacija. Zadnja verzija softvera koristi japansko industrijsko inženjerstvo i lean proizvodne principe kako bi poduzeća postigla vrhunske rezultate.

OTRS se smatra zlatnim standardom u studiju vremena i pokreta i koriste ga najveće kompanije u japanskoj industriji. Dostupan je na engleskom, japanskom i kineskom kao standard, a lako se može konfigurirati na bilo koji jezik kroz pripremu jezične datoteke. Najnovija verzija razvijena je u suradnji sa Toyota Motor Corporation kako bi podržala Toyotin proizvodni sustav.

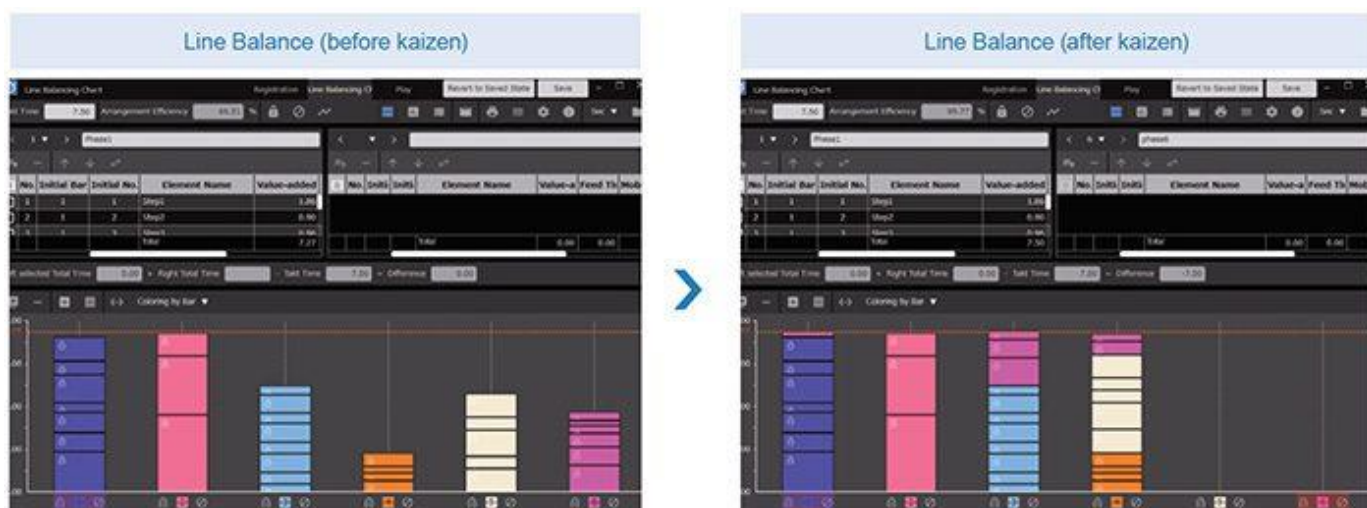
OTRS je dizajniran kako bi povećao učinkovitost kontinuiranog napretka putem analize vremena i pokreta izravno na licu mjesta. Moćan i jednostavan za korištenje, ovaj softver podržava u kreiranju, analiziranju i poboljšavanju standardiziranog rada i uravnoteženju proizvodnih linija.

OTRS čini analizu vremena jednostavnijom: snimi se operacija, ubaci u OTRS te se koristi intuitivno grafičko sučelje za brzo prepoznavanje radnih koraka i povezanih vremena unutar procesa. Također, OTRS značajno smanjuje vrijeme potrebno za izvođenje analize vremena i kreiranja standardnih grafova rada čime se direktno štedi vrijeme i novac tvrtke.



Ostale mogućnosti koje pruža OTRS su:

- eliminiranje standardiziranih procesa korištenjem jednostavne operacije softvera za mjerenje rada koji simulira štetne pokrete
- mogućnost korištenja analize „frame-by-frame“ koja služi za rastavljanje pokreta na komponente za točnu analizu
- automatsko kreiranje video priručnika iz rezultata analize
- jednostavno izdavanje radnih postupaka, tablica kombiniranja rada, grafikona ravnoteže operacija
- učinkovito obučavanje osoblja i prijenos znanja



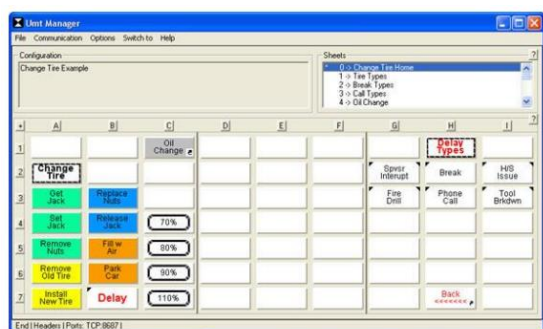
Slika 4. Uravnoteženje proizvodnih linija uz pomoć OTRS softvera [9]

### 4.3. UmtPlus [10]

UmtPlus je softver za analizu vremena i lean proizvodnju koji služi za prepoznavanje aktivnosti koje ne donose vrijednost, optimizaciju resursa i povećanje produktivnosti. Podaci se prikupljaju pomoću mobilnog uređaja čime se izbjegava ručno unošenje podataka što smanjuje mogućnost pogreške. Korištenje UmtPlus mobilne aplikacije u analizi vremena i području studija rada omogućuje brzi pristup izvješćima koja pomažu pri brzom određivanju gdje i kako implementirati rješenja. Zahvaljujući UmtPlus vrijeme prikupljanja podataka smanjeno je za 50 posto od vremena potrebnog za korištenje štoperice.

UmtPlus uključuje 3 opsežna softverska modula:

- Umt manager,
- Umt plus mobilna aplikacija studija vremena,
- Umt stat.



| #                        | Elements           | Occ               | Avg<br>h:mm:ss | Min<br>h:mm:ss | Max<br>h:mm:ss | Total<br>h:mm:ss | StDev<br>h:mm:ss    | Typ.Cat. | Cat. Name         | Occ  | Dur  | E    | n    | Num | Sum            | Elements             |                    |
|--------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|---------------------|----------|-------------------|------|------|------|------|-----|----------------|----------------------|--------------------|
| 1                        | Close Hood         | 45                | 00:00:17       | 00:00:00       | 00:04:38       | 000001252        | 46.15               | NVA 0    | Prepare Car       | 4.5  | 5.4  | 30.5 | 1672 | F   | 0.000          | 1                    | Close Hood         |
| 2                        | DELAY              | 9                 | 00:01:16       | 00:00:04       | 00:02:41       | 000001059        | 77.46               | NVA 3    | Delays            | 0.9  | 4.3  | 27.3 | 239  | F   | 0.000          | 2                    | DELAY              |
| 3                        | DELAY              | 5                 | 00:00:21       | 00:00:02       | 00:01:08       | 000000149        | 26.81               | NVA 3    | Delays            | 0.5  | 0.8  | 45.0 | 406  | F   | 0.000          | 4                    | Electrical Problem |
| 4                        | Electrical Problem | 5                 | 00:00:21       | 00:00:02       | 00:01:08       | 000000149        | 26.81               | NVA 3    | Delays            | 0.5  | 0.8  | 45.0 | 406  | F   | 0.000          | 4                    | DELAY              |
| 5                        | Missing Items      | 5                 | 00:00:56       | 00:00:01       | 00:04:28       | 000000442        | 116.67              | NVA 3    | Delays            | 0.5  | 2.0  | 71.3 | 1019 | F   | 0.000          | 5                    | Missing Items      |
| 6                        | DELAY              | 10                | 00:00:19       | 00:00:01       | 00:00:57       | 000000311        | 23.73               | NVA 3    | Delays            | 1.0  | 1.3  | 29.7 | 354  | F   | 0.000          | 6                    | DELAY              |
| 7                        | Talking            | 5                 | 00:00:35       | 00:00:03       | 00:02:27       | 000000929        | 41.45               | NVA 3    | Delays            | 1.6  | 4.0  | 22.1 | 314  | F   | 0.000          | 6                    | DELAY              |
| 8                        | Tool Broken        | 16                | 00:00:16       | 00:00:00       | 00:01:00       | 000001203        | 17.63               | NVA 1    | Material handling | 4.5  | 5.1  | 12.4 | 279  | F   | 0.000          | 7                    | Tool Broken        |
| 9                        | Dispose Old Oil    | 56                | 00:00:13       | 00:00:02       | 00:00:50       | 000001250        | 13.94               | NVA 1    | Material handling | 5.6  | 5.4  | 10.2 | 225  | F   | 116.000        | 8                    | Dispose Old Oil    |
| 10                       | Engine Check       | 9                 | 00:00:06       | 00:00:06       | 00:00:06       | 000000049        | 0.19                | NVA 0    | Prepare Car       | 0.8  | 0.3  | 0.8  | 1    | F   | 0.000          | 9                    | Engine Check       |
| 11                       | Fill New Oil       | 66                | 00:00:14       | 00:00:01       | 00:02:03       | 000001525        | 22.88               | NVA 1    | Material handling | 6.6  | 6.5  | 15.1 | 504  | F   | 42.000         | 10                   | Fill New Oil       |
| 12                       | Fill out forms     | 58                | 00:00:09       | 00:00:00       | 00:00:41       | 000000841        | 3.96                | NVA 4    | Administration    | 5.8  | 3.6  | 11.1 | 395  | F   | 0.000          | 11                   | Fill out forms     |
| 13                       | Find New Oil       | 65                | 00:00:07       | 00:00:00       | 00:00:36       | 000000824        | 8.51                | NVA 2    | Finding materials | 6.5  | 3.5  | 10.3 | 279  | F   | 0.000          | 12                   | Find New Oil       |
| 14                       | Find New Tire      | 16                | 00:00:03       | 00:00:00       | 00:00:16       | 000000354        | 5.12                | NVA 2    | Finding materials | 1.6  | 0.4  | 28.6 | 524  | F   | 0.000          | 13                   | Find New Tire      |
| 15                       | Get Jack           | 18                | 00:00:03       | 00:00:02       | 00:00:05       | 000000110        | 1.35                | NVA 1    | Material handling | 1.8  | 0.5  | 6.2  | 28   | F   | 0.000          | 14                   | Get Jack           |
| 16                       | Get New Tire       | 32                | 00:00:07       | 00:00:01       | 00:00:29       | 000000412        | 3.54                | VA 1     | Material handling | 3.2  | 1.8  | 16.3 | 339  | F   | 0.000          | 15                   | Get New Tire       |
| 17                       | Jack up Truck      | 16                | 00:00:02       | 00:00:00       | 00:00:03       | 000000042        | 0.89                | NEC 0    | Prepare Car       | 1.8  | 0.3  | 6.8  | 34   | F   | 0.000          | 16                   | Jack up Truck      |
| 18                       | Loosen Lugnuts     | 20                | 00:00:02       | 00:00:00       | 00:00:08       | 000000057        | 2.75                | NVA 0    | Prepare Car       | 2.0  | 0.4  | 15.2 | 209  | F   | 66.000         | 17                   | Loosen Lugnuts     |
| 19                       | Measure Levels     | 101               | 00:00:08       | 00:00:00       | 00:03:42       | 000001329        | 22.89               | VA 0     | Prepare Car       | 10.1 | 5.7  | 21.6 | 1897 | F   | 301.000        | 18                   | Measure Levels     |
| 20                       | Move Vehicle       | 9                 | 00:00:07       | 00:00:00       | 00:00:09       | 000000059        | 2.48                | NVA 1    | Material handling | 0.9  | 0.4  | 3.0  | 27   | F   | 0.000          | 19                   | Move Vehicle       |
| 21                       | Open Hood          | 105               | 00:00:29       | 00:00:01       | 00:03:40       | 000005206        | 40.72               | NEC 0    | Prepare Car       | 10.5 | 21.9 | 10.1 | 433  | F   | 100.000        | 20                   | Open Hood          |
| 22                       | Put Cap On         | 36                | 00:00:07       | 00:00:00       | 00:00:36       | 000000440        | 3.52                | NEC 0    | Prepare Car       | 3.8  | 2.0  | 15.9 | 386  | F   | 0.000          | 21                   | Put Cap On         |
| 23                       | Put on Lugnuts     | 9                 | 00:00:22       | 00:00:01       | 00:00:42       | 000000256        | 21.67               | VA 1     | Material handling | 0.8  | 1.2  | 26.4 | 224  | F   | 32.000         | 22                   | Put on Lugnuts     |
| 24                       | Put on New Tire    | 12                | 00:00:23       | 00:00:08       | 00:00:35       | 000000444        | 11.90               | VA 1     | Material handling | 1.2  | 2.0  | 11.0 | 59   | F   | 0.000          | 23                   | Put on New Tire    |
| 25                       | Remove Cap         | 108               | 00:00:10       | 00:00:00       | 00:01:22       | 000001843        | 16.79               | NEC 0    | Prepare Car       | 10.8 | 7.9  | 11.8 | 804  | F   | 0.000          | 24                   | Remove Cap         |
| 26                       | Remove Jack        | 9                 | 00:00:03       | 00:00:02       | 00:00:04       | 000000030        | 1.23                | NEC 1    | Material handling | 0.8  | 0.2  | 8.8  | 25   | F   | 0.000          | 25                   | Remove Jack        |
| 27                       | Remove Lugnuts     | 28                | 00:00:06       | 00:00:01       | 00:00:17       | 000000330        | 5.26                | NEC 0    | Prepare Car       | 2.8  | 1.3  | 11.9 | 160  | F   | 88.000         | 26                   | Remove Lugnuts     |
| 28                       | Remove Tire        | 13                | 00:00:05       | 00:00:02       | 00:00:21       | 000000116        | 6.94                | NEC 1    | Material handling | 1.3  | 0.5  | 24.8 | 321  | F   | 0.000          | 27                   | Remove Tire        |
| 29                       | replace elague     | 1                 | 00:04:51       | 00:04:51       | 00:04:51       | 000000451        | 0.00                | NVA 0    | Prepare Car       | 0.1  | 2.0  | 0.0  | 0    | F   | 0.000          | 28                   | replace elague     |
| 30                       | Routine Break      | 10                | 00:00:04       | 00:00:01       | 00:00:07       | 000000040        | 2.17                | NVA 3    | Delays            | 1.0  | 0.3  | 12.8 | 86   | F   | 0.000          | 29                   | Routine Break      |
| 31                       | Talk to Customer   | 60                | 00:00:20       | 00:00:00       | 00:03:09       | 000002050        | 30.08               | NVA 4    | Administration    | 6.0  | 8.7  | 14.2 | 482  | F   | 0.000          | 30                   | Talk to Customer   |
| 32                       | test radiator      | 4                 | 00:00:03       | 00:00:03       | 00:00:03       | 000000015        | 0.00                | VA 5     | testing           | 0.4  | 0.1  | 0.0  | 0    | F   | 0.000          | 31                   | test radiator      |
| 33                       | test starter       | 8                 | 00:00:04       | 00:00:03       | 00:00:05       | 000000025        | 0.91                | VA 5     | testing           | 0.8  | 0.2  | 4.9  | 8    | F   | 0.000          | 32                   | test starter       |
| <b>Totals:</b>           |                    | <b>1003.000</b>   |                |                |                |                  | <b>00000358:14</b>  |          |                   |      |      |      |      |     | <b>747.000</b> |                      |                    |
| <b>Average by Study:</b> |                    | <b>0000:12:43</b> |                |                |                |                  | <b>000000:01:42</b> |          |                   |      |      |      |      |     |                |                      |                    |
|                          |                    |                   |                |                |                |                  | <b>Work: 16.3%</b>  |          |                   |      |      |      |      |     |                | <b>Abs.Err: 0.9%</b> |                    |

Slika 5. Prikaz tri moguća modula rada UmtPlus softvera [10]

Umt manager omogućava jednostavno kreiranje, uređivanje i upravljanje bilo kojim brojem konfiguracija s računala za izvođenje analize vremena ili uzorkovanje rada. Umt plus mobilna aplikacija pruža brzo prikupljanje podataka za studij rada preko mobilne aplikacije dostupne za iOS, Android ili druge tablete i pametne telefone. Umt stat omogućuje brzi pregled izvješća i grafova te lako manipuliranje podacima za analizu na računalima.

Umt Plus pruža i video modul kao pomoć pri analizi vremena. Video modul je dostupan od bilo gdje i za bilo koji video materijal. Mogućnosti za ovaj modul su višestruke, a koraci za upotrebu jednostavni: povezivanje na Umt Video preko WiFi-a, snimanje videozapisa sa oznakom vremena, mogućnost pomicanja videa unaprijed i unatrag za odabir najtočnije studije, mogućnost izvođenja

videa u usporenom modu ili zaustavljanja na određenom dijelu, mogućnost pretpregleda podataka analize vremena i mogućnost povezivanja na daljinu sa svojim timom ljudi kao i uvid u rezultate analize vremena također od bilo gdje.

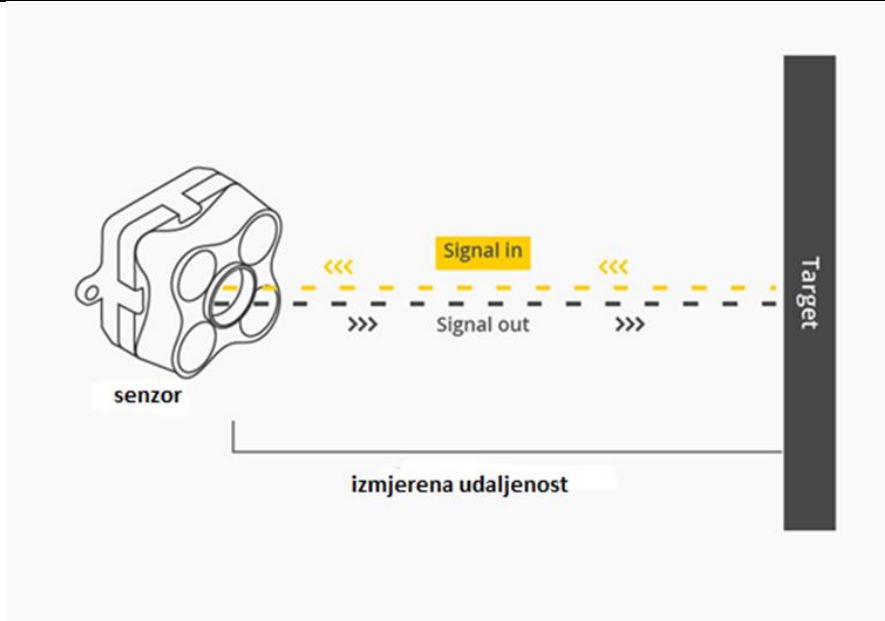
## **5. DIGITALIZACIJA PODRUČJA STUDIJA RADA I ANALIZE VREMENA**

Iz navedenih koncepata Industrije 4.0 lako je zaključiti kako se otvaraju nove mogućnosti u području studija rada i analize vremena. U ovom poglavlju navest će se neke mogućnosti kao što su upotreba različitih senzora ili kamera koji samostalno ili u kombinaciji pružaju mogućnosti praćenja rada u realnom vremenu. Navest će se i opisati svi senzori koji će biti predloženi za korištenje u poboljšanju studija rada i analize vremena. Senzori koji će se opisivati su senzori udaljenosti, senzori vibracija, senzori svjetlosti te uređaji pomoću kojih je moguće praćenje lokacije.

Senzor je uređaj koji mjeri određenu fizikalnu veličinu i pretvara je u signal pogodan za daljnju obradu.[11] Senzori koji mogu biti vrlo korisni u području studija rada i analize vremena su senzori udaljenosti, senzori praćenja lokacije, senzori vibracija i senzori pokreta.

### **5.1. ToF tehnologija**

Tehnologija vremena letenja (eng.time of flight – u daljnjem tekstu ToF) se zapravo koristi za senzore udaljenosti. Senzor mjeri vrijeme koje je potrebno valnom impulsu usmjerenom iz senzora da dođe do promatranog objekta i odbije se natrag ka senzoru. Prema vremenu trajanja tog putovanja impulsa i brzine svjetlosti u zraku, senzor odredi udaljenost na kojoj se promatrani objekt nalazi. ToF senzor u mogućnosti je proizvesti trodimenzionalnu sliku sa x, y i z kooordinatom na temelju jednog mjerenja. ToF tehnologija pruža prednosti u odnosu na druge senzore udaljenosti u vidu šireg opsega, bržeg očitavanja i veće točnosti mjerenja. [12]



Slika 6. Princip rada ToF tehnologije [13]

## 5.2. ToF kamera

Izvor svjetlosti ToF kamere je najčešće laser ili svjetleća dioda. ToF kamera sastoji se od osvjetljavajuće jedinice, optike, senzora slike, drivera te sučelja. Za osvjetljavajuću jedinicu upotrebljavaju se već prije spomenuti izvori, laser i diode koje koriste infracrvenu svjetlost. Pod pojmom optike bitno je izdvojiti leću koja skuplja reflektirano svjetlo koje se kasnije upotrebljava u senzoru slike. Senzor slike je najvažniji dio ToF kamere. Takozvani pametni pikseli, prilikom odašiljanja zrake svaki pojedinačno mjere vrijeme potrebno za kretanje od izvora odašiljanja ka promatranom objektu i nazad te samim time postoji mogućnost detekcije dubine svakog piksela zasebno, a kasnije i mogućnost povezivanja svih informacija u jednu cjelinu. Osvjetljavajuća jedinica i slikovni senzor moraju se kontrolirati brzim signalima i sinkronizirati. Udaljenost objekata od kamere izračunava se direktno u njoj. [14]



Slika 7. ToF kamera [15]

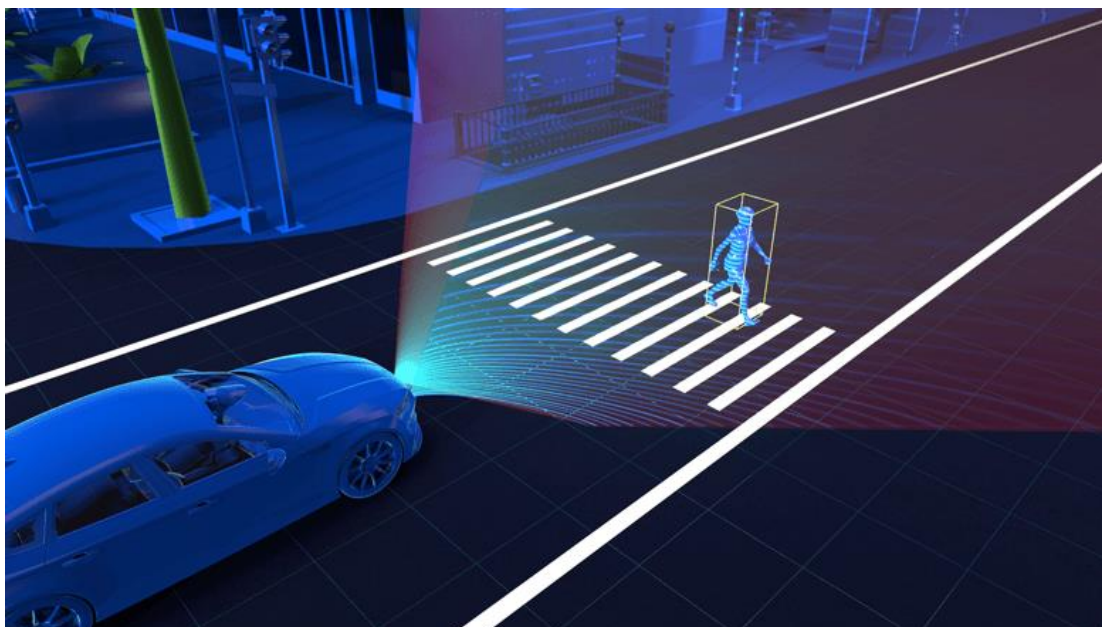
### 5.3. LIDAR

Light Detection and Ranging (u prijevodu detektor svjetla i raspona, u daljnjem tekstu LIDAR) je senzorska tehnologija koja mjeri udaljenost. Tehnologija koristi laserske zrake bezopasne za oči za stvaranje 3D prikaza promatranog okoliša. Klasičan lidar senzor emitira pulsirajuće svjetlosne valove iz lasera u okolinu. Ti se impulsi odbijaju od okolnih objekata i vraćaju u senzor. Uz poznatu brzinu svjetlosti, senzor koristi vrijeme koje je potrebno svakom impulsu da se vrati u senzor kako bi izračunao udaljenost koju je prešao. Ponavljanjem tog procesa koje se mjeri u milijunima puta u sekundi stvara se karta okoliša u stvarnom vremenu. [16]

LIDAR se počeo značajnije razvijati 1980-ih godina kada uvođenjem održivih GPS sustava dolazi do preciznih geoprostornih mjerenja. Daljnjim razvojem industrije raste i uporaba samog LIDAR sustava te se on počeo upotrebljavati i u različitim granama industrije: geodeziji, geografiji, geologiji, šumarstvu, arheologiji, poljoprivredi. Uviđanjem prednosti koje lidar sustav nosi, počeo se koristiti i u vojsci, policiji, automobilske industriji te medicini.

U posljednje vrijeme lidar je zauzeo značajno mjesto u automobilske industriji u razvoju autonomnih vozila. Prva primjena bila je u konceptu adaptivnih tempomata koji služe za prilagodbu brzine vozila kako bi se održao potreban razmak između vozila. Autonomna vozila također koriste lidar za prepoznavanje, odnosno skeniranje okoline u kojoj se nalaze, uočavanje

objekata i prepreka koji im se nalaze u vidnom području te poduzimanje određenih radnji ukoliko je to potrebno, poput usporavanja, zaustavljanja, skretanja ili upozoravanja vozača.



Slika 8. Primjer korištenja Lidar sustava u automobilskoj industriji [17]

Svaki LIDAR sustav sastoji se od: laserskog senzora, GPS prijemnika, inercijalna mjerna jedinica (eng. Inertial Measurement Unit - IMU), ugrađenog računala i uređaja za pohranu podataka. LIDAR sustav lasersko zrači te kada laserska zraka ili snop pogodi predmet oni se odbijaju prema senzoru te se uz pomoć mjerenja vremenskog intervala između slanja i primanja impulsa i već unaprijed poznate brzine svjetlosti može odrediti na kojoj se udaljenosti nalazi objekt. GPS prijemnik služi za točno određivanje x, y i z koordinata objekta na kojem se nalazi LIDAR sustav. IMU jedinica služi za točno određivanje položaja Eulerovih kutova (skretanje, posrtanje, valjanje). Uz pomoć ugrađenog računala i uređaja za pohranu podataka dolazi se do glave prednosti samog LIDAR- a.

Prolaskom kroz njegovu upotrebu u različitim granama industrije mogu se vidjeti različite prednosti. Prikupljanje i obrada velikog broja podataka u većini prirodnih uvjete. Zbog otpornosti na količinu aktivne svjetlosti mogu se koristiti i danju i noću. Zbog sposobnosti da ima minimalnu ljudsku ovisnost može se koristiti za mapiranje nepristupačnih i teško dostupnih mjesta. Iz tih

razloga vidljivo je da može poslužiti kao odlično sredstvo u skeniranju proizvodnih pogona u kojima osvijetljenje i općenito radni uvjeti nisu uvijek idilični. Osjetljivost skeniranja proizvodnih pogona ne mora biti na toliko visokoj razini kao u autonomnim vozilima što je svakako još jedna prednost u primjeni LIDAR sustava u području studija rada i analize vremena. [18]



Slika 9. Primjer senzora LIDAR [19]

#### 5.4. Beacon [20]

Beacon, u prijevodu svjetionik (u daljnjem tekstu koristit će se izraz beacon) je mali bežični uređaj koji radi na principu Bluetooth niske energije- u daljnjem tekstu BLE (eng. Bluetooth low energy). Ime (svjetionik) je dobio prema tome što konstantno odašilje svoju lokaciju baš kao morski svjetionik prema kojem se mornari orijentiraju kako bi znali gdje se nalaze. Neprestano odašilje konstantan signal koji drugi uređaji mogu vidjeti. Ne emitira vidljivo svjetlo, već emitira radio signal koji se prenosi u kratkim i pravilnim intervalima, a sastoji se od kombinacije slova i brojeva. Uređaj opremljen Bluetooth-om poput pametnog telefona koji ima instaliranu aplikaciju može vidjeti lokaciju beaconsa kada je u doometu. Svaki beacon ima svoj ID broj, tako da se u svakom trenutku na uređaju koji prima signal može vidjeti o kojem se točno beaconu radi te koja je njegova pozicija.



Beacon koristi Bluetooth za povezivanje sa korisnikovim uređajem i ostalim beaconima. Bluetooth tehnologija vrlo je važna u IoT ,a u konkretnom slučaju sa beaconima omogućava vrlo široku raširenost i jednostavno povezivanje budući da je gotovo svaki mobilni telefon opremljen bluetooth tehnologijom. Bluetooth pruža infrastrukturu za cijeli sustav korištenja beacons. To je standard za slanje podataka na kratke udaljenosti, bežična tehnologija koja nije toliko različita od WiFi-ja. Zbog toga hardver beacons može biti jednostavan. Oko korisnika ove tehnologije već postoji Bluetooth mreža koja može jednostavno povezati beacons i pametne uređaje.

BLE je energetska učinkovita verzija Bluetootha koja je izvorno predstavljena 2010. BLE-ova niska potreba za energijom ključna je za beacons jer im omogućuje da rade godinama na malim baterijama u obliku novčića. Također troši daleko manje energije od starog i nezgrapnog Bluetootha. BLE je zapravo glavni pokretač u IoT-u, omogućujući tehnologiji da traje duže s manjim dijelovima.



Slika 10. Mogućnost povezivanja beacons pomoću Bluetooth tehnologije [20]

Postoje dvije vrste beacon uređaja: stacionarni i mobilni.

Stacionarni su montirani na određenom mjestu, a korisnik aplikacije može vidjeti svoju lokaciju u odnosu na cjelokupno područje koje beacon pokriva. To može biti vrlo zgodno za orijentaciju korisnika aplikacije ukoliko se nalazi na nepoznatom području. Također, moguće je zatražiti

lokaciju određene pozicije unutar mape koju beacon pokriva. U tom slučaju beacon predlaže put od korisnikove trenutne lokacije, pa do traženog odredišta.

Primjena stacionarnih beacon uređaja koriste se i za podatke o popunjenosti, odabiru pravog puta unutar zatvorenog prostora ili obavijesti o blizini. U primjeru korištenja beacon-a za pronalazak pravog puta u zatvorenom prostoru prijemnik signala će biti najčešće korisnikov mobilni telefon. Kada je mobilni telefon u dometu beaconsa, on će uhvatiti signal i prikazati ga na aplikaciji koja je instalirana na njemu. Aplikacija će pročitati podatke sa beaconsa, vidjeti koja je radnja pridružena tim podacima i izvršiti tu istu radnju. Radnja može biti jednostavna, poput prikazivanja detaljnih podataka o određenom proizvodu uz koji se korisnik nalazi ili o stanju zaliha i prodaji tog istog proizvoda. Postoje i složenije radnje kao naprimjer izračunavanje položaja korisnika na temelju njegove blizine naspram nekoliko različitih beaconsa koji su postavljeni u dometu te označavanje korisnikove lokacije na interaktivnoj karti.

Mobilni beaconsi koji se još nazivaju i oznake (eng. tags) koristit će se u slučajevima kada se želi da ih ljudi nose sa sobom ili u svrhu praćenja njihovih kretanja. Prijemnik signala mora biti miran ako su sredstva praćenja u pokretu. U prethodnom su slučaju i prijemnik signala i aplikacija mogli raditi na istom uređaju, međutim u ovom primjeru to nije moguće, već je potreban dodatan uređaj. Dodatni uređaj je uglavnom poveznik ili pristupna točka te je njegov zadatak prenijeti prikupljene podatke na oblak (eng. cloud) ili lokalni poslužitelj. Aplikacija, kao naprimjer RTLS (eng. Real-Time Location System), odnosno sistem lokacije u realnom vremenu, uzima podatke i prevodi ih u neki drugi oblik poput karata u stvarnom vremenu koje prikazuju lokaciju zaposlenika, alata za pretraživanje i pronalaženje za lociranje nekih objekata ili ljudi, nadzorne ploče produktivnosti ili neke druge oblike za koje je omogućeno da ih aplikacija pruža. Aplikaciju se može programirati kako da odgovori na određeni signal beaconsa pomoću razvoja alata od treće strane.



Slika 11. Beacon [21]

### 5.5. Senzor vibracija

Senzori vibracija pretvaraju vibracijske veličine poput pomaka, brzine ili ubrzanja pretvaraju u mjerljive električne veličine. Uređaji za mjerenje vibracija dijele se na:

- beskontaktni: ne zahtijevaju fizički kontakt s objektom na kojem se mjere vibracije.
- kontaktne: zahtijevaju fizički kontakt s objektom na kojem se mjere vibracije.

Neki od primjera beskontaktnih senzora za mjerenje vibracija su induktivni senzor pomaka, kapacitivni senzor pomaka te ostali manje primjenjivani senzori. [22]

Kontaktne senzore vibracija su senzori koji su u fizičkom dodiru sa površinom mjenjenog objekta. Dva najzastupljenija kontaktna senzora vibracija su kontaktne senzor brzine i kontaktne senzor ubrzanja. Kontaktne senzor brzine radi na elektrodinamičkom principu i rijetko je upotrebljivan u praksi. [22]

Kontaktne senzor ubrzanja radi na piezoelektričnom efektu. Piezoelektrični efekt je pojava stvaranja električnog naboja na površini posebno odrezanog kristala koji je elastično deformiran vanjskom silom. Jedna strana (površina) tog kristala nabit će se negativno, a druga pozitivno, što znači da kristal postaje električni polariziran. Polarizacija kristala je najveća kada je naprezanje usmjereno u pravcu piezoelektrične osi kristala. Zbog potrebe za što boljim spojem s površinom

na kojoj se mjere vibracije akcelerometri se uglavnom na strojeve pričvršćuju vijčanim spojem. Ova vrsta senzora najzastupljenija je u praksi. [23]



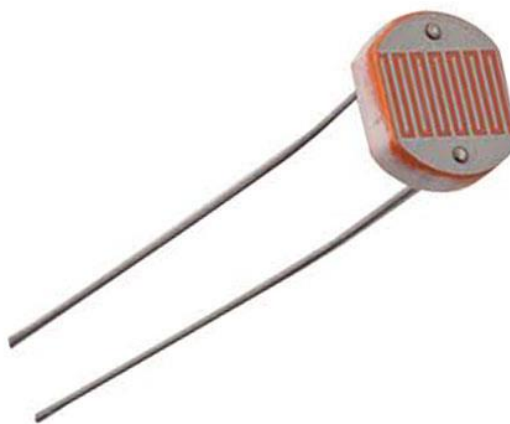
Slika 12. Senzor vibracija [24]

### 5.6. Senzor svjetlosti [25]

Senzor svjetlosti je fotoelektrični uređaj koji pretvara detektiranu svjetlosnu energiju (fotone) u električnu energiju (elektrone). Senzor svjetlosti generira izlazni signal koji pokazuje intenzitet svjetla mjereći energiju zračenja koja postoji u vrlo uskom rasponu frekvencija koja se u osnovi naziva svjetlost, a kreće se od infracrvenog, vidljivog do ultraljubičastog svjetlosnog spektra. Fotoelektrični uređaji mogu se svrstati u dvije glavne skupine, oni koji generiraju električnu energiju kada su osvijetljeni i oni koji na određeni način mijenjaju svoja električna svojstva. U prvu skupinu spadaju primjerice fotonaponski ili fotoemisijski, a u drugu fotootpornici i fotovodiči. To dovodi do sljedeće podjele:

- Foto emisijske ćelije,
- Foto vodljive ćelije,
- Foto naponske ćelije,
- Foto spojne ćelije.

Foto vodljivi svjetlosni senzor ne proizvodi električnu energiju, već jednostavno mijenja svoja fizička svojstva kada je izložen svjetlosnoj energiji. Najčešći tip fotovodljivog uređaja je fotootpornik koji mijenja svoj električni otpor kao odgovor na promjene u intenzitetu svjetlosti. Fotootpornici su poluvodički uređaji koji koriste svjetlosnu energiju za kontrolu protoka elektrona, a time i struje koja teče kroz njih. Uobičajeno korištena fotovodljiva ćelija naziva se svjetlosno ovisni otpornik (eng. Light Dependent Resistor) ili LDR.



Slika 13. Senzor svjetlosti [26]

## **6. PRIMJENA TEHNOLOGIJA ZA POTREBE STUDIJA RADA I ANALIZE VREMENA**

U ovom poglavlju opisat će se na koji se način senzori, neuronske mreže i sustav praćenja pokreta mogu koristiti za potrebe studija rada i analize vremena. Instalacijom senzora, korištenjem kamera i prsluka za praćenje fizioloških podataka, korištenjem neuronske mreže ili sustava za snimanje repetitivnih kretanja moguće je dobiti bitne podatke o radu zaposlenika. Moguće je pratiti koliko radnici rade, analizirati vremena pojedinih radnji ili operacija, dobiti uvid u radnikova raspoloženja ili fiziološka stanja. Također, moguće je analizirati raspored strojeva i alata u proizvodnji te dobiti uvid u eventualni prostor za napredak u vidu poboljšanja radnih uvjeta i povećanja proizvodnosti.

### **6.1. ToF**

Instalacijom ToF senzora na vanjski dio stroja, pokretne trake ili radnog stola može se vidjeti udaljenost radnika od mjesta instalacije senzora. Na taj način može se mjeriti vrijeme koje je radnik proveo na svom radnom mjestu. Prisutnost radnika na svom radnom mjestu jedan je od osnovnih uvjeta ka ostvarivanju značajnije produktivnosti. Ukoliko radnik nije na svom radnom mjestu, a nije na pauzi, treba tražiti koji su tome uzroci te pronaći rješenje da se radnikova prisutnost na radnom mjestu poveća.

### **6.2. Senzor vibracija**

Upotrebom senzora vibracija koji se postavlja najčešće na glavno vreteno mjere se vibracije na stroju. Prilikom produktivnog rada stroja, odnosno za vrijeme dok je alat u zahvatu senzor vibracija bilježi veće vibracije u odnosu na period kada alat nije u zahvatu, odnosno kada stroj radi u prazno. Na taj način može se uvidjeti koliko je stroj u pogonu, to jest može se odrediti tehnološko vrijeme. Također, moguće je vidjeti i koliko se vremena ukupno troši na pripremu za izvođenje radnih operacija, odnosno pripremno i pomoćno vrijeme. Senzor vibracija pomaže samo pri prepoznavanju tehnološkog vremena, međutim pomoću senzora vibracija nije moguće dobiti uvid u rasčlambu između pripremnog i pomoćnog vremena, već je moguće samo odvojiti ta vremena od tehnološkog vremena. U kombinaciji sa senzorom udaljenosti, može se vidjeti da li je radnik na svom radnom mjestu te ukoliko senzor udaljenosti pokazuje da je radnik na svom radnom mjestu, a senzor vibracija pokazuje manju vrijednost može se pretpostaviti da je to vrijeme koje

radnik troši na programiranje stroja i postavljanje zadanih parametara obrade ili primjerice upoznavanje sa dokumentacijom, što su sve aktivnosti koje spadaju u pripremno ili pomoćno vrijeme. Teži se tome da u ukupnom vremenu, vrijeme u kojem su vibracija veće, to jest tehnološko vrijeme ima što veći udio.

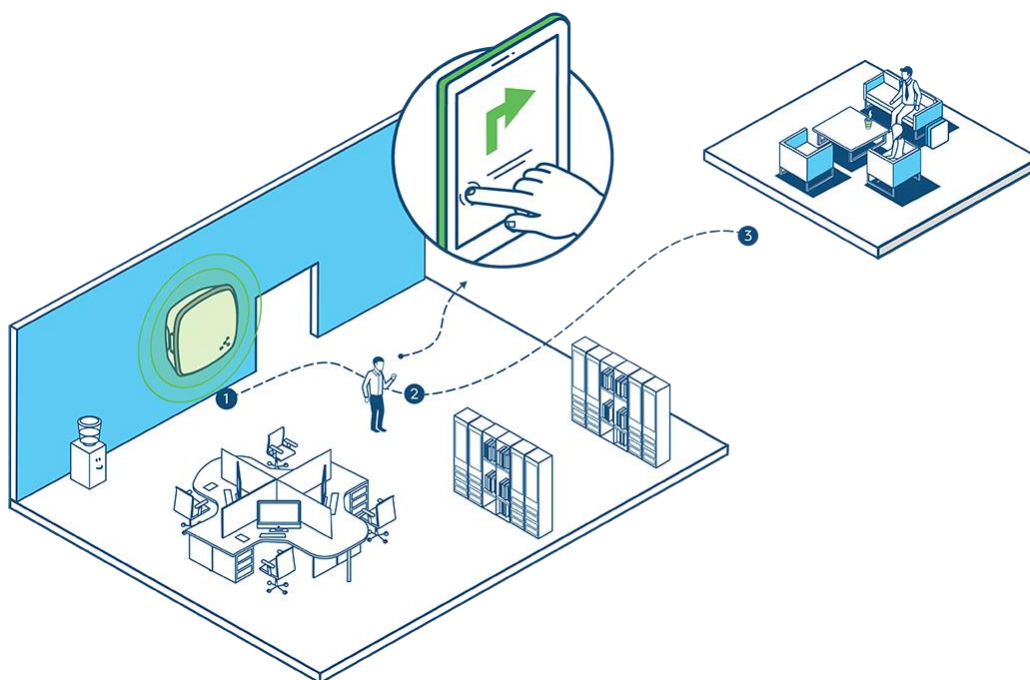


Slika 14. Primjer upotrebe senzora vibracija [27]

### 6.3. Beacon

Upotrebom beacona mogu se dobiti podaci o radnikovom prijašnjem putu u određenom vremenu te općenitoj njegovoj poziciji u pogonu u bilo kojem trenutku. Ukoliko radnik često mora odlaziti sa svog radnog mjesta po alat ili odlazi do drugih odjela unutar poduzeća, to se sve može bilježiti pomoću beacon-a. Najbolje rješenje bi bilo da se koriste uređaji manje veličine koje radnik može konstantno nositi sa sobom, primjerice u džepu. Na taj način može se pratiti koliko vremena se utroši na radnikovo hodanje po pogonu čime se smanjuje njegova produktivnost i efektivno vrijeme rada. Uvidom u puteve kojima radnik mora hodati do svog odredišta, možda se može postići optimalno rješenje u kojem se radniku nudi kraći put. Nadalje, ukoliko radnik mora mnogo hodati, možda se može krenuti u smjeru promjene rasporeda odlaganja određenog alata ili općenito u promjenu rasporeda pogona. Time bi se postiglo da radnik mora manje hodati, što odmah znači da bi manje svog vremena trošio na neproduktivno hodanje i mogao se više posvetiti svojim radnim

zadacima čime bi automatski rasla njegova produktivnost. Drugi način u kojem radnik ne koristi mobilni beacon, već uređaj koji je stacionaran, nudi rješenje da radnik preko svog pametnog uređaja i aplikacije instalirane na njemu te uz povezanost sa beaconom može dobiti podatke o najkraćem putu do željenog odredišta unutar proizvodnje. Rješenje bi bilo još bolje ukoliko bi postojao beacon instaliran u svakom odjelu poduzeća čime bi se osigurala pokrivenost beaconima unutar cijelog poduzeća te bi se mogli dobiti podaci o kretanju radnika u bilo kojem području. Kao što je objašnjeno u opisu ovog uređaja, tada bi se mogla konstantno vidjeti radnikova pozicija na interaktivnoj karti. Isto tako, manje odlaženja sa svog radnog mjesta i manje kretanja po pogonu može značiti i manje umaranja za radnika. Također, dobitak vremena koje se uštedi na taj način, radnik može djelomično iskoristiti za pauzu ukoliko mu je ona potrebna. Na taj način poboljšali bi se radnikovi radni uvjeti, ali bi se isto tako povećala i njegova produktivnost. Time bi korist bila obostrana, za radnika i za poduzeće.



Slika 15. Primjer upotrebe beacon uređaja za unutarnju navigaciju [28]

#### 6.4. Senzor svjetlosti

Senzor svjetlosti mogao bi se montirati na pojedine utore za odlaganje alata. Za vrijeme kada bi alat bio na svom mjestu, senzor svjetlosti bio bi u tami, a kada bi se alat koristio senzor bi obasipala



svjetlost. Ovaj princip rada bi funkcionirao pod pretpostavkom da se alat uvijek nakon korištenja odlaže na svoje mjesto. Rezultati ovog mjerenja pokazivali bi koji se alat koliko koristi te bi se trebalo utjecati na raspored odlaganja alata na način da oni alati koji se koriste češće budu dostupniji, odnosno da se odlažu bliže radnicima koji ih koriste. Također, u kombinaciji sa beaconom rezultati mjerenja senzora svjetlosti koristili bi se pri mogućem novom rasporedu odlaganja alata kako bi se što manje vremena trošilo na samo uzimanje i traženje alata. Senzor svjetlosti tako također ima utjecaj u analizi vremena te daje svoj doprinos u povećanju produktivnosti proizvodnje.



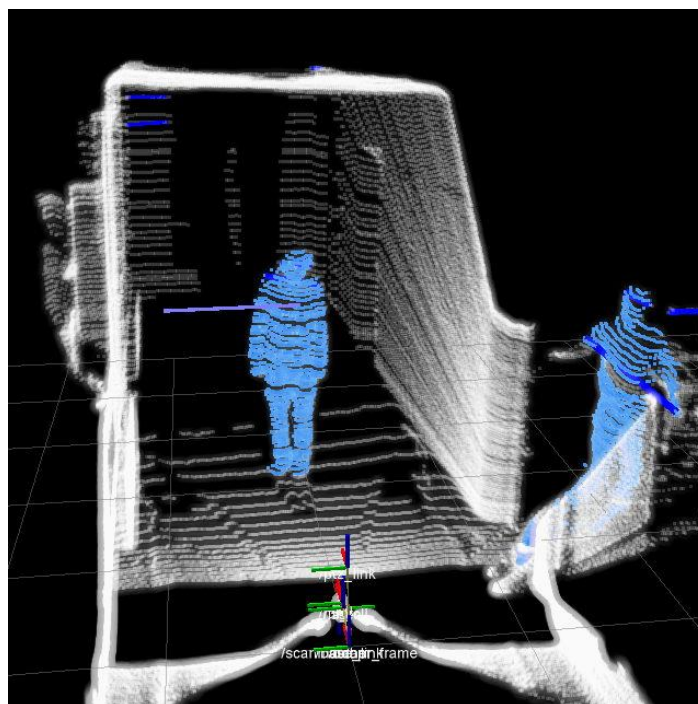
Slika 16. Primjer regala i kolica za odlaganje alata u kojima je moguće koristiti senzor svjetlosti

[29]

Uz to, senzor svjetlosti ukoliko se instalira negdje na zid ili strop gdje može dobro detektirati osvjetljenje proizvodnog prostora pruža mogućnost podešavanja osvjetljenja. Senzor svjetlosti može detektirati razinu osvjetljenja proizvodnog prostora te se na temelju tih podataka, ukoliko je primjerice prirodno osvjetljenje ispod tražene razine, može automatski paliti rasvjeta. To je još jedno poboljšanje radnih uvjeta koje je moguće ostvariti instaliranjem senzora svjetlosti.

## 6.5. LIDAR

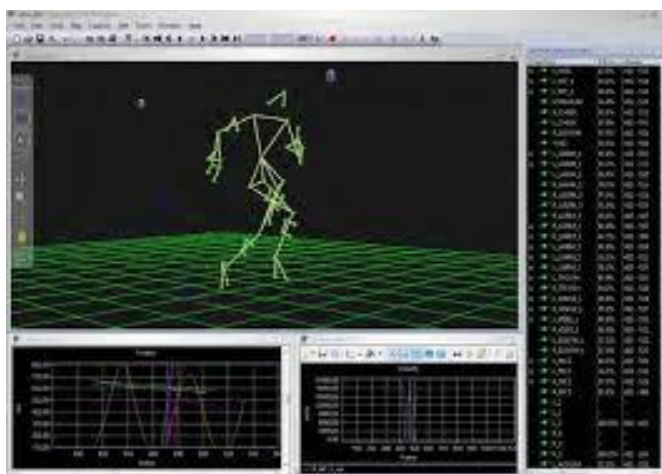
Primjena LIDAR sustava omogućava prepoznavanje trodimenzionalnih objekata u prostoru. Instalacijom LIDAR sustava na vanjski dio stroja ili negdje na radnom mjestu omogućilo bi se prepoznavanje radnika na svom radnom mjestu. Na taj način moglo bi se pratiti da li je radnik na svom radnom mjestu i radi ili radnik nije prisutan i ne obavlja svoje radne zadatke. S obzirom da LIDAR može prepoznati trodimenzionalne objekte u okolini, moglo bi se vidjeti u kojem je položaju radnik na svom radnom mjestu te bi se omogućilo praćenje izvođenja radnih zadataka u realnom vremenu. Na taj način mogao bi se dobiti detaljan uvid u strukturu vremena rada. Generalno, ova tehnologija omogućila bi skeniranje velikog područja unutar pogona s mjesta instalacije, čime bi se postigla odlična pokrivenost promatranog prostora i procesa. LIDAR tehnologija bi za potrebe i ciljeve ovog rada možda bio preskupa i prenapredna tehnologija, međutim ukoliko financijska sredstva to dozvoljavaju svakako ga se može uzeti u obzir kao jednu od opcija.



Slika 17. Upotreba LIDAR sustava za detekciju ljudi [30]

### 6.6. Sustav snimanja pokreta za studij repetitivnih ljudskih pokreta u proizvodnji [31]

Snimanje pokreta (eng. MoCap) je proces snimanja pokreta u realnom vremenu te njihovo prevođenje u korisne matematičke signale. U ovdje priloženom radu dan je fokus na studij pokreta i analizu vremena ponavljajućih pokreta zaposlenika u proizvodnji. Primjeri promatranih radnji su korištenje pištolja za ljepilo na montažnoj liniji automobila i dizanje kutija u distributivnom centru. Ovaj priloženi rad opisuje metodu koja omogućava autorima rada da provedu studij rada i pokreta kroz kontinuirano prikupljanje repetitivnih pokreta, segmentiranje vremenskih serija podataka o pokretima, analiziranje tih segmenata i primjenjivanje analitičkih tehnika u otkrivanju uzorka. Dakle, predloženi sistem prikuplja, pohranjuje i analizira podatke. Sastoji se od tri nezavisna modula: modul MoCap okruženja i prikupljanja podataka, to jest snimanja pokreta, modul pohrane i procesuiranja podataka te modula za analizu podataka. Organizacija sistema uključuje korištenje optičke opreme za snimanje pokreta, pročišćavanje podataka, njihovu transformaciju, upravljanje bazama podataka i korištenje dostupnih analitičkih alata za analizu prikupljenih podataka.



Slika 18. Sustav za praćenje pokreta [32]



Slika 19. Qualisys oqus infracrvena kamera [33]

Ovi sustavi pružaju vrlo precizne trodimenzionalne podatke o kretanju. Oslanjaju se na više kamera za praćenje markera koji se postavljaju na tijelo ispitanika. Višestruke dvodimenzionalne slike radnog volumena procjenjuju lokaciju svakog markera. Podaci prikupljeni u ovoj demonstraciji kretanja pištolja za ljepilo uključuju osam markera postavljenih na radnika kako bi se pratilo kretanje ramena, laktova, zapešća i šaka. Svaki marker se prati i generira koordinate lokacije u trodimenzionalnom prostoru, jednom svake stotinke sekunde. Okruženje se sastoji od osam infracrvenih (IR) kamera Qualisys Oqus i jedne video kamere Opus 210c. Kamere su postavljene na način da je svaki marker dok je u radnom prostoru uvijek vidljiv sa minimalno tri kamere. Svih osam kamera povezano je s MoCap manager radnom stanicom gdje se podaci o kretanju prikupljaju i pretprocesiraju. Fiziološke podatke kao što su otkucaji srca, ventilacija i brzina disanja prikuplja Hexoskin sustav svake sekunde. Podaci o karakteristikama radnika, kao što su dob i spol, prikupljaju se korištenjem ankete kao dijela procesa davanja pristanka radnika prije sudjelovanja u eksperimentu.



Slika 20. Hexoskin prsluk za praćenje fizioloških podataka [34]

### 6.6.1. Eksperiment izvođenja gibanja na traci

Koristeći radnu ploču, radnik je dobio upute da pomakne predmet, koristeći svoju desnu ruku, kako bi pomaknuo predmet s određene točke na lijevoj strani ploče na određenu točku na desnoj strani ploče. Ovaj pokret bi se ponavljao više puta, kao što bi radnik radio u realnim uvjetima kada bi nanosio ljepilo na dijelove koji mu dolaze u slijedu, ravnomjernim tempom u rasporedu pokretne trake. Fizičke pokrete radnika uhvatio je MoCap sustav. Osim toga, radnik je bio opremljen Hexoskin prslukom što je omogućilo istovremeno prikupljanje fizioloških podataka. Nakon što su podaci prikupljeni, podatkovne datoteke proslijeđene su sljedećem modulu. U sljedećem modulu podaci su pregledani i provjereni za potpunost i točnost. Pogrešni ili lažni markeri su uklonjeni, a praznine su ispravljene. Nakon što su podaci potvrđeni, obrađeni su za segmentaciju. Nakon što su definirani segmenti gibanja i određen je osnovni segment, ostali su segmenti gibanja poravnati s osnovnim segmentom radi usporedbe i analiza. Budući da su ti segmenti gibanja višedimenzionalne vremenske serije nejednakih duljina, DTW se koristi za njihovo poravnanje prije obavljanja bilo kakve analize. DTW (dynamic time warping - dinamičko ispravljanje vremena – u daljnjem tekstu DTW) je algoritam dinamičkog programiranja koji se primjenjuje na dvije serije vremena za izračunavanje DTW udaljenosti za procjenu stupnja različitosti među njima. U nastavku postoje dvije temeljne pretpostavke:

(1) SPC - statistička kontrola procesa, u daljnjem tekstu SPC (eng. statistical process control) može biti prikladan alat za otkrivanje obrazaca i odstupanja od tih obrazaca.

(2) Analiza clustera će grupirati segmente pokreta koji su izvedeni na sličan način.

Namjera je studije pokazati da se ove dvije pretpostavke međusobno nadopunjuju u analizi podataka o kretanju. Obje su pretpostavke operacionalizirane pomoću DTW udaljenosti. DTW udaljenost se koristi za karakterizaciju različitosti između pokreta, za identifikaciju ekstrema i obrazaca ponašanja te grupiranja sličnih pokreta. DTW udaljenost se također koristi kao mjera varijabilnosti između segmenata za implementaciju SPC-a. SPC je prikladan za pronalaženje statistički značajnih odstupanja od slučajne varijacije. U ovoj studiji statistička kontrola procesa se primjenjuje za otkrivanje različitih uzoraka na temelju razlika u segmentima kretanja. U eksperimentu je temeljna pretpostavka da se izvođenje ponavljajućih pokreta na početku eksperimenta razlikuje od izvođenja na kraju eksperimenta, zbog čimbenika kao što su umor ili učenje radnog procesa.

Izvođenje istraživanja sastoji se od tri eksperimenta: u prvom dijelu se ustanove vremenska odstupanja u obavljanju procesa s obzirom na umor radnika (eksperiment na pokretnoj traci), u drugom se mjere vremena izvođenja složenijeg radnog procesa (drugi eksperiment) te konačno, fiziološke promjene radnika u izvođenju težeg radnog procesa poput dizanja kutija (treći eksperiment). Nakon što se dobiju različiti rezultati mjerenja može se odrediti osnovno kretanje potrebno za analizu podataka. Uz pretpostavku da se radnici kreću drugačije na početku procesa u odnosu na kraj procesa, moglo bi se očekivati veće DTW udaljenosti između početnih segmenata i završnih segmenata gibanja.

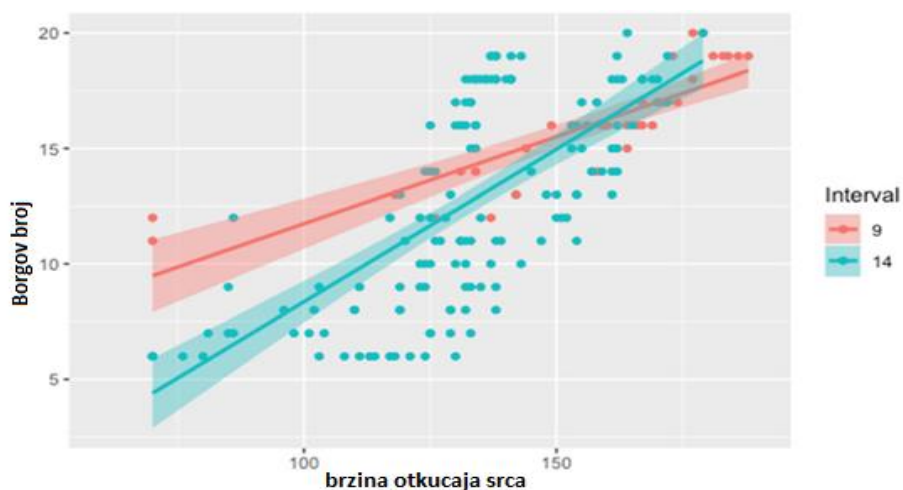
### **6.6.2. Eksperiment segmentacije pokreta**

Drugi eksperiment uključuje složenije kretanje. Radnik lijevom rukom uzima dio iz dozatora, prebacuje ga u desnu ruku i odlaže u kantu. Sveukupno kretanje ruku opisuje oblik V preko tijela radnika. Ovaj pokret je segmentiran u pokret spuštanja lijeve ruke i pokret podizanja desne ruke. Zabilježena su ukupno 73 segmenta s prosječnim trajanjem od 4,8 s svaki i standardnom devijacijom od 0,73 s.

### **6.6.3. Eksperiment dizanja tereta**

U zadnjem eksperimentu, skupina od jedanaest muških radnika izvodila je pokuse dizanja pokazujući potencijal otkrivanja odstupanja od osnovnih pokreta, kao i otkrivanje fizioloških

obrazaca povezanih s naporom i umorom. Eksperiment dizanja osmišljen je za prikupljanje podataka o kretanju i fiziološkim podataka. Za ovaj eksperiment, svaki subjekt je podigao kutiju određene težine (kg), zadanim tempom (sekunde po dizanju) na određenu visinu (cm od tla). Ovi standardi za težinu, visinu, tempo i spol određeni su unaprijed. Fiziološki podaci prikupljeni su od radnika svake sekunde i uključuju brzinu disanja (udisaji u minuti, BPM), broj otkucaja srca (pulsacije u minuti) i Borgov broj (jednom u minuti). Borgova ljestvica koristi se kako bi radnici sami prijavili razinu napora svake minute na ljestvici od 6 do 20, gdje je 6 najmanja količina napora, a 20 maksimalna količina napora. Svaki eksperiment traje dok radnik ne objavi da ne može nastaviti zbog umora. Praćenje otkucaja srca i Borgove ljestvice omogućuje promatračima proučavanje ponašanja umora. Slika 21. prikazuje povezanost između Borgovog broja i tempa aktivnosti dizanja utega. Za fiksnu visinu, na četiri pokusa, sporijim tempom i manjom težinom (tj. interval od 14 s, težina 22 kg), čini se da prosječni Borgov broj raste brže nego za pokus koji se provodi bržim tempom i većom težinom (tj. interval od 9 s, težina 23 kg). Promjena brzine otkucaja srca i Borgovog broja kroz vrijeme pokazatelj je umora. Relativno kraće trajanje izvođenja aktivnosti, strmiji porast otkucaja srca s bržim tempom zajedno s podizanjem težeg tereta elementi su koji upućuju na brže pojavljivanje umora kod radnika.



Slika 21. Odnos Borgovog broja sa otkucajima srca [31]

Kao što je prikazano u tri dijela istraživanja, ova metoda omogućava sustavno i strukturirano prikupljanje podataka. Identificiranje temeljnih ponavljajućih pokreta unutar složenijeg proizvodnog procesa uz pridružene fiziološke podatke pruža mogućnost izolacije i segmentacije tih pokreta radi detaljnijeg pregleda i daljnjih analiza. Navedeni primjeri pokazuju integraciju alata kao što su SPC, clusteriranje i usklađivanje vremenskih serija korištenjem DTW-a za statističku detekciju pokreta koji odstupaju od osnovnih pokreta. Primjena metode na ponavljajuće ljudske aktivnosti unutar tvorničkog okruženja omogućit će poboljšanu obuku, ranu identifikaciju umora ili ozljede radnika što će rezultirati poboljšanjima u sigurnosti radnika i smanjenju zastoja. Buduća istraživanja prema navodima autora priloženog rada bit će usmjerena na proširenje metode kako bi uključila korištenje aplikacija virtualne i proširene stvarnosti u analitičke svrhe i svrhe obuke.

### **6.7. Primjena neuronske mreže [35]**

Upotreba neuronskih mreža je vrlo raširena u područjima dubokog učenja i strojnog vida, međutim na području studija rada i analize vremena njena primjena još nije u tolikom zamahu. Razvoj ove tehnologije može biti vrlo koristan u području studija rada, budući da se može pratiti radnikovo psihičko i fizičko stanje u realnom vremenu. U daljnjem odlomku dat će se pregled i detalji istraživanja koje je provedeno u svrhu poboljšavanja odnosa čovjek – robot, a temeljilo se na neuronskoj mreži koja prepoznaje ljudske emocije na temelju ekspresija lica. Istraživanje je provedeno na Fakultetu strojarstva, energetike i upravljanja na Sveučilištu u Kalabriji u Italiji. Ciljevi i provedba tog istraživanja vrlo su slični ciljevima ovog završnog rada. Teži se tome da se prepoznaju osjećaji radnika tako da se dobije uvid u to koje operacije radnik obavlja lakoćom, što mu predstavlja problem i nije jednostavno rješivo, nakon koliko vremena rada postaje umoran ili kakve operacije dovode do zamora jer su monotone. Može se pratiti također obavlja li radnik posao zadovoljno i sretno ili je nezadovoljan svojim radnim mjestom.

Prepoznavanje ljudskog emocionalnog stanja naširoko je istraženo u polju interakcije čovjek-robot, međutim praktična implementacija tehnologije u stvarnom vremenu tijekom zajedničkog odrađivanja operacija još uvijek nailazi na razne složenosti koje otežavaju provođenje takve tehnologije. Unatoč tome što tehnike računalnog vida nalaze različite primjene u industriji i proizvodnim sektorima poput vizualne kontrole opreme, analize procesa, identifikacije dijelova, istraživanje algoritama i uvjeta za točno prepoznavanje izraza lica i dalje predstavljaju mnoge



izazove i otvorena pitanja, posebice kada je u pitanju detekcija u stvarnom vremenu. Pozivajući se na izraza lica, većina dostupnih članaka o ovoj temi temelji se na dvije glavne teorije emocija:

- Ekman i Friesenovu teoriju prema kojoj se svaki izraz lica može pratiti od jedne do 6 glavnih emocija (bijes, gađenje, strah, sreća, tuga i iznenađenje) i neutralnost kojoj su sekundarne emocije (zabava, gađenje, zadovoljstvo, neugoda, uzbuđenje, krivnja, sram, olakšanje, zadovoljstvo, zadovoljstvo i sram) kasnije dodane.
- Russellova teorija prema kojoj se sve emocije mogu oporaviti korištenjem dviju glavnih koordinata, naime „valencije” koji daje pozitivnu ili negativnu indikaciju emocionalnog stanja, te "uzbuđenje" koje ukazuje na intenzitet osjećaja.

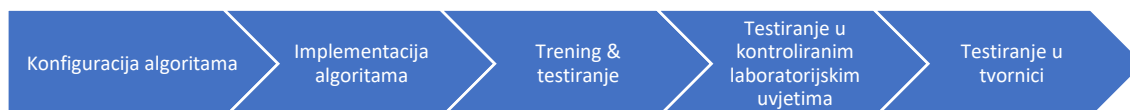
Rusellova teorija je teža za korištenje zbog složenijeg računanja što je posljedica velikog broja emocija koje prepoznaje. Zamjerka modelu kao što je Ekmanov i Friesenov je što je vrlo limitirajuće svesti sve izraze lica na samo nekoliko emocija.

Metode umjetne inteligencije – u daljnjem tekstu AI (eng. artificial intelligence) za prepoznavanje izraza lica napravile su velik napredak u posljednjih nekoliko desetljeća. Na primjer, duboko učenje i umjetne neuronske mreže – u daljnjem tekstu ANN (eng. artificial neural network) razlikuju se od već postojećih algoritama za njihovu sposobnost obavljanja složenijih zadataka s nestrukturiranim podacima čak i ako oni zahtijevaju puno veće skupove podataka za obuku. U području klasifikacije slika, konvolucijske neuronske mreže – u daljnjem tekstu CNN (eng. convolutional neural network) su među najčešće korištenim algoritmima i razlikuju se od ANN-a po prisutnosti posljednjeg sloja – potpuno povezanog – u kojem su svi neuroni povezani jedni s drugima. To je dakle algoritam koji uzima sliku kao ulaz i dodjeljuje težine i pristranosti različitim aspektima slika. Ova vrsta mreže može ispravno steći prostorne i vremenske ovisnosti primjenom filtera, koji se nazivaju i kerneli.

Kernel se pomiče slijeva nadesno i odozdo prema gore sa zadanom vrijednošću koraka sve dok se cijela slika ispituje, s ciljem izdvajanja značajki visoke razine.

Provođenje ovog eksperimenta podijeljeno je u pet faza. U prvoj i drugoj fazi odrađivalo se konfiguriranje algoritama i njihova implementacija u TensorFlow koristeći Google Colaboratory koji omogućava pisanje i izmjenu Python koda u internetskom pregledniku. Istovremeno, prilagođena je većina slika te su pretvorene u crno bijele tonove. U trećoj fazi vršilo se testiranje i trening algoritama sa prikupljenim skupovima podataka. U četvrtoj fazi odabrani su najtočniji

algoritmi te je sprovedeno ispitivanje u stvarnom, ali kontroliranom okruženju. Radni proces koji se razmatrao bio je i rad u uredu i laboratorijski rad, kada su ispitanici radili na alatnim strojevima. Cilj ove faze je razumjeti koji je najtočniji algoritam i predvidjeti preduvjete i potencijalne izazove procesa snimanja fotografija lica u stvarnom industrijskom okruženju prije testiranja u realnom okruženju u pravoj tvornici. U završnoj, petoj fazi, testira se najtočniji algoritam u realnoj tvornici u realnim uvjetima kako bi se ispitalo može li neuronska mreža odgovoriti zahtjevima realnog industrijskog okruženja ili se može koristiti samo kao zapažanje za buduće radnje u tvornici, čime se ističu ograničenja i izazovi za moguću široku primjenu.



Slika 22. Redoslijed provođenja istraživanja

U kontroliranim laboratorijskim uvjetima najbolje je rezultate pokazao DeepFace algoritam. U kontroliranim uvjetima uspješnost je bila 39 %, dok je u realnim uvjetima u tvornici, također najbolji algoritam DeepFace ostvario uspješnost od 26,6 %. Algoritam se temelji na dubokoj neuronskoj mreži i uključuje analitičko modeliranje lica u 3D na temelju referentnih točaka. Mreža se sastoji od dva sloja konvolucije međusobno razmaknute slojem maksimalnog udruživanja čiji je zadatak učiniti izlaz prvog sloja konvolucije snažnijim za lokalne transakcije.

Većina neispravno prepoznatih emocija DeepFace algoritma ipak spada u sličnu skupinu sa ispravnim emocijama radnika. Primjerice, ukoliko lice nije savršeno ispred kamere, DeepFace je zamijenio neutralnu emociju sa ljutnom, tugom ili strahom što može biti indikator da je operater vrlo usredotočen na posao koji obavlja i stoga nisu dovoljni opušteni da bi emocija koju pokazuju bila sreća. Ova indikacija može biti vrlo korisna za prepoznavanja je li na primjer operater u problemu prilikom izvršenja operacije zavarivanja. Trenutna točnost algoritma u stvarnom eksperimentalnom postavu (1 točna fotografija od 6) još uvijek naglašava problem s trenutno najsvremenijom tehnologijom. Na temelju provođenja eksperimenata u kontroliranom

laboratorijskom okruženju i u stvarnim tvorničkim uvjetima identificirani su izazovi koje tek treba riješiti kako bi se ova tehnologija mogla u potpunosti primijeniti u praksi. Dijelovi ove tehnologije koje zahtijevanju daljnji razvitak su:

- Kut lica : ukoliko cijeli izraz lica nije vidljiv na slici, prepoznavanje je vrlo često krivo. To je problem budući da su radnici stalno u pokretu i nisu uvijek točno ispred kamere, međutim čak ako kamera i djelomično uhvati izraz lica, pogodit će približno točnu emociju.
- Osvjetljenje u pogonu može utjecati na točnost rada kamere pa time i na prepoznavanje emocije sa slike ovisno o svjetljini same slike.
- Pozadinsko okruženje.
- Nošenje zaštitne opreme koje otežava prepoznavanje ekspresija lica iz razloga što je lica možda djelomično prikriveno ili je samo teže raspoznati ekspresiju lica sa slike.

Kao rješenje za navedene probleme koji se javljaju pri implementaciji ove vrste tehnologije nameće se primjena ove neuronske mreže u kombinaciji sa još nekim tehnološkim sustavom. U tu svrhu mogao bi se upotrijebiti primjerice uređaj koji mjeri brzinu otkucaja srca kako bi se dobio jasniji podatak o stanju radnika. Također, kao rješenje se može primijeniti i audio- jezično prepoznavanje u kombinaciji sa ovim vizualnim prepoznavanjem, međutim takav sustav nebi bio primjenjiv u industrijskim pogonima sa višom razinom buke. Prilikom uključivanja više tehnologija u razvoj interaktivnog sučelja stroja i radnika treba obratiti pozornost da se radnik ne preoptereći kako bi svoj posao mogao i dalje nesmetano i koncentrirano obavljati. Osim toga, veliko ograničenje za primjenu ove vrste algoritama u industriji je mali raspon prepoznatljivih emocija koje radnik obično pokazuje pored robota ili stroja. Neutralnost je emocija koju radnik najčešće ponavlja tijekom izvršavanja zadatka, dok bi do izraza iznenađenja ili straha došlo u slučaju neočekivanih događaja (npr. proizvod se lomi tijekom procesa strojne obrade).

U primjeni ovog istraživanja u području studija rada može se izdvojiti važnost samog prepoznavanja emocija. Daljni razvoj ove neuronske mreže u području studija rada mogao bi biti nešto lakši za provedbu u odnosu na sustav čovjek- robot, budući da bi potrebe implementacije zadovoljila i nešto grublja podjela emocija. Za područje studija rada napredak bi već bio ukoliko bi se mogao jasno prepoznati radnikov umor ili emocije poput zatečenosti, odnosno iznenađenosti ili jasne i jake usredotočenosti. Na temelju rezultata neuronske mreže dobiva se uvid u težinu operacija koje se obavljaju na određenom radnom mjestu, ali i radnikova sposobnost nošenja sa

izazovima koji se mogu pojaviti u proizvodnom pogonu. Rezultati bi se mogli koristiti za validaciju radnikova rada ili primjerice za rotaciju radnika u pogonu kako bi svi jednoliko obavljali i one složenije operacije i one jednostavnije.

## 7. ZAKLJUČAK

Implementacija metoda Industrije 4.0 donosi brojne promjene i poboljšanja u proizvodni proces. Čovjek će raditi intelektualno zahtjevnije poslove, a prednost je što će ga strojevi i roboti moći zamijeniti u monotonim i zamornim poslovima te onim koji iziskuju povećanu fizičku aktivnost ili dulje zadržavanje u nepovoljnim radnim uvjetima. Uz to, Industrija 4.0 može uvelike doprinjeti na povećanju proizvodnosti, smanjenju gubitaka te proizvodnji koja je okrenuta kupcu. Svaki kupac može birati kakav proizvod želi kupiti, a proizvodne linije moraju biti dovoljno fleksibilne i brze da su u mogućnosti to proizvesti u realnom vremenu. Kao glavni problem daljnjeg razvitka i širenja Industrije 4.0 nameće se sigurnost. Koliko god digitalizacija te potpuno umrežavanje između dobavljača, proizvođača i kupaca, ali i unutar samog proizvodnog pogona pridonosi na boljitku, toliko se otvara prostor za razne napade i činjenje štete. Potrebno je uz modernizaciju razvijati i sustave za obranu od primjerice hakerskih napada koji mogu prouzročiti mnoštvo štete u samim poduzećima. Daljnje proširenje Industrije 4.0 uvelike ovisi o potrebnom osiguravanju sigurnosti takvog sustava te njegovom nesmetanom radu. Osim toga, drugi problematični faktor je mogućnost dovođenja koncepata Industrije 4.0 do onih najmanjih proizvodnih sustava. Pitanje je u kojoj mjeri je moguće uvesti ovako moderne koncepte proizvodnje u mala poduzeća te koliko su ona spremna ulagati kako bi pratila korak sa ostatkom konkurencije. Za očekivati je da će se morati prilagoditi, jer inače neće biti u mogućnosti isporučivati usluge jednake kvalitete. U ovom radu dan je pregled sredstava koji mogu uvelike pomoći u području studija rada i analize vremena, a neki od njih ne iziskuju prevelika ulaganja. Navedeni senzori, neuronska mreža ili kamere u mogućnosti su davati informacije o radnicima i radu u realnom vremenu. Na temelju tih podataka moguće je doći do bitnih zaključaka na temelju kojih se može povećati proizvodnost poduzeća, smanjiti težak i nepotreban čovjekov rad i povećati zadovoljstvo svih uključenih u proizvodni proces.

Područje studija rada i analize vremena ima svoje mjesto u proizvodnom procesu. U velikim poduzećima tome se pridaje velika pažnja i posvećuje dovoljno vremena. Važno je da i manja poduzeća shvate mogućnosti koje ovo područje pruža. Studij rada i analiza vremena uvelike pomaže u planiranju i projektiranju proizvodnje te olakšavaju izradu planova. Ulaganjem truda i rada na implementaciji studija rada i analize vremena u svojim poduzećima mogli bi se postići bolji rezultati proizvodnosti te povećati zadovoljstvo zaposlenika, stoga je bitno educirati sve zaposlene u industriji o mogućnostima koje se pružaju. Samo konstantnom edukacijom zaposlenika i ulaganjima u modernizaciju opreme može se biti konkurentan na tržištu.

## LITERATURA

- [1] Taboršak, D.: Studij rada, Orgadata, Zagreb, 1994.
- [2] [https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/DTM\\_Industrie%204.0\\_DE.pdf](https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/DTM_Industrie%204.0_DE.pdf), pristupljeno 07.09.2022.
- [3] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi and M. Mustaqim, "Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022-23040, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118., pristupljeno 19.07.2022.
- [4] <https://www.micro.ai/blog/best-examples-of-iot>, pristupljeno 24.07.2022.
- [5] Industry 4.0, <https://www.emnify.com/blog/industry-4-0>., pristupljeno travanj, 2022.
- [6] IaaS vs PaaS vs SaaS, [https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/iaas-vs-paas-vssaas?sc\\_cid=7013a000002pgRcAAI&gclid=Cj0KCQjwmuITBhDoARIsAPiv6L\\_UyGL5mb1UHqNNg19JSXBE8lw9u8mXwo0Y6wDk9QuAp6RGle381gaAiCzEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://www.redhat.com/en/topics/cloud-computing/iaas-vs-paas-vssaas?sc_cid=7013a000002pgRcAAI&gclid=Cj0KCQjwmuITBhDoARIsAPiv6L_UyGL5mb1UHqNNg19JSXBE8lw9u8mXwo0Y6wDk9QuAp6RGle381gaAiCzEALw_wcB&gclsrc=aw.ds), pristupljeno 20.05.2022.
- [7] Gizem Erboz: How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0, [https://www.researchgate.net/publication/326557388\\_How\\_To\\_Define\\_Industry\\_40\\_Main\\_Pillars\\_Of\\_Industry\\_40](https://www.researchgate.net/publication/326557388_How_To_Define_Industry_40_Main_Pillars_Of_Industry_40), pristupljeno travanj 2022.
- [8] SimData, <https://www.createasoft.com/Products/Time-and-Motion-Studies-Software>, pristupljeno 20.06.2022.
- [9] OTRS, <https://shinkamanagement.com/time-study-software/>, pristupljeno 20.06.2022.
- [10] UMT, <https://laubrass.com/solutions/umt-plus/>, pristupljeno 21.06.2022.
- [11] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Senzori>, pristupljeno 25.06.2022.
- [12] Types of Distance Sensors and How to Select One?, <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/23/distance-sensors-types-and-selection-guide/>, pristupljeno 01.08.2022.
- [13] <https://www.terabee.com/a-brief-introduction-to-time-of-flight-sensing-part-1-the-basics/>, pristupljeno 01.08.2022.

- [14] Time-of-flight camera, [https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight\\_camera](https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera), pristupljeno 10.07.2022.
- [15] <https://www.terabee.com/shop/3d-tof-cameras/terabee-3dcam/>, pristupljeno 28.07.2022.
- [16] <https://velodynelidar.com/what-is-lidar/>, pristupljeno 14.07.2022.
- [17] <https://e.sentech.nl/nieuws/onthullende-wetenschap-achter-lidar-technologie/> pristupljeno 29.07.2022.
- [18] Crnčec, L. 2019. Senzori stepenica za KOPACK vozilo. Završni rad. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb., pristupljeno 12.07.2022.
- [19] <https://core-electronics.com.au/lidar-lite-v3hp.html>, pristupljeno 15.07.2022.
- [20] What is a Beacon? The Complete Guide to Bluetooth Beacons, <https://kontakt.io/what-is-a-beacon/>, pristupljeno 16.07.2022.
- [21] <https://elainnovation.com/en/catalogue/blue-coin-id-en/> pristupljeno 29.07.2022.
- [22] Baričić, L. 2020. Određivanje frekvencijskih karakteristika ispitanih uzoraka. Završni rad. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.
- [23] Piezoelektrični efekt, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Piezoelektri%C4%8Dni\\_efekt](https://hr.wikipedia.org/wiki/Piezoelektri%C4%8Dni_efekt), pristupljeno 17.07.2022.
- [24] <https://www.ifm.com/de/en/shared/product-news/2020/hmi/x-y-and-z-axis-sensor-detects-acceleration-in-three-dimensions>, pristupljeno 27.07.2022.
- [25] Light Sensors, [https://www.electronics-tutorials.ws/io/io\\_4.html](https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_4.html), pristupljeno 16.07.2022.
- [26] <https://www.electronicaembajadores.com/en/Productos/Detalle/SSLDR34/sensors/color-light-sensors/lldr-resistance-5-x-4-mm-light-sensor>, pristupljeno 28.07.2022.
- [27] <https://www.mfgnewsweb.com/archives/4/56023/Current-News-jan20/CNC-Sensor-Monitoring-System-Offers-Expanded-Applications.aspx>, pristupljeno 20.07.2022.
- [28] <https://kontakt.io/blog/how-beacon-wayfinding-is-changing-indoor-navigation/>, pristupljeno 18.07.2022.
- [29] <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2016/02/86548/>, pristupljeno 28.07.2022.

[30] [http://www.cogsys.cs.uni-tuebingen.de/forschung/terminiert/persondetection/welcome\\_e.html](http://www.cogsys.cs.uni-tuebingen.de/forschung/terminiert/persondetection/welcome_e.html), pristupljeno 01.08.2022.

[31] Wierschem, D.C., Jimenez, J.A. & Méndez Mediavilla, F.A. : A motion capture system for the study of human manufacturing repetitive motions. *Int J Adv Manuf Technol* 110, 813–827 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05822-9>, pristupljeno 23.07.2022.

[32] [https://www.ntnu.edu/documents/221360533/1261844700/Qualysis\\_Oqus\\_QTM\\_brief2014.pdf/aab4b882-43ac-4524-818a-9e853df7479e](https://www.ntnu.edu/documents/221360533/1261844700/Qualysis_Oqus_QTM_brief2014.pdf/aab4b882-43ac-4524-818a-9e853df7479e), pristupljeno 29.07.2022.

[33] <https://www.qualisys.com/cameras/5-6-7/>, pristupljeno 29.07.2022.

[34] <https://geekbeat.tv/hexoskin-brings-biometric-smart-shirt-market/>, pristupljeno 29.07.2022.

[35] Alessandro Chiurco, Jessica Frangella, Francesco Longo, Letizia Nicoletti, Antonio Padovano, Vittorio Solina, Giovanni Mirabelli, Claudia Citraro: Real-time Detection of Worker's Emotions for Advanced Human-Robot Interaction during Collaborative Tasks in Smart Factories, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050922003970#section-cited-by>, pristupljeno 26.07.2022.