

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

SEMINAR

**Sustavi za upravljanje
heterogenom flotom ljudi i robota
u logističkim centrima**

Herman Zvonimir Došilović

Voditelj: prof. dr. sc. Domagoj Jakobović

Zagreb, svibanj 2019.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Formalan opis problema	3
2.1. Definicija heterogene flote i skladišta	5
2.2. Definicija artikala i narudžbe	6
2.3. Opis stanja skladišta	6
2.4. Ulazni podaci	8
2.5. Očekivani izlazni podaci	8
2.6. Ocjena kvalitete	8
3. Raspoređivanje	9
4. Zaključak	10
5. Literatura	11

1. Uvod

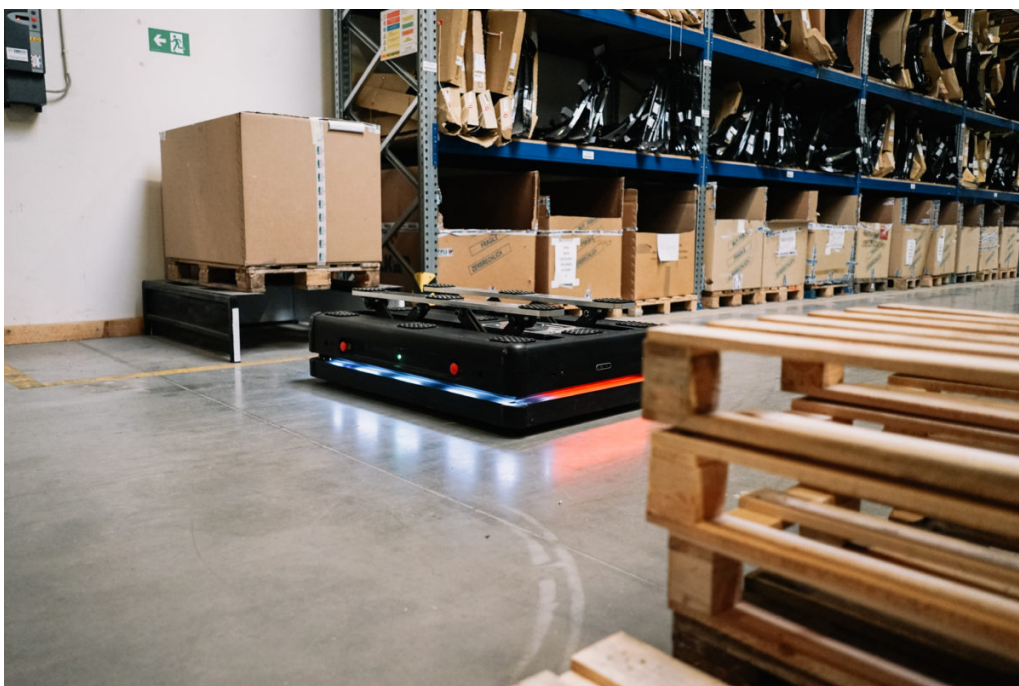
Logistički centri su dinamički i stohastički logistički sustavi čija je temeljna zadaća prostornovremenska transformacija dobara koja se odvija u procesima: (1) transporta, pregrupiranja i skladištenja gdje su bitni procesi tokova dobara; (2) pakiranja i signiranja gdje su bitni procesi pomaganja tokovima dobara; (3) dostavljanja i obrada naloga gdje su bitni procesi tijekova informacija (Paladin, 2013; Buntak et al., 2012).

Razvojem informacijskih tehnologija elektroničko trgovanje (engl. *ecommerce*) posljednjih je godina doživjelo veliki zamah u razvoju i poslovanju. Međutim, sa sve većim brojem narudžbi, logistički procesi elektroničkog trgovanja postaju usko grlo za ispunjenje narudžbi i njihovih rokova. Također, logistički procesi mogu uzrokovati probleme poput sporih, neispravnih, izgubljenih, oštećenih i pogrešnih isporuka. Pored toga, cijena logističkog procesa može iznositi i do 40% cijene korisnikove narudžbe. Automatizacija logističkih procesa nudi poboljšanja učinkovitosti, smanjenje troškova i smanjenje vremena posluživanja. Međutim, velika raznolikost i promjenljivost narudžbi čini implementaciju automatizacije teškom. U obzir treba uzeti ne samo tip i količinu neke naručene robe, nego i njihovu veličinu, njihov oblik, masu, pa čak i svojstva i posebnosti pakiranja. Također, jednom uspostavljeni automatizirani proces mora se moći lako prilagoditi raznim promjenama u logističkom centru. To znači da se automatizirani sustavi moraju lako skalirati i da moraju biti fleksibilni u svakom trenutku. Kada govorimo o automatizaciji logističkih procesa elektroničkih trgovina, onda razlikujemo automatizaciju protoka informacija i automatizaciju protoka robe. Robotika nudi rješenje u automatiziranju protoka robe i roboti danas uspješno ostvaruju zadatke koji se ponavljaju na fiksnim pozicijama sa željenom brzinom, preciznosti i tereta. Robotika, također, nudi rješenje koje će poboljšati učinkovitost, skalabilnost i fleksibilnost logističkih procesa. Mobilni roboti omogućuju automatizirano izvršavanje zadataka na pozicijama koje nisu više fiksne, međutim, tada je potrebno uskladiti suradnju između robota i ljudi (Huang et al., 2015).

Ovaj seminarski rad predstaviti će i definirati će jedan stvarni problem koji se pojavljuje uvođenjem mobilnih i autonomnih robota u logističke centre kako bi se optimirala jedna faza logističkog procesa koja uključuje prikupljanje artikala narudžbe, a odnosi se na upravljanje heterogenom flotom ljudi i robota. Osim toga, napraviti će se pregled područja i metoda koje rješavaju sličan problem.

2. Formalan opis problema

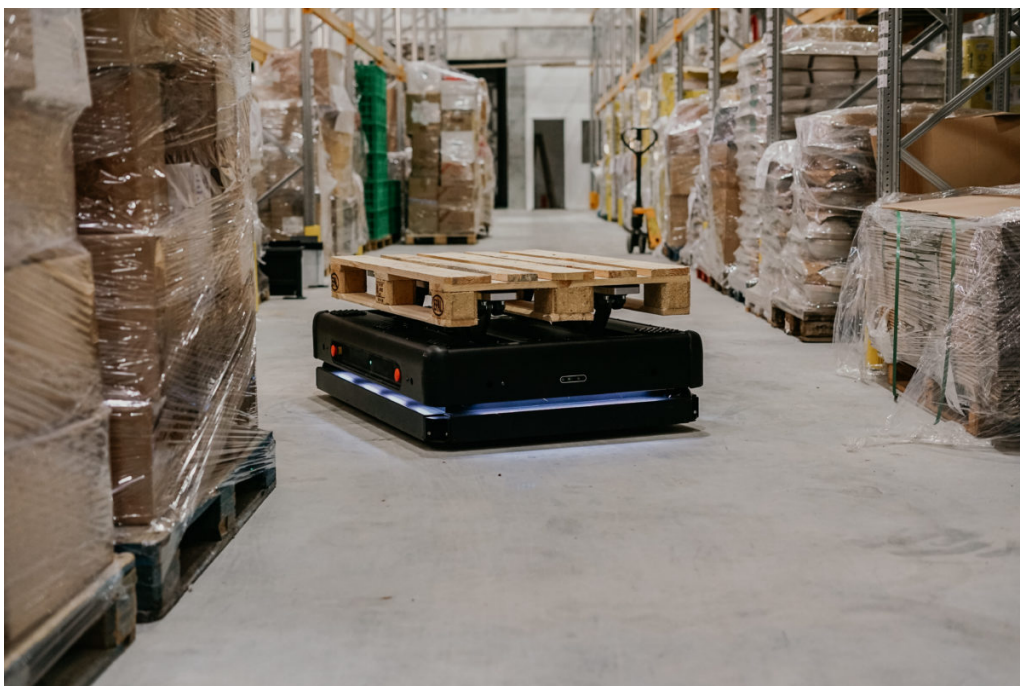
Heterogena flota ljudi i robota djeluje u skladištu logističkog centra i sastoji se od ljudi i autonomnih mobilnih robota (engl. *Autonomous Mobile Robots*) koji se mogu samostalno kretati i izbjegavati prepreke u dinamičnom okruženju. Roboti također mogu preuzimati i odlagati teret na posebne paletne pozicije koje paletu odvajaju od tla kako bi robot mogao spustiti odnosno podignuti paletu. Slika 2.1 prikazuje primjer takvog robota hrvatske tvrtke Gideon Brothers. Na slici 2.1 je također prikazana paletna pozicija na kojoj se nalazi paleta s teretom.



Slika 2.1: Autonomni mobilni robot hrvatske tvrtke Gideon Brothers (Gideon Brothers, 2019a).

U sustav za upravljanje heterogenom flotom ljudi i robota (u daljnjem tekstu: *Sustav*) narudžbe dolaze stohastički iz sustava za upravljanje skladištem (engl. *Warehouse Management System*). Svaka narudžba sadrži više artikala i za svaki artikl poznata je njegova lokacija u skladištu. Sustav *WMS* također određuje kojim redoslijedom je potrebno prikupiti artikle kako bi se narudžba izvršila.

Na početku svoga rada, robot odlazi do jedne od pozicija za preuzimanje praznih paleta. Nakon što je preuzeo praznu paletu (slika 2.2), robot može započeti prikupljanje artikala (unaprijed određenim redoslijedom) samo jedne narudžbe. Kada robot dođe do pozicije na kojoj se nalazi artikl, čovjek stavlja taj artikl na robota. Ljudi poslužuju robote, a roboti izvršavaju narudžbe. Jedan čovjek može posluživati više robota, međutim, ne istovremeno. Kada je prikupio sve artikle koji pripadaju narudžbi, robot odlazi do jedne od pozicija za odlaganje punih paleta i tamo odlaže paletu. Nakon odlaganja pune palete, smatra se da je robot izvršio narudžbu i da je spreman za izvršavanje nove nakon što ponovo preuzme praznu paletu na jednoj od za to predviđenih pozicija.



Slika 2.2: Robot s praznom paletom, koji može započeti izvršavati narudžbu. (Gideon Brothers, 2019b)

Prvi zadatak sustava je da odredi koji robot će izvršiti koju narudžbu. Drugi zadatak sustava je da odredi koji čovjek će poslužiti kojeg robota i za koji artikl. Teža inačica ovog problema uključuje i određivanje redoslijeda kojim je potrebno pokupiti artikle pojedine narudžbe. Formalan opis stanja skladišta i ulaz u sustav bit će takav da će

sadržiti sve potrebne informacije kako bi se mogla riješiti i ova teža inačica problema.

2.1. Definicija heterogene flote i skladišta

Heterogena flota sastoji se od N_p ($1 \leq N_p \leq 25$) ljudi i N_r ($1 \leq N_r \leq 50$) robota, koji se mogu kretati u po skladištu širine W ($W \in \mathbb{N}$, $1 \leq W \leq 4500$) i dužine L ($L \in \mathbb{N}$, $1 \leq L \leq 4500$). Skladište se može prikazati kao skup točaka:

$$S = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq x \leq W \wedge 1 \leq y \leq L\}, \quad (2.1)$$

gdje stvarna (fizička) udaljenost između dvije susjedne horizontalne, odnosno vertikalne točke iznosi 5 cm, što znači da je maksimalna površina skladišta $\sim 5000 \text{ m}^2$.

U nastavku formalne definicije problema koristit će se sljedeće oznake:

- M_i ($0 \leq i < N_p$) - označava poziciju i-tog čovjeka,
- R_i ($0 \leq i < N_r$) - označava poziciju i-tog robota,
- $d_m(A, B)$ - označava vrijeme koje je potrebno čovjeku da od točke A dođe do točke B i obrnuto,
- $d_r(A, B)$ - označava vrijeme koje je potrebno robotu da od točke A dođe do točke B i obrnuto.

Ovakve oznake dozvoljavaju npr. označavanje vremenske udaljenosti $d_m(R_3, M_4)$ koja predstavlja vrijeme koje je potrebno čovjeku da od robota R_3 dođe do čovjeka M_4 (i obrnuto). U nastavku ovog seminara, sve spomenute udaljenosti predstavljaju vremenske udaljenosti (u sekundama) između dvije točke. Također, za udaljenosti d_m i d_r vrijedi:

$$d_m(A, B), d_r(A, B) \in \mathbb{R}_{\geq 0}. \quad (2.2)$$

Skup P ($|P| \leq 10$) označava skup svih pozicija za preuzimanje praznih paleta, a skup D ($|D| \leq 10$) označava skup svih pozicija za odlaganje punih paleta. Pretpostavlja se da roboti u bilo kojem trenutku mogu preuzeti praznu paletu s bilo koje pozicije P_i . Također, pretpostavlja se da roboti u bilo kojem trenutku mogu odložiti punu paletu na bilo koju poziciju D_i . Uz skupove P i D , oznake T_p i T_d označavaju vrijeme koje je potrebno da robot preuzme, odnosno odloži paletu s odgovarajuće pozicije.

2.2. Definicija artikala i narudžbe

Skup svih artikala I zapravo je skup svih pozicija na kojima se artikli nalaze:

$$I = \{A, A \in S\}. \quad (2.3)$$

I_i ($0 \leq i < |I|$) označava i -ti artikl u skupu I .

Narudžba O_k definirana je kao skup dvojki (i, t_i) , gdje je t_i vrijeme koje je potrebno da čovjek stavi artikl I_i na robota kada robot izvršava narudžbu O_k :

$$O_k = \{(i, t_i) \mid i \in 2^{\{0,1,\dots,|I|-1\}} \setminus \{\emptyset\}, t_i \in \mathbb{R}_{\geq 0}\}. \quad (2.4)$$

$O_{k,i}$ ($0 \leq i < |O_k|$) označava i -ti artikl u k -toj narudžbi, a $T_{k,i}$ označava vrijeme t_i za artikl $O_{k,i}$. Maksimalan broj artikala po narudžbi je 500, odnosno vrijedi $1 \leq |O_k| \leq 500$. Narudžbe u sustav dolaze stohastički i skup svih narudžbi O koje je potrebno izvršiti može teoretski rasti do beskonačnosti, međutim, sustav uzima u obzir prvih 100 narudžbi koje nisu još izvršene. Jednom kada je narudžba izvršena, ona se izbacuje iz skupa svih narudžbi O . Dakle, bez smanjenja općenitosti može se pretpostaviti da vrijedi $1 \leq |O| \leq 100$.

Nakon ovako definiranih narudžbi uvode se još dvije oznake:

- R_i^o ($R_i^o \in [-1, 0, 1, \dots, |O| - 1]$) - označava koju narudžbu robot R_i trenutno izvršava (-1 ako ne izvršava niti jednu).
- R_i^p ($R_i^p \in \{0, 1, 2\}$) - označava status palete koja se nalazi na robotu (0 ako robot ne nosi paletu, 1 ako nosi praznu paletu, 2 ako nosi paletu s teretom).

2.3. Opis stanja skladišta

Stanje skladišta može se opisati sljedećim varijablama:

- skup svih pozicija za preuzimanje praznih paleta P i odlaganje punih paleta D ,
- vrijeme T_p i T_d ,
- skup svih robota R i odgovarajućih vrijednosti R_i^o i R_i^p za svakog robota,
- skup svih ljudi M ,
- skup svih artikala I ,
- skup svih narudžbi O koje je još potrebno izvršiti,
- za svaku narudžbu, skup svih međusobnih d_r udaljenosti artikala:

$$\{d_r(I_i, I_j) \mid \forall I_i \forall I_j \in O_k\}, \forall O_k \in O \quad (2.5)$$

- skup svih udaljenosti d_r od svakog robota do svakog artikla:

$$\{d_r(R_i, I_j) \mid \forall R_i \in R, \forall I_j \in I\} \quad (2.6)$$

- skup svih udaljenosti d_r od svake pozicije za preuzimanje prazne palete do svakog artikla:

$$\{d_r(P_i, I_j) \mid \forall P_i \in P, \forall I_j \in I\} \quad (2.7)$$

- skup svih udaljenosti d_r od svake pozicije za odlaganje pune palete do svakog artikla:

$$\{d_r(D_i, I_j) \mid \forall D_i \in D, \forall I_j \in I\} \quad (2.8)$$

- skup svih udaljenosti d_r od svake pozicije za preuzimanje prazne palete do svakog robota:

$$\{d_r(P_i, R_j) \mid \forall P_i \in P, \forall R_j \in R\} \quad (2.9)$$

- skup svih udaljenosti d_r od svake pozicije za odlaganje pune palete do svakog robota:

$$\{d_r(D_i, R_j) \mid \forall D_i \in D, \forall R_j \in R\} \quad (2.10)$$

- skup svih međusobnih d_m udaljenosti artikala:

$$\{d_m(I_i, I_j) \mid \forall I_i, \forall I_j \in I\} \quad (2.11)$$

- skup svih udaljenosti d_m od svakog čovjeka do svakog artikla:

$$\{d_m(M_i, I_j) \mid \forall M_i \in M, \forall I_j \in I\} \quad (2.12)$$

Za skup svih ljudi M koji opisuju stanje skladišta može se pretpostaviti da trenutno mogu sa svoje pozicije krenuti prema artiklu za koji će biti raspoređeni nakon što je sustav donio odluku. Skup svih narudžbi O sadrži sve narudžbe koje još nisu do kraja izvršene, međutim, skup svih artikala u pojedinoj narudžbi jednak je skupu svih artikala koji još moraju biti pokupljeni. Tako se točno zna koji će idući artikl robot trebati uzeti ako je u stanju sustava naznačeno da on trenutno izvršava neku narudžbu. Međusobne udaljenosti 2.5 stanja skladišta omogućuju da se za robota izračuna ukupno vrijeme trajanja obilaska artikala za pojedinu narudžbu i proizvoljno odabran redoslijed. Udaljenosti 2.6 omogućuju da se za svakog robota koji ne izvršava neku narudžbu odredi koju iduću narudžbu bi mogao izvršiti i koji će mu biti početni artikl (teža inačica problema). Osim toga, udaljenosti 2.6 omogućuju da se robotima koji trenutno izvršavaju narudžbu promjeni redoslijed prikupljanja artikala (teža inačica problema).

2.4. Ulazni podaci

Ulazni podaci u sustav predstavljaju formatirano stanje skladišta koje je formalno opisano u prethodnom odjeljku. Očekuje se da će sustav na ulaz dobiti novo stanje skladišta nakon svake nove pristigle narudžbe, međutim, budući da narudžbe pristižu stohastički onda se ne zna niti koliko često će sustav dobivati novo stanje skladišta na temelju kojega treba donesti nove odluke. Također, moguće je da će zbog dinamičkih okruženja sustav trebati donositi nove odluke samo na temelju novih procjena udaljenosti, iako se broj narudžbi i pripadajući artikli nisu promijenili.

2.5. Očekivani izlazni podaci

Od sustava se očekuje da za svakog robota odredi narudžbe koje će izvršiti. Odluka sustava mora biti takva da svaka narudžba ima dodjeljenog robota koji će ju izvršiti. Osim toga, od sustava se očekuje da za svakog čovjeka odredi koji će artikl staviti i na kojeg robota. Odluka sustava mora biti takva da svaki artikl u svakoj narudžbi ima dodjeljenog čovjeka koji će taj artikl staviti na robota. U težoj inačici problema potrebno je odrediti i redoslijed kojim će robot prikupiti artikle neke narudžbe.

2.6. Ocjena kvalitete

Na temelju odluke sustava gradi se raspored čija kvaliteta (engl. *fitness*) je tim veća što je prosječno vrijeme izvršavanje narudžbe manje. Ako s $t_{s,i}$ označimo vrijeme početka izvršavanja narudžbe i , a s $t_{e,i}$ vrijeme završetka izvršavanja narudžbe i , onda je prosječno vrijeme izvršavanja narudžbe jednako:

$$\bar{T} = \sum_{i=0}^{|O|-1} t_{e,i} - t_{s,i}, \quad (2.13)$$

a kvaliteta rasporeda f jednaka je $f = \bar{T}^{-1}$. Cilj je pronaći takav raspored koji će minimizirati \bar{T} , odnosno maksimizirati f .

3. Raspoređivanje

4. Zaključak

5. Literatura

Krešimir Buntak, Davor Grgurević, i Ivana Droždek. Međusobni odnos logističkih i transportnih sustava. *Tehnički glasnik*, 6(2):228–232, 2012.

Gideon Brothers. Logistics robot lingo, 2019a. URL <https://www.gideonbros.ai/strategy/glossary-of-logistics-robotics>.
Pristupano: 09.05.2019.

Gideon Brothers. Poll debunks the myth of job-destroying robot, 2019b. URL <https://www.gideonbros.ai/trending/poll-debunks-the-myth-of-job-destroying-robot>.
Pristupano: 09.05.2019.

George Q Huang, Michael ZQ Chen, i Jia Pan. Robotics in ecommerce logistics. *HKIE Transactions*, 22(2):68–77, 2015.

Lorena Paladin. Logistički centri i informacijske tehnologije. Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Ekonomski fakultet u Rijeci, Ivana Filipovića 4, 51000 Rijeka, Republika Hrvatska, 2013.

Sustavi za upravljanje heterogenom flotom ljudi i robota u logističkim centrima

Sažetak

Ključne riječi: upravljanje flotom, raspoređivanje

Management systems for heterogeneous fleet of humans and robots in logistic centers

Abstract

Keywords: fleet management, scheduling