

Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki

Tone Lerher







Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki

Avtor

Tone Lerher

April 2022

Naslov <i>Title</i>	Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki <i>Automated Vehicles and Mobile Robots in Intralogistics</i>		
Avtor <i>Author</i>	Tone Lerher (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)		
Recenzija <i>Review</i>	Karl Gotlih (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)		
	Goran Đukić (Univerza v Zagrebu, Fakulteta za strojništvo in ladjardstvo)		
Jezikovni pregled <i>Language editing</i>	Nataša Belšak		
Tehnični urednik <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
Oblikovanje ovitka <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
Grafike na ovitku <i>Cover graphics</i>	AMR podjetja Swisslog za podporo procesu komisioniranja blaga h komisioarju © Adobe Stock, nakup, 2022		
Grafične priloge <i>Graphic material</i>	Avtor		
Založnik <i>Published by</i>	Univerza v Mariboru Univerzitetna založba Slomškovo trg 15, 2000 Maribor, Slovenija https://press.um.si , zalozba@um.si		
Izdajatelj <i>Issued by</i>	Univerza v Mariboru Fakulteta za strojništvo Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija https://www.fs.um.si , fs@um.si		
Izdaja <i>Edition</i>	Prva izdaja	Izdano <i>Published at</i>	Maribor, april 2022
Vrsta publikacije <i>Publication type</i>	E-knjiga	Dostopno na <i>Available at</i>	https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/640

CIP - Kataložni zapis o publikaciji Univerzitetna knjižnica Maribor	
007.52:621.8 (075.8)	
LERHER, Tone	Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki [Elektronski vir] / avtor Tone Lerher. - 1. izd. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2022
Način dostopa (URL): https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/640	
ISBN 978-961-286-582-5	
doi: 10.18690/um.fs.3.2022	
COBISS.SI-ID 105905155	



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba
/ University of Maribor, University Press
Besedilo / Text © Lerher, 2022

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International License.*

Uporabnikom je dovoljeno reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ISBN 978-961-286-582-5 (pdf)

DOI <https://doi.org/10.18690/um.fs.3.2022>

Cena
Price Brezplačni izvod

Odgovorna oseba založnika
For publisher prof. dr. Zdravko Kačič,
rektor Univerze v Mariboru

Citiranje
Attribution Lerher, T. (2022). *Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki*. Maribor: Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fs.3.2022

Kazalo

Predgovor.....	1
1 Uvod	3
2 Avtomatizacija in robotizacija notranjega transporta v intralogistiki	7
2.1 Avtomatsko vodena vozila AGV	8
2.1.1 Navigacija AGV.....	9
2.1.2 Pogon AGV.....	12
2.1.3 Napajanje in zagotavljanje varnosti AGV.....	13
2.1.4 Tehnično-tehnološke izvedbe AGV.....	14
2.2 Avtonomni mobilni roboti AMR.....	16
2.2.1 AMR za oskrbo proizvodnih delovnih mest.....	17
2.2.2 AMR za uporabo v skladiščno-distribucijskih centrih.....	18
2.2.3 Posebne tehnično-tehnološke izvedbe AMR.....	20
3 Avtomatski vozički v intralogistiki.....	23
3.1 SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu.....	24
3.1.1 Avtomatski voziček za vožnjo v vodoravni smeri.....	26
3.1.2 Dvigalo z dvizžno mizo za pomik v navpični smeri.....	27
3.1.3 Posebne izvedbe SBS/RS glede na gibanje avtomatskih vozičkov.....	28
3.2 Pretočna zmogljivost SBS/RS.....	34
3.2.1 SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu.....	35
3.2.2 SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu VDI 2692.....	43
3.2.4 SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko – varianta I.....	52
3.2.5 SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko – varianta II.....	58
3.2.6 SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko – varianta III.....	65
4 Avtonomni mobilni roboti v intralogistiki	75
4.1 AMR za podporo procesu komisioniranja »blago h komisionarju«.....	76
4.2 AMR za podporo hibridnemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«.....	79
4.3 AMR za podporo popolnoma avtomatiziranemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«.....	83
4.3.1 AMR "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics.....	83
4.4 Posebne izvedbe AMR za delo v skladiščnem regalu.....	85
4.4.1 AMR v sodelovanju s pomičnim dviznim vravnim mehanizmom.....	85
4.4.2 AMR z robotsko roko za delo v skladiščnem regalu.....	89
4.4.3 AMR z robotsko roko in pomožnim vozičkom za delo v skladiščnem regalu.....	96
Literatura	105



Pogosteje uporabljene oznake

Seznam kratic:

AGV	–	avtomatsko vodena vozila
AMR	–	avtonomni mobilni roboti
AS/RS	–	avtomatizirani regalni skladiščni sistemi
AVS/RS	–	avtomatizirani regalni skladiščni sistemi z avtomatskimi/avtonomnimi vozički
SBS/RS	–	avtomatizirani regalni skladiščni sistemi z avtomatskimi vozički
SCAR	–	avtomatski voziček
WLAN	–	brežžično omrežje
LIFT	–	dvižna miza dvigala
DC	–	dvojni delovni cikel
SC	–	enojni delovni cikel
FEM	–	Evropska federacija za ravnanje z materiali
LTN	–	Laboratorij za transportne naprave, sisteme in logistiko
LASOK	–	Laboratorij za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije
SR	–	regalno skladišče
RFID	–	radiofrekvenčna identifikacija
RTLS	–	sistem lociranja v realnem času
TSE	–	transportno-skladiščna enota

V/I	–	vhodno/izhodna (lokacija)
VDI	–	Združenje nemških inženirjev

Seznam simbolov:

Poglavje 2.1.1

α, β, γ	–	notranji koti trikotnika
a, b, c	–	stranice trikotnika
v_a	–	višina na stranico (a)
d_c	–	dolžina stranice (a) do pravokotnice na točko (A) trikotnika
x_a, y_a	–	koordinati lokacije AGV v prostoru

Poglavje 3.2.1

$t(d_i)$	–	čas v odvisnosti od poti ($i = x, y$)
d	–	pot (razdalja)
a_x	–	pospešek/pojemek avtomatskega vozička v vodoravni smeri
a_y	–	pospešek/pojemek dvižne mize dvigala v navpični smeri
H_{SR}	–	višina regalnega skladišča
L_{SR}	–	dolžina regalnega skladišča
m, n	–	projektne spremenljivki za izbrani etaži skladiščnega regala
s, r	–	projektne spremenljivki za izbrani skladiščni mesti skladiščnega regala
$F_i(z)$	–	porazdelitvena funkcija ($i = x, y$)
$f_i(z)$	–	gostota verjetnosti ($i = x, y$)
z	–	projektna spremenljivka
k	–	projektna spremenljivka
$t_{p/s}$	–	čas za nalaganje/odlaganje zabojev
$E(SC)_{LIFT}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala
$E(DC)_{LIFT}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala
$E(ES)_{LIFT}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost časa pomika dvižne mize med V/I-lokacijo in naključno izbrano etažo skladiščnega regala
$E(TB)_{LIFT}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost časa pomika dvižne mize med dvema naključno izbranimi etažama skladiščnega regala

$\lambda(\text{SC})_{\text{LIFT}}$	–	pretočna zmogljivost enojnega delovnega cikla dvizhne mize dvigala
$\lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}}$	–	pretočna zmogljivost dvojnega delovnega cikla dvizhne mize dvigala
$E(\text{SC})_{\text{SCAR}}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička
$E(\text{DC})_{\text{SCAR}}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička
$E(\text{ES})_{\text{SCAR}}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost časa vožnje avtomatskega vozička med V/I-lokacijo in naključno izbrano skladiščno lokacijo (v izbrani etaži) skladiščnega regala
$E(\text{TB})_{\text{SCAR}}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost časa vožnje avtomatskega vozička med dvema naključno izbranimi skladiščnima lokacijama v skladiščnem regalu
$\lambda(\text{SC})_{\text{SCAR}}$	–	pretočna zmogljivost enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička
$\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}$	–	pretočna zmogljivost dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička
η	–	izkoriščenost dvizhne mize dvigala/avtomatskih vozičkov
τ	–	pričakovano ozko grlo SBS/RS
\mathcal{A}	–	število regalnih hodnikov
$\lambda(\text{DC})$	–	sistemska zmogljivost SBS/RS, kadar je $\mathcal{A} = 1$
$\lambda(\text{DC})_{\text{SBS/RS}}$	–	celotna sistemska zmogljivost SBS/RS, kadar je $\mathcal{A} > 1$

Poglavje 3.2.2

$s_{1,y}$	–	povprečna dolžina poti dvizhne mize dvigala pri enojnem delovnem ciklu
$s_{2,y}$	–	povprečna dolžina poti dvizhne mize dvigala pri dvojnem delovnem ciklu
$l_{0,y}$	–	razdalja med vhodno/izhodno lokacijo in prvo etažo regalnega skladišča
n_y	–	število etaž regalnega skladišča
l_y	–	višina etaže regalnega skladišča
$s_{1,x}$	–	povprečna dolžina poti avtomatskega vozička pri enojnem delovnem ciklu

$s_{2,x}$	–	povprečna dolžina poti avtomatskega vozička pri dvojnem delovnem ciklu
$l_{0,x}$	–	razdalja med vhodno/izhodno lokacijo in prvim stolpcem regalnega skladišča
n_x	–	število stolpcev regalnega skladišča
l_x	–	širina stolpca regalnega skladišča
$t_{FE,y}$	–	povprečni čas enojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala
$t_{FD,y}$	–	povprečni čas dvojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala
$t_{G,y}$	–	konstanten čas za nalaganje/odlaganje zabojčkov z dvižno mizo dvigala
$t_{P,y}$	–	konstanten čas za pozicioniranje dvižne mize dvigala
$t_{FE,x}$	–	povprečni čas enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička
$t_{FD,x}$	–	povprečni čas dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička
$t_{G,x}$	–	konstanten čas za nalaganje/odlaganje zabojčkov z avtomatskim vozičkom
$t_{P,x}$	–	konstanten čas za pozicioniranje avtomatskega vozička
$t_{SShuttle}$	–	kombinirani povprečni čas dvojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala in avtomatskega vozička
$\lambda_{SShuttle}$	–	pretočna urna zmogljivost kombiniranega delovnega cikla dvižne mize dvigala in avtomatskega vozička
t_W	–	čakalni čas

Poglavje 3.2.3

b	–	faktor oblike skladiščnega regala
A	–	površina skladiščnega regala
$E(SC_1)_{SCAR}^{MTC}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega delovnega cikla, kadar je ($b \leq 1$)
$E(SC_2)_{SCAR}^{MTC}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega delovnega cikla, kadar je ($b > 1$)
$\lambda(SC)_{SCAR}^{MTC}$	–	pričakovana urna pretočna zmogljivost enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah skladiščnega regala
$E(DC_1)_{SCAR}^{MTC}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega (DC) delovnega cikla, kadar je ($b \leq 1$)
$E(DC_2)_{SCAR}^{MTC}$	–	pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega (DC) delovnega cikla, kadar je ($b > 1$)

- $\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}}$ – pričakovana urna pretočna zmogljivost dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah skladiščnega regala
- $t_{\text{P/S SCAR}}^{\text{MTC}}$ – čas za nalaganje/odlaganje zabojevka z avtomatskim vozičkom za delo v več etažah

Poglavje 3.2.4

- t_n – povprečni čas vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko za obisk (n) skladiščnih (komisionirnih) lokacij
- n – število skladiščnih (komisionirnih) lokacij
- s_n – dolžina poti avtomatskega vozička v skladiščnem regalu
- t_n^{x+} – delež povprečnega časa vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko pri procesu komisioniranja
- t_n^{x-} – delež povprečnega časa vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko pri vračanju vozička (brez ustavljanja) na vzhodno-izhodno lokacijo
- v_x – hitrost avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v vodoravni smeri
- a_x – pospešek/pojemek avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v vodoravni smeri
- L_{SR} – dolžina skladiščnega regala
- $t_{\text{P/S}}^{\text{tote}}$ – čas za nalaganje/odlaganje zabojevka z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko
- $t_{\text{P/S}}^{\text{item}}$ – čas robotskega komisioniranja artikla z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko
- $T(\text{MC}_4)$ – povprečni čas večkratnega delovnega cikla v primeru obiska štirih ($n = 4$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala
- $T(\text{MC}_6)$ – povprečni čas večkratnega delovnega cikla v primeru obiska šestih ($n = 6$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala
- $\tau(\text{MC}_4)$ – pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla v primeru obiska štirih ($n = 4$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala
- $\tau(\text{MC}_6)$ – pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla v primeru obiska šestih ($n = 6$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala

Poglavje 3.2.5

v_x	–	hitrost avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v vodoravni smeri
a_x	–	pospešek/pojemek avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v vodoravni smeri
n	–	število skladiščnih (komisionirnih) lokacij
s_x	–	dolžina poti avtomatskega vozička v skladiščnem regalu
$t_{P/S\ tote}$	–	čas za nalaganje/odlaganje zabojevka z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko
$t_{P/S\ item}$	–	čas robotskega komisioniranja artikla z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko
$T(MC_n)$	–	povprečni čas večkratnega delovnega cikla v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala
$\tau(MC_n)$	–	pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala
$T(ES)_{SCAR}$	–	čas vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med V/I-lokacijo in naključno izbrano skladiščno lokacijo v j -ti etaži skladiščnega regala
$T(TB)_{SCAR}$	–	čas vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med dvema naključno izbranimi skladiščnima lokacijama v j -ti etaži skladiščnega regala

Poglavje 3.2.6

α	–	faktor oblike skladiščnega regala
β	–	odvisnost razmerja časa pospeševanja in zaviranja v vodoravni in v navpični smeri
L_{SR}	–	dolžina skladiščnega regala
H_{SR}	–	višina skladiščnega regala
Θ	–	funkcija
v_x	–	hitrost avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v vodoravni smeri
a_x	–	pospešek/pojemek avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v vodoravni smeri
n	–	število skladiščnih (komisionirnih) lokacij
$t_{P/S\ tote}$	–	čas za nalaganje/odlaganje zabojevka z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko

$t_{P/S \text{ item}}$	– čas robotskega komisioniranja artikla z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko
I_n^1	– delež časa ustaljene vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med V/I-lokacijo do prve $P(1)$ od n -tih lokacij razvrščenih po naraščajoči "strategiji x "
B_n^1	– delež časa neustaljene (pospeševanje in pojemanje) vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med V/I-lokacijo do prve $P(1)$ od n -tih lokacij razvrščenih po naraščajoči "strategiji x "
I_n^i	– delež časa ustaljene vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med dvema zaporednima skladiščnima lokacijama $P(i)$ in $P(i + 1)$ po naraščajoči "strategiji x "
B_n^i	– delež časa neustaljene vožnje (pospeševanje in pojemanje) avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med dvema zaporednima skladiščnima lokacijama $P(i)$ in $P(i + 1)$ po naraščajoči "strategiji x "
$E(MC_n)$	– pričakovani (povprečni) čas večkratnega delovnega cikla avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij
$\tau(MC_n)$	– pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij



Predgovor

Učbenik Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki je namenjen študentom in inženirjem študijskega programa Strojništvo.

Vsebina učbenika Avtomatska vozila in mobilni roboti v intralogistiki je podana celovito. Za lažje razumevanje delovanja AGV in AMR v intralogistiki je razlaga dopolnjena s slikovnim gradivom. Za razumevanje podane vsebine učbenika je potrebno osnovno znanje tehnologij transportno-skladiščnih sistemov ter znanje matematike, kinematike in dinamike na ravni univerzitetnega študijskega programa Strojništvo.

V uvodnem poglavju so opisana avtomatsko vodena vozila AGV in avtonomni mobilni roboti AMR za uporabo v skladiščno-distribucijskih centrih prihodnosti. Poleg primerov uporabe AGV in AMR v intralogistiki so navedeni primeri uporabe AGV in AMR na drugih področjih logistike.

Sledi osrednje poglavje o avtomatskih vozičkih v intralogistiki za podporo procesu komisioniranja "blago h komisionarju" v skladiščnih regalih (ang. Shuttle-based storage and retrieval systems; SBS/RS). Poleg osnovne izvedenke SBS/RS z avtomatskimi vozički so navedene in opisane posebne izvedbe SBS/RS z avtomatskimi vozički, ki se uporabljajo v praksi. Podani so analitični in numerični modeli za določitev pretočne zmogljivosti posamezne izvedenke SBS/RS z avtomatskimi vozički. V zaključku navedenega poglavja so predstavljene in opisane posebne izvedbe SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko, ki so trenutno še v fazi koncipiranja in nadaljnega razvoja.

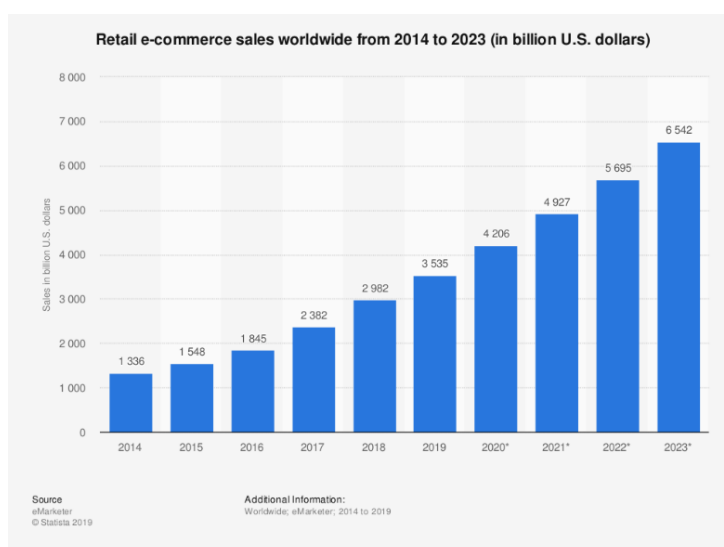
Temu sledi poglavje o avtonomnih mobilnih robotih v intralogistiki za podporo procesu komisioniranja "blago h komisionarju" z AMR za transport poličnih regalov do komisionirnih delovnih mest. Prav tako sta navedena hibridni in avtomatizirani sistem za podporo procesu komisioniranja "komisionar k blagu" s posebnimi oblikami AMR. Kot dober in inovativen primer AMR iz prakse sta navedeni komercialni rešitvi AMR "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics (<https://fetchrobotics.com/>) ter AMR "TORU in SOTO" podjetja Magazino (<https://www.magazino.eu/>). V zaključku navedenega poglavja so predstavljene in opisane posebne izvedbe AMR z integrirano robotsko roko za delo v skladiščnem regalu, ki so trenutno še v fazi koncipiranja in nadaljnjega razvoja.

Na tem mestu bi se zahvalil vsem, ki so kakorkoli pripomogli pri nastanku tega učbenika, še posebej pa recenzentoma prof. dr. Goranu Đukiću s Fakultete za strojništvo in ladjedelništvo Univerze v Zagrebu in prof. dr. Karlu Gotlihu s Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru.

Vsem uporabnikom gradiva želim, da bi ga s pridom uporabljali med študijem transportnih sistemov in logistike.

1 Uvod

Trend razvoja sodobne intralogistike v različnih industrijskih panogah temelji na razvoju novih tehnologij, uvedbi informacijsko-komunikacijske tehnologije (IKT), koncepta industrijskega interneta stvari (IIoT) in Industrije 4.0 ter vedno večje stopnje avtomatizacije in robotizacije procesov, ki ustvarjajo pogoje za dvig produktivnosti ob uporabi naprednih in okolju prijaznih tehnologij.



Slika 1: Vrednost trga e-trgovine v svetu od leta 2014 do 2023

Vir: <https://www.statista/>

Mnoge investicije v intralogistiki obsegajo področje avtomatiziranih skladiščno-distribucijskih centrov in predvsem robotiziranega notranjega transporta.

Klasična paletna regalna skladišča, posluževana pretežno s transportnimi viličarji, se zaradi naraščajočega trenda uporabe spletne e-trgovine (slika 1) in vedno večjega pričakovanja odjemalcev po hitrosti, zanesljivosti in fleksibilnosti storitev zamenjujejo s sodobnimi skladiščno-distribucijskimi centri.

Le-ti v svoje procese integrirajo uporabo robotskih sistemov pri izvajanju procesov skladiščenja in komisioniranja blaga, da lahko v celoti zadostijo hitrosti, zanesljivosti in fleksibilnosti storitev ter pojavu koncepta izrazito majhnih naročil (ang. *batch size one*).

Nedavni napredek avtomatizacije in robotizacije transportno-skladiščne tehnike omogoča uporabo številnih novih tehnologij za povečanje učinkovitosti skladiščnega poslovanja, kot so: avtomatska identifikacija artiklov z uporabo RFID-tehnologije, avtomatsko sledenje toka materiala z uporabo RTLS-tehnologijo, vpeljava umetne inteligence z uporabo računalniškega in strojnega vida, uporaba sodelujočih robotov pri sestavi (kompleksnih) izdelkov, uporaba avtonomnih mobilnih robotov pri procesu komisioniranja blaga, vpeljava koncepta delovnega mesta s sodelujočim robotom (ang. *Operator 4.0*) itn.

Eno izmed pomembnih področij intralogistike predstavljajo avtomatizirana regalna skladišča z avtomatskimi (ang. *Shuttle-Based Storage and Retrieval System; SBS/RS*) in avtonomnimi vozički (ang. *Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems; AVS/RS*) ter robotskimi mobilnimi sistemi (ang. *Autonomous Mobile Robots; AMR*).

Glede na rastoče trende uporabe avtomatizacije in robotizacije v intralogistiki v zadnjih letih se s področjem avtomatizacije in robotizacije procesov ukvarja vedno več strokovne in znanstvene skupnosti; to nakazuje povečanje strokovnih in znanstvenih člankov v obdobju zadnjih petih let, kar je dobro za dvig produktivnosti v gospodarstvu.

Načrtovalci in integratorji skladiščnih sistemov ter vodje skladišč so tako soočeni z množico novih tehnik in tehnologij za uporabo v sodobnih skladiščih, kar ima izrazit vpliv na ustrezno izbiro navedenih tehnologij z vidika doseganja maksimalne kapacitete in pretočne zmogljivosti skladišča, maksimalne zanesljivosti in fleksibilnosti skladišča, trajnosti in ergonomije ter nenazadnje stroškovne učinkovitosti skladišča.

Navedene nove tehnologije s poudarkom na avtomatizaciji in robotizaciji skladiščnih procesov predstavljajo vzvod za prodiranje novih znanj/kompetenc v industrijska okolja. Ta znanja so nujna za razvoj pametnih skladišč (ang. *Warehouses 4.0*) kot osnove sodobne intralogistike v pametnih podjetjih, ki veljajo za novo raziskovalno smer. Le pametna skladišča se bodo lahko povezovala v oskrbovalne verige prihodnosti in kot takšna prispevala k gospodarski rasti, humanemu in človeku prijaznemu delovnemu okolju ter trajnostnemu razvoju gospodarstva.

2 Avtomatizacija in robotizacija notranjega transporta v intralogistiki

Intralogistika s svojimi procesi zagotavlja vodenje toka materiala in informacijskega toka in je podporna dejavnost proizvodnji. Zagotavljanje toka materiala in informacijskega toka, ki sta tipični dinamični dejavnosti, zahteva uporabo tehničnih sredstev in naprav.

Dandanes notranji transport kot nosilec toka materiala v veliki večini temelji na transportnih viličarjih ali vlečnih vozilih s prikolicami "milk-run" vlečna kompozicija, ki jih upravlja viličarist.

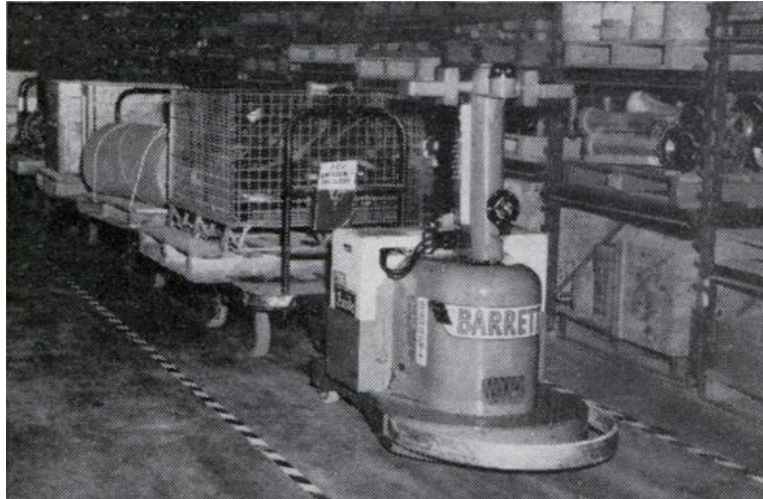
Z namenom avtomatizacije notranjega transporta so se v praksi najprej pojavila avtomatsko vodena vozila, ki jih poznamo po kratici AGV (ang. *Automated Guided Vehicles*) in delujejo na osnovi tehnologije preddoločene navigacije.

V zadnjih letih se AGV zamenjujejo z avtonomnimi mobilnimi roboti, ki so poznani po kratici AMR (ang. *Autonomous Mobile Robots*). Le-ti delujejo popolnoma avtonomno in za svoje delovanje ne potrebujejo preddoločene navigacije.

Obe tehnologiji (AGV in AMR) delujeta avtomatsko in za svoje delovanje ne potrebujeta upravljalca, kar izrazito povečuje učinkovitost intralogistike.

2.1 Avtomatsko vodena vozila AGV

Prva AGV je predstavilo podjetje Buret Electronic že v prejšnjem stoletju, in sicer v letu 1950. V tem obdobju je AGV predstavljal vlečno vozilo, ki je sledilo žici, nameščeni v tleh (slika 2).



Slika 2: Začetki uporabe AGV v praksi

Vir: Ullrich, 2015

Nadalje so bila AGV kot samostojna vozila v avtomobilski industriji uporabljena v podjetju Volvo v letu 1973. Namesto uporabe tradicionalnih montažnih linij so se pri Volvu odločili za uporabo AGV za transport avtomobilskih karoserij med delovnimi mesti. Takšen način dela je zaposlenim omogočil boljše ergonomske rešitve in večjo fleksibilnost pri delu (slika 3).



Slika 3: Uporaba AGV v avtomobilski industriji

Vir: Alexandersson, 2016

Dandanes je uporaba AGV razširjena na veliko različnih industrijskih področjih, od kovinskopredelovalne industrije pa vse do uporabe AGV v bolnišnicah.

Za učinkovito delovanje AGV so uporabljene različne tehnološke rešitve za navigacijo, pogon, napajanje in varnostne sisteme.

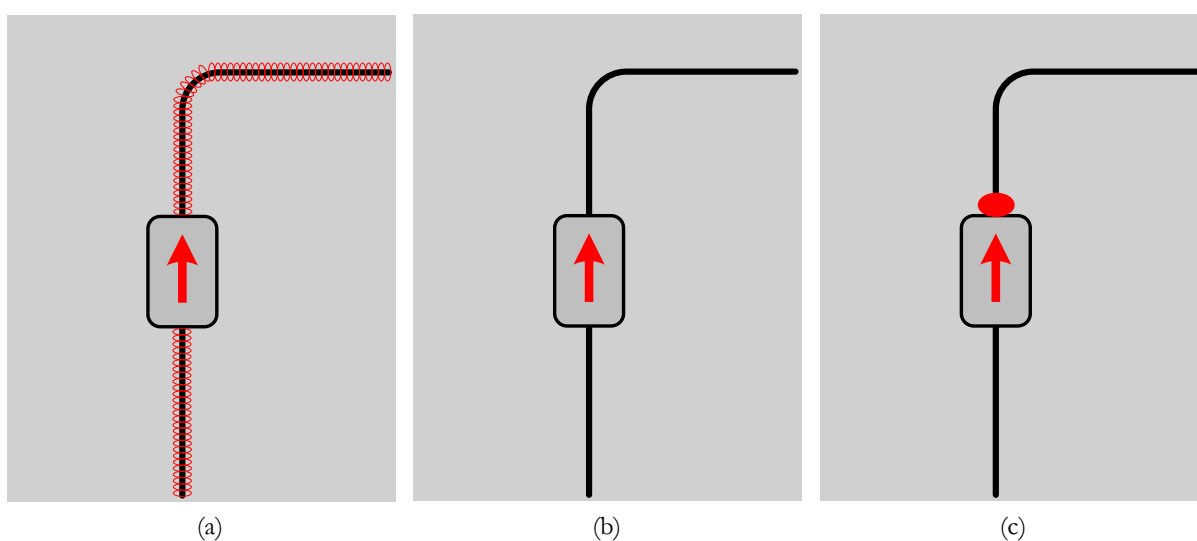
2.1.1 Navigacija AGV

Navigacijo AGV v osnovi delimo na:

- predoločeno navigacijo s fiksnimi potmi za vožnjo AGV (vodenje z žico, vodenje z magnetnim trakom, optično vodenje);
- predoločeno navigacijo brez fiksnih poti za vožnjo AGV (inercialna navigacija, navigacija s sklicevanjem na magnetno točko, laserska navigacija AGV).

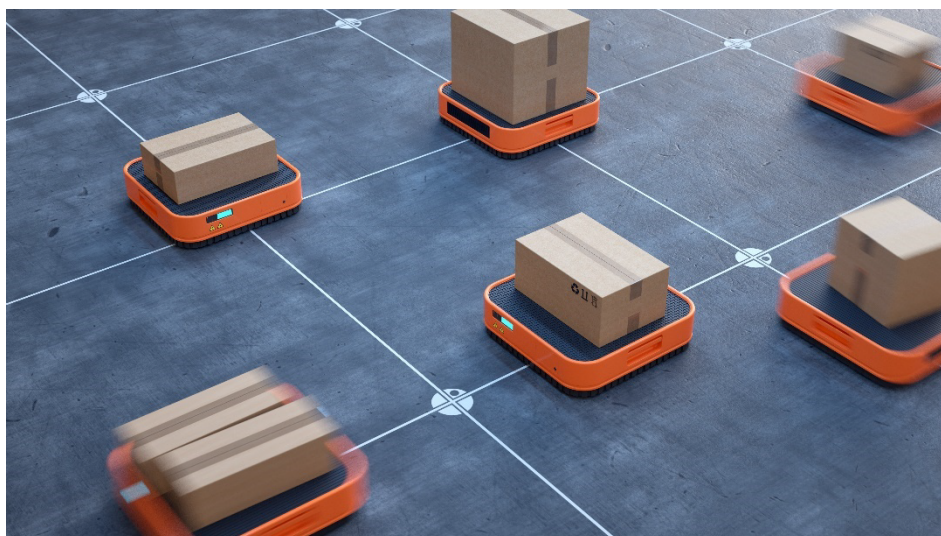
Preddoločena navigacija s fiksnimi potmi za vožnjo AGV

Osnovna navigacija AGV (slika 4a) temelji na sledenju žice, nameščene v tleh. Na AGV je nameščen senzor, ki zajema nizkofrekvenčni signal in tako sledi žici. Sledi navigacija na osnovi magnetnih trakov, nameščenih na tla (slika 4b). Na osnovi senzorja magnetnega polja AGV sledi magnetnim trakovom, nameščenim na tleh. Pri optični navigaciji (slika 4c) AGV z uporabo optičnega senzorja sledi oznakam, ki so nameščene na tleh (slika 5).



Slika 4: Preddoločena navigacija s fiksnimi potmi za vožnjo AGV

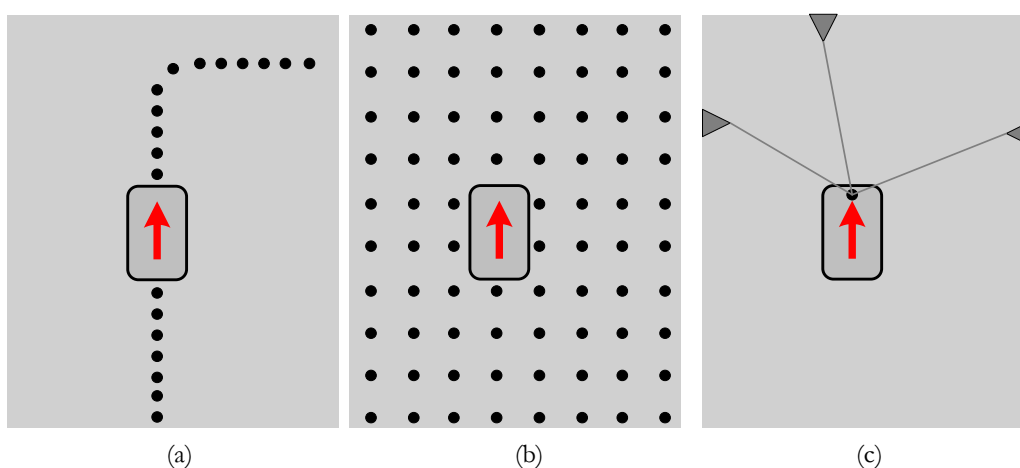
Vir: lasten



Slika 5: Primer uporabe optične navigacije AGV

Vir: ©/Adobe Stock

Preddoločena navigacija brez fiksnih poti za vožnjo AGV



Slika 6: Preddoločena navigacija brez fiksnih poti za vožnjo AGV

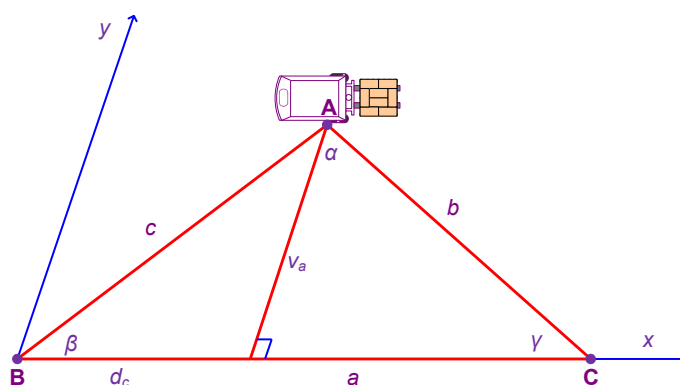
Vir: lasten

Pri inercialni navigaciji AGV (slika 6a) se beležijo pospeški v vseh smereh premikanja AGV, zato AGV ne potrebuje vnaprej načrtane poti v obliki sledilne žice ali traku. Navigacija AGV s sklicevanjem na magnetno točko (slika 6b) vključuje sidranje manjših, primerno razporejenih talnih magnetov. Položaj AGV se izračuna na podlagi predhodno znanega položaja, prevožene razdalje in smeri vožnje AGV. Magnetni senzorji na AGV zaznajo zasidrane magnetne in na podlagi jakosti polja izračunajo absolutni položaj AGV. Laserska navigacija AGV (slika 6c) je najsodobnejša tehnološka rešitev "proste" navigacije. Vrteči se laserski skener na AGV določa položaj z natančnim merjenjem kotov in razdalj

glede na reflektorje, nameščene na stenah in stebrih proizvodnega ali skladiščnega objekta. Laserska navigacija AGV omogoča natančno merjenje na razmeroma velikih razdaljah.

Primer laserske navigacije AGV

Na podlagi odboja laserskih žarkov iz različnih odsevnikov se z uporabo metode triangulacije določi trenutni položaj AGV. Triangulacija je način določanja lege triangulacijske točke na osnovi trikotniških pravil in dveh točk z znanima koordinatama v prostoru. V trikotniku, kjer poznamo stranico in dva kota, lahko izračunamo še preostali dve stranici in tretji kot, kot je prikazano na sliki 7 in v izrazu 2.6. Poznani so stranica trikotnika (a) ter notranja kota beta (β) in gama (γ).



Slika 7: Položaj AGV v prostoru po postopku triangulacije

Vir: lasten

Pri določitvi lokacije AGV (x_a, y_a) po postopku triangulacije izhajamo iz sinusnega izreka (2.1):

$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c} \quad (2.1)$$

Stranica trikotnika (c) je enaka izrazu (2.2):

$$c = \frac{\sin(\gamma) \cdot a}{\sin(\alpha)} \quad (2.2)$$

Kot alfa (α) je enak izrazu (2.3):

$$\alpha = 180^\circ - \beta - \gamma \quad (2.3)$$

Višina na točko A (v_a) je enaka izrazu (2.4):

$$v_a = c \cdot \sin \beta \quad (2.4)$$

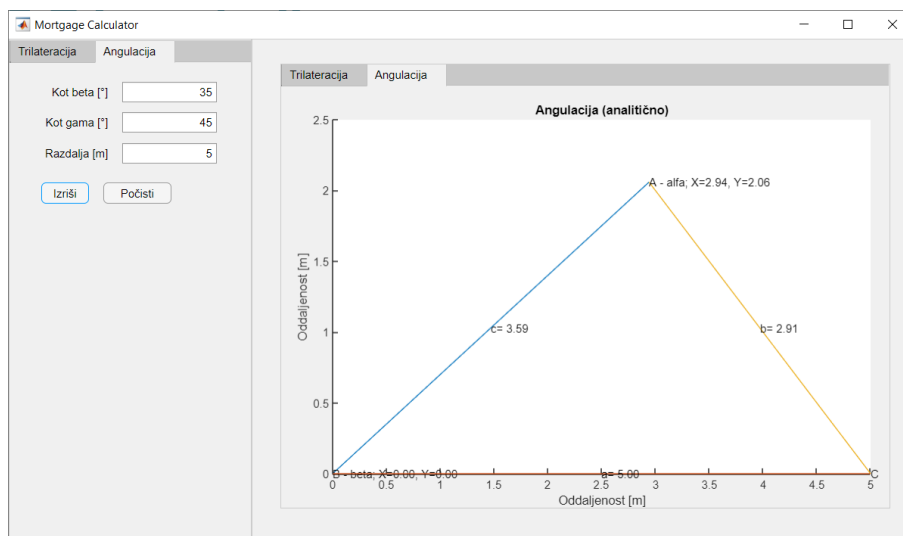
Dolžina (d_c) je enaka izrazu (2.5):

$$d_c = \sqrt{c^2 - v_a^2} \quad (2.5)$$

Če sta koordinati izhodišča ($x = 0$) in ($y = 0$), potem sta koordinati lokacije AGV (x_a, y_a) v prostoru enaki izrazu (2.6):

$$\begin{aligned} x_a &= x + d_c \\ y_a &= y + v_a \end{aligned} \quad (2.6)$$

V nadaljevanju je prikazan primer uporabe izračuna lokacije AGV (x_a, y_a), izdelan v programskem orodju MATLAB (slika 8).



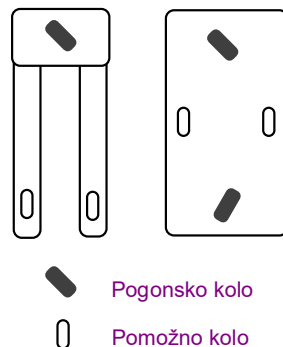
Slika 8: Primer izračuna lokacije AGV v MATLAB

Vir: lasten

2.1.2 Pogon AGV

Pogon AGV je izveden s pogonskimi kolesi. Število pogonskih koles AGV je odvisno od vrste AGV in njegove uporabe. Poleg pogonskih koles imajo AGV še pomožna (podporna) kolesa. Kot je prikazano na sliki 9, je lahko eno pogonsko kolo krmiljeno z dvema pomožnima kolesoma skupaj. Prav tako so v praksi rešitve pogona AGV z dvema

pogonskima kolesoma, ki omogočata rotacijo za kot 180° ali za kot 360° – skupaj z dvema pomožnima fiksnima kolesoma.



Slika 9: Primer razporeditve koles na AGV

Vir: lasten

2.1.3 Napajanje in zagotavljanje varnosti AGV

AGV poganjajo električni motorni sklopi, ki so napajani z litij-ionsko baterijo. Da zagotovimo ustrezno kapaciteto baterije za delovanje AGV obstaja možnost zamenjave baterije ali samodejnega polnjenja baterije, kar se v praksi pogosteje uporablja.

Za zagotavljanje varnosti pri transportu AGV so le-ti opremljeni z različnimi tehnološkimi rešitvami, in sicer:

- opozorilne luči in zvočni signali,
- brezkontaktni laserski skenerji za preprečevanje trka,
- varnostni odbijači za preprečevanje trka,
- gumb za takojšnjo zaustavitev AGV.

2.1.4 Tehnično-tehnološke izvedbe AGV

V praksi obstajajo različne tehnično-tehnološke izvedbe AGV, in sicer:

- AGV kot vlečni voziček (ang. *towing AGV*) (slika 10);



Slika 10: Vlečni AGV

Vir: ©/Adobe Stock

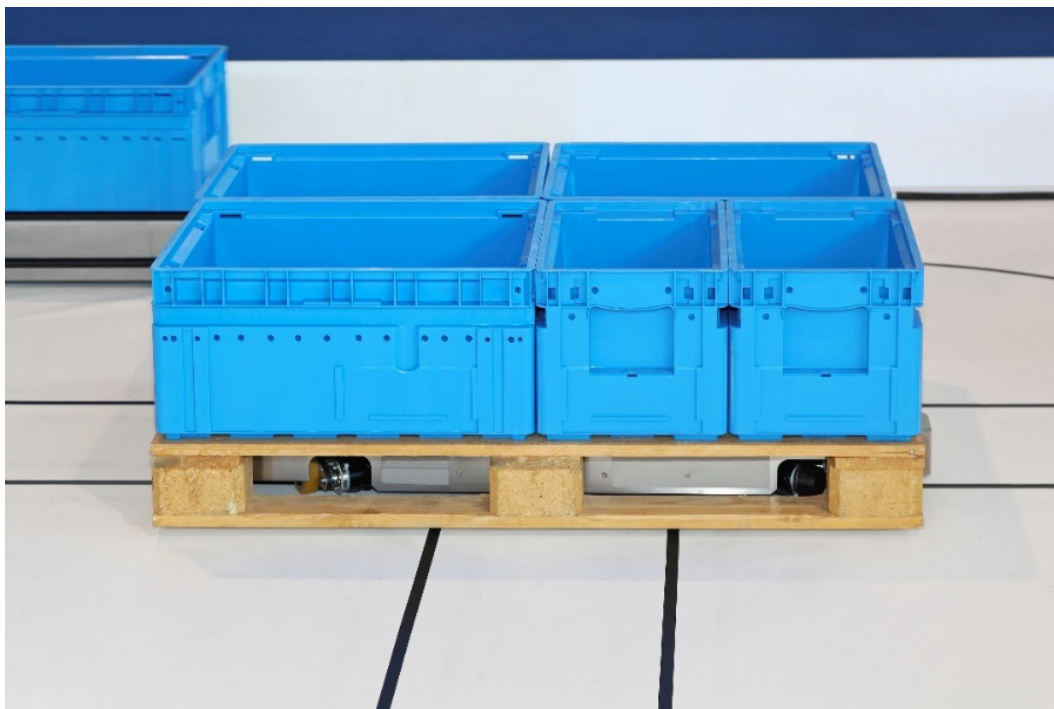
- tovorni AGV (ang. *unit-load AGV*) (slika 11);



Slika 11: Tovorni AGV

Vir: ©/Adobe Stock

- paletni AGV v obliki vilic (ang. *pallet AGV*) (slika 12);



Slika 12: Paletni AGV v obliki vilic

Vir: ©/Adobe Stock

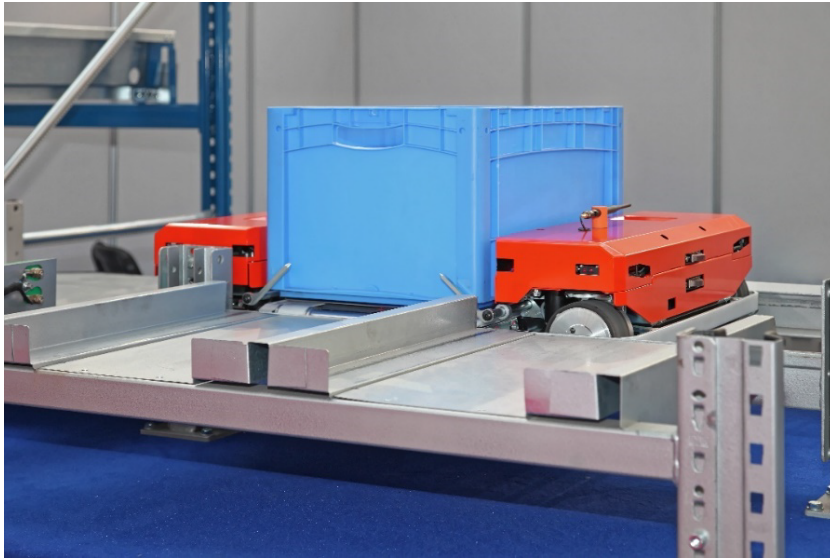
- AGV kot regalni viličar (ang. *masted AGV*) (slika 13);



Slika 13: AGV regalni viličar

Vir: ©/Adobe Stock

- AGV kot avtomatski regalni voziček (ang. *shuttle carrier*) (slika 14);



Slika 14: AGV kot avtomatski regalni voziček

Vir: ©/Adobe Stock

- AGV kot kontejnerski voziček (ang. *container AGV*) (slika 15);

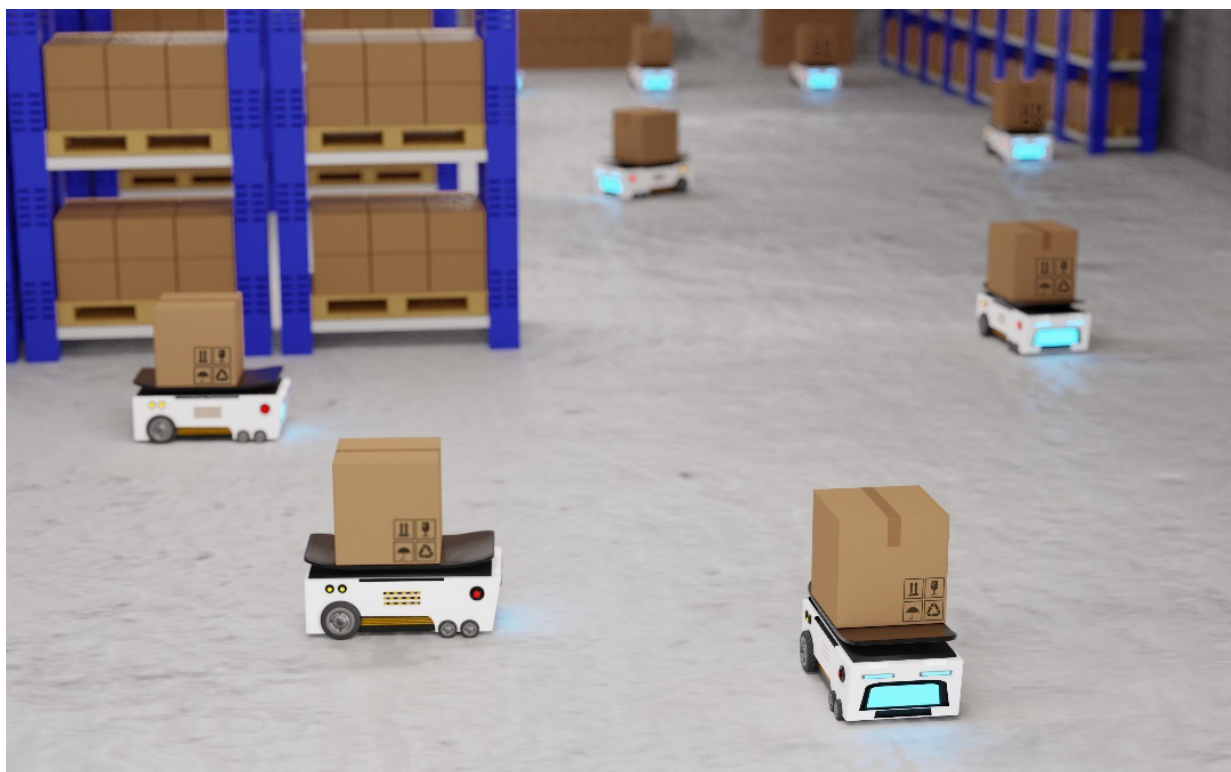


Slika 15: AGV kot kontejnerski voziček

Vir: ©/Adobe Stock

2.2 Avtonomni mobilni roboti AMR

V zadnjih letih so se na trgu začeli pojavljati napredni avtonomni mobilni roboti, ki odpravljajo slabost predoločene lokalizacije klasičnih AGV (slika 16).



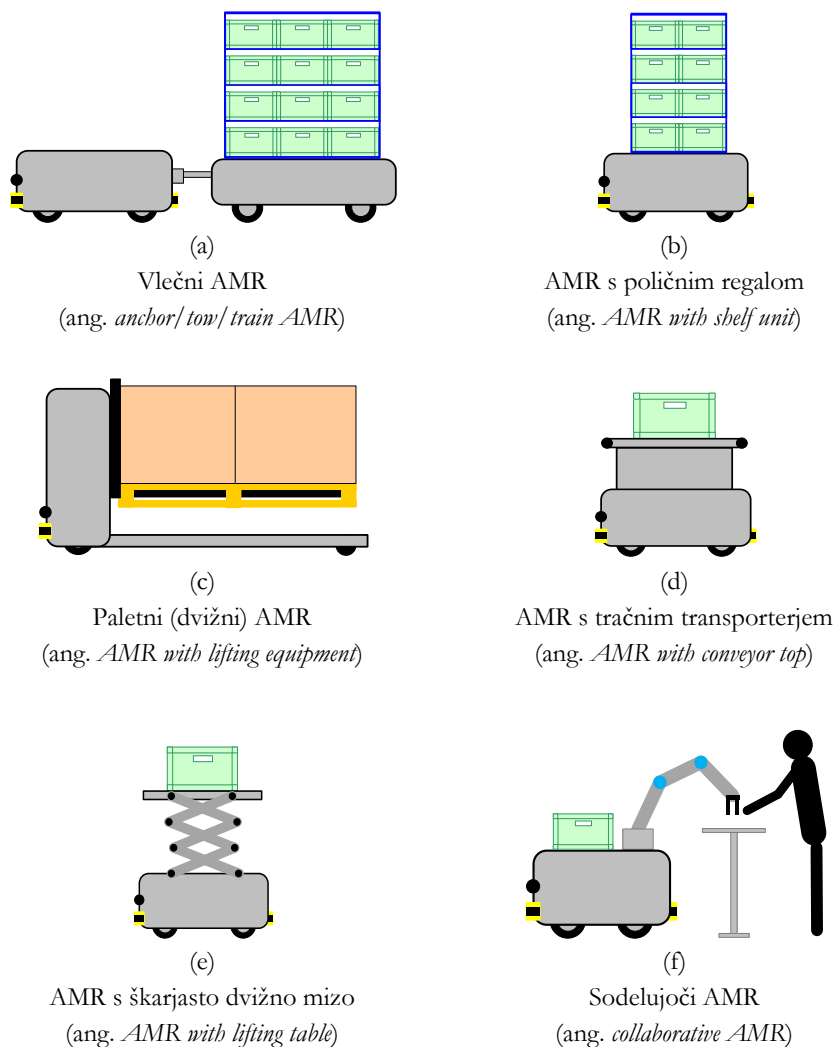
Slika 16: Primer uporabe avtonomnih mobilnih robotov v skladišču

Vir: ©/Adobe Stock

AMR imajo določeno stopnjo inteligence in lahko samostojno sprejemajo odločitve, ko zaidejo v nove ali nepredvidene situacije. AMR na osnovi nameščenih senzorjev (LIDAR, kamera, itd.) zaznavajo okolico in v primeru ovire na poti poiščejo alternativno pot do ciljne lokacije. AMR imajo zmožnost samodejnega lociranja v prostoru in sprejemanja odločitev ter omogočajo kooperativno delovanje v obliki robotskih rojev (ang. *Swarm Robotics*). Za lokalizacijo se pri AMR pogosto uporablja tehnika, imenovana SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*), ki je predmet številnih raziskav. Z uporabo SLAM-algoritmov si AMR postopoma izdelata konsistentno mapo območja, kjer deluje, hkrati pa tudi določi trenutno lokacijo v tej mapi. AMR avtonomnost odločitev omogočajo napredni algoritmi vodenja, ki temeljijo na uporabi strojnega učenja in umetne inteligence.

2.2.1 AMR za oskrbo proizvodnih delovnih mest

Na sliki 17 lahko vidimo posamezne izvedbe AMR, ki se uporabljajo za oskrbo proizvodnih delovnih mest v praksi (Fragapane et al., 2021), in sicer: vlečni AMR (slika 17a), AMR s poličnim regalom (slika 17b), paletni (dvižni) AMR (slika 17c), AMR s tračnim transporterjem (slika 17d), AMR s škarjasto dvižno mizo (slika 17e) in sodelujoči AMR (slika 17f).

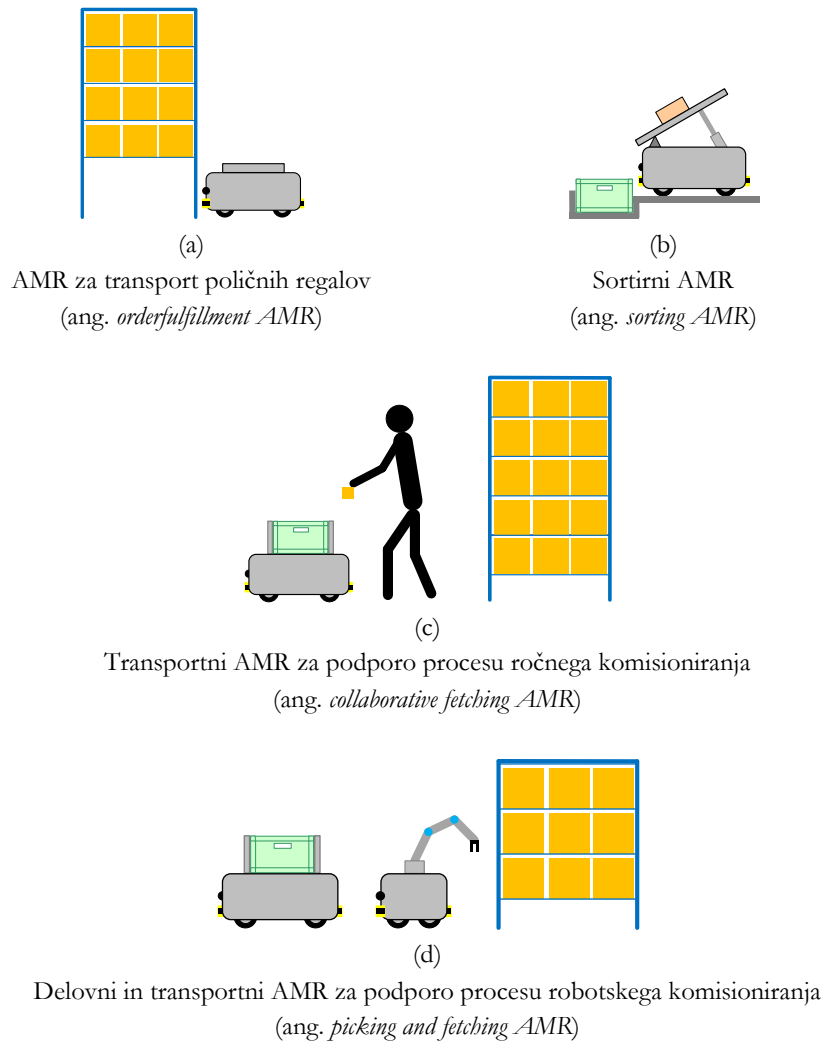


Slika 17: Vrste AMR v proizvodnji

Vir: lasten

2.2.2 AMR za uporabo v skladiščno-distribucijskih centrih

Na sliki 18 lahko vidimo posamezne izvedbe AMR, ki se uporabljajo v skladiščno-distribucijskih centrih (Fragapane et al., 2021), in sicer: AMR za transport poličnih regalov (slika 18a, slika 19), sortirni AMR (slika 18b, slika 20), transportni AMR za podporo procesu ročnega komisioniranja (slika 18c), delovni in transportni AMR za podporo procesu robotskega komisioniranja (slika 18d).



Slika 18: Vrste AMR v skladiščno-distribucijskih centrih

Vir: lasten



Slika 19: Uporaba AMR za transport policihnih regalov v skladiščno-distribucijskem centru

Vir: ©/Adobe Stock



Slika 20: Uporaba sortirnega AMR v skladiščno-distribucijskem centru

Vir: ©/Adobe Stock

2.2.3 Posebne tehnično-tehnološke izvedbe AMR

V logistiki obstajajo posebne tehnično-tehnološke izvedbe AMR, in sicer:

- droni za prenos tovora (slika 21) in spremljanje inventure skladišča (slika 22);



Slika 21: Uporaba drona za prenos tovora v skladišču

Vir: ©/Adobe Stock



Slika 22: Uporaba drona za spremljanje inventure skladišča
Vir: ©/Adobe Stock

- AMR za podporo delovnim procesom v bolnišnicah (slika 23);



Slika 23: Uporaba AMR za podporo delovnim procesom v bolnišnicah
Vir: ©/Adobe Stock

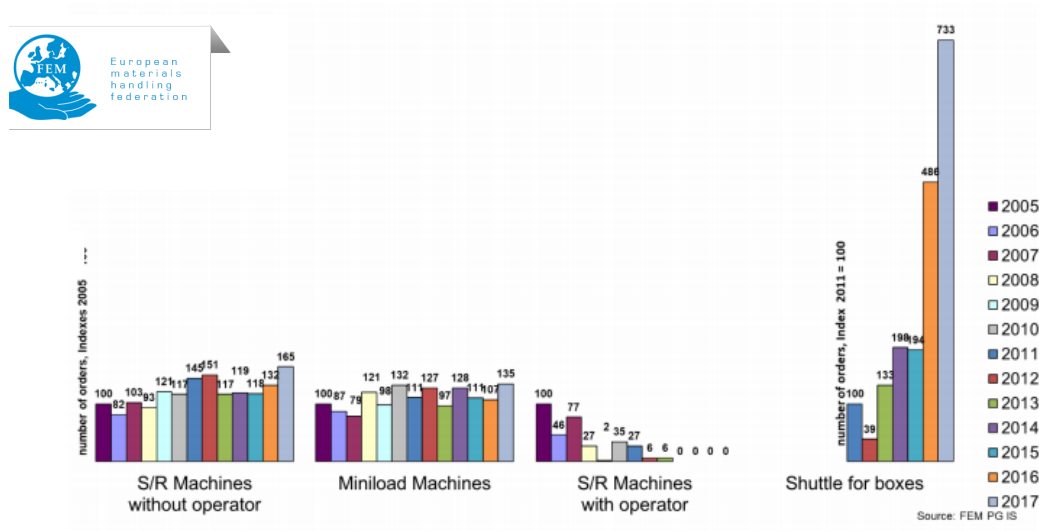
- AMR za podporo delovnim procesom pri pridelavi hrane v kmetijstvu (slika 24);



Slika 24: Uporaba AMR za podporo delovnim procesom v kmetijstvu
Vir: ©/Adobe Stock

3 Avtomatski vozički v intralogistiki

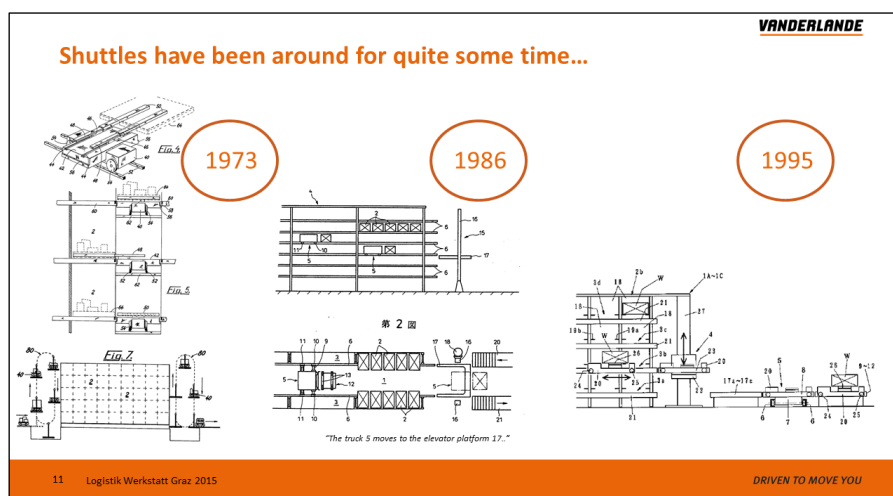
V zadnjem desetletju smo priča izrazitemu porastu uporabe avtomatskih vozičkov v intralogistiki. Za potrebe e-trgovine se v praksi skupaj z drugimi sistemi uporablja tehnologija avtomatskih vozičkov (ang. *shuttle*), ki so nameščeni v posameznih etažah skladiščnega regala. V literaturi in v praksi jih v angleškem jeziku imenujemo Automated Vehicle Storage and Retrieval Systems (AVS/RS) in Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems (SBS/RS), kar v slovenskem jeziku pomeni avtomatizirani regalni skladiščni sistemi z avtomatskimi vozički. V nadaljevanju bo za opis navedenih sistemov uporabljena kratica SBS/RS.



Slika 24: Uporaba avtomatiziranih skladiščnih sistemov v praksi

Vir: <https://www.fem-eur.com/>

Glede na raziskavo Evropske federacije za ravnanje z materiali (*European Materials Handling Federation; FEM*) lahko na sliki 24 (*shuttle for boxes*) vidimo, da se je uporaba SBS/RS v praksi v primerjavi z drugimi avtomatiziranimi skladiščnimi sistemi izrazito povečala od leta 2015 naprej, kar potrjuje dejstvo o učinkovitosti uporabe SBS/RS. Koncept uporabe kombiniranega sistema dvigala in avtomatskih vozičkov sega v sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, in sicer v obliki tehniških skic in patentnih prijav (slika 25). Čeprav je bil koncept kombiniranega sistema uporabe dvigala in avtomatskih vozičkov sorazmerno dobro razdelan, pa tehnologija v tem času ni bila dovolj razvita za uporabo v praksi.

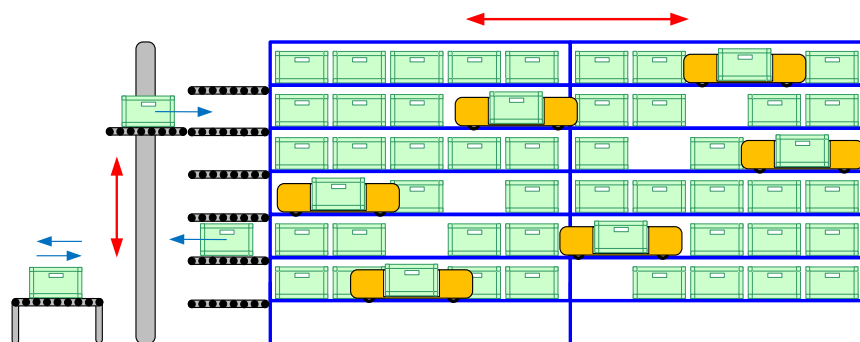


Slika 25: Razvoj koncepta uporabe kombiniranega sistema dvigala in avtomatskih vozičkov v skladiščih
Vir: Van Wijngaarden, B. et al., 2015

S strani uporabe strokovne literature je Nemško združenje inženirjev (*Verein Deutscher Ingenieure; VDI*) leta 2015 objavilo tehniške smernice "VDI 2692 Blatt 1 - Automated vehicle storage and retrieval systems for small unit loads". Prav tako je leta 2017 Evropska federacija za ravnanje z materiali (FEM) objavila tehniške smernice "FEM 9.860 – Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems". V obeh tehniških smernicah VDI 2692 Blatt 1 in FEM 9.860 so podrobneje predstavljene posamezne komponente SBS/RS in modeli za izračun pretočne zmogljivosti pri različnih pogojih uporabe SBS/RS.

3.1 SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu

Avtomatizirani regalni skladiščni sistemi z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu so namenjeni skladiščenju in odpremi manjših transportno-skladiščnih enot (TSE), kot so zaboji in kartoni. Za SBS/RS je značilna delitev transportnega sistema na dvigalo, avtomatske vozičke in jekleno regalno konstrukcijo, kamor odlagamo TSE (slika 26).



Slika 26: SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu

Vir: lasten

Dvigala na osnovi dvizne mize zagotavljajo premike TSE v navpični (y) smeri; TSE se odlagajo v vmesnih zalogovnikih v regalnem skladišču. Avtomatski vozički zagotavljajo uskladičenje in odpremo TSE v vodoravni (x) smeri skladiščnega regala. V vsaki etaži skladiščnega regala je nameščen vmesni zalogovnik za sprejem in odpremo TSE ter pripadajoči avtomatski voziček, ki ne zapusti etaže (ang. *tier captive system*).

V primerjavi s klasičnimi avtomatiziranimi regalnimi skladiščnimi sistemi (ang. *mini-load Automated Storage and Retrieval System; mini-load AS/RS*), ki temeljijo na manipulaciji TSE z regalnim dvigalom, dosegajo SBS/RS večjo pretočno zmogljivost, so bolj prilagodljivi in imajo manjšo porabo električne energije glede na njihovo pretočno zmogljivost (Malmborg, 2002).

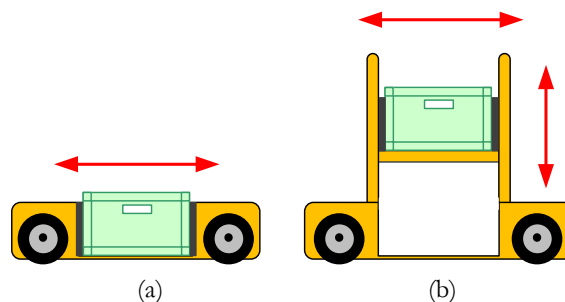
Ozko grlo SBS/RS predstavljajo dvigala, saj morajo streči več avtomatskim vozičkom, ki so v različnih etažah skladiščnega regala (Lerher et al., 2015). Posledično imajo avtomatski vozički slabši izkoristek, saj večji del svojega delovanja ostanejo v nevtralni poziciji (ang. *idle mode*). Izkoriščenost avtomatskih vozičkov lahko povečamo z zagotavljanjem večje kapacitete skladišča oz. večjega števila odlagalnih mest v SBS/RS. Regalnemu skladišču lahko povečamo kapaciteto z dodajanjem novih odlagalnih mest v smeri vožnje avtomatskega vozička (smer koordinate x). Veliko boljši izkoristek kapacitete skladišča dobimo s povečanjem skladiščnih (odlagalnih) mest v globino, torej pravokotno glede na smer vožnje avtomatskega vozička (večglobinski SBS/RS).

Glavni namen uporabe SBS/RS je doseganje sorazmerno visoke pretočne zmogljivosti (tudi do 1000 zaboječkov/uro z uporabo posebnih izvedb vozičkov in dvigal) v primerjavi z obstoječimi avtomatiziranimi tehnološkimi rešitvami za zaboječke (ang. *mini-load AS/RS*), ki v osnovi dosegajo veliko manjše pretočne zmogljivosti.

V primerjavi z regalnim dvigalom pri uporabi v avtomatiziranem regalnem skladiščnem sistemu, kot je mini-load AS/RS, SBS/RS z avtomatskimi vozički poleg visoke pretočne zmogljivosti za svoje delovanje potrošijo tudi veliko manj (električne) energije. Zaradi slednjega je uporaba SBS/RS veliko bolj trajnostna, kar je v današnjih časih vsekakor prednost pri uporabi izbrane tehnologije.

3.1.1 Avtomatski voziček za vožnjo v vodoravni smeri

Avtomatski voziček zagotavlja transport TSE po vodilih v izbrani etaži skladiščnega regala v vodoravni (x) smeri (slika 27a) ter v posebni izvedbi hkrati v vodoravni (x) in v navpični (y) smeri (slika 27b). Največja masa TSE naj ne presega 50 kg, medtem ko so mere TSE v naslednjem območju: min. (150 x 200 x 80) mm in maks. (600 x 400 x 250) mm. Hitrost avtomatskega vozička je odvisna od izvedbe SBS/RS in lahko znaša od $v_x = 1,5$ m/s pa vse do $v_x = 4$ m/s.



Slika 27: Izvedbi avtomatskega vozička za vožnjo v vodoravni (a) in vožnjo v vodoravni ter pomik v navpični smeri (b)

Vir: lasten

Ohišje avtomatskega vozička obsega pogonske, nadzorne in kontrolne ter energijske sklope. Številni senzorski sistemi zagotavljajo nadzor avtomatskega vozička, kot npr. za zagotavljanje natančne pozicije in detekcijo skladiščnega mesta. Po navadi senzori, integrirani v vozičku, in pozicijske oznake v vodilih vozička zagotavljajo natančno pozicioniranje vozička v skladišču.

Na splošno ima avtomatski voziček najmanj dva pogonska sklopa, ki skrbita za vožnjo avtomatskega vozička v vodoravni (x) smeri in za pomik teleskopov pri nalaganju/odlaganju TSE v prečni (z) smeri. V primeru avtomatskega vozička z integrirano dvižno mizo je potreben dodatni pogonski sklop za pomik v navpični (y) smeri. V večini primerov se uporabljajo 24-voltni (enosmerni) pogonski sklopi.

Avtomatski vozički so lahko napajani z energijo prek sistema električnih vodnikov, nameščenih v vodila v etažah skladiščnega regala, ali pa z uporabo litij-ionske baterije. Prav tako so lahko vozički opremljeni s tehnologijo procesa rekuperacije energije v kondenzator pri zaviranju vozička.

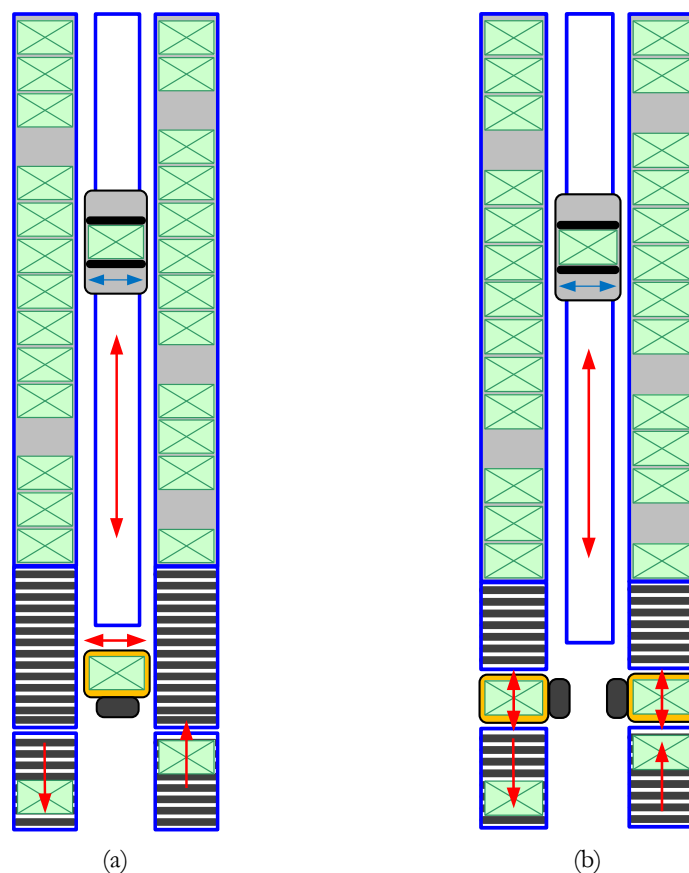
Komunikacija vozička s centralnim kontrolnim sistemom poteka prek brezžičnega omrežja WLAN.

3.1.2 Dvigalo z dvižno mizo za pomik v navpični smeri

Dvigalo na vhodu v skladiščni regal s pripadajočo dvižno mizo zagotavlja transport TSE v navpični (y) smeri do vmesnega zalogovnika izbrane skladiščne etaže. V praksi obstajajo posebne vrste dvigal za premik avtomatskih vozičkov med etažami, kar bo tudi predstavljeno v nadaljevanju. Po navadi je dvigalo ozko grlo v SBS/RS, zato ga je treba ustrezno načrtovati. V odvisnosti od zahtevane pretočne zmogljivosti se v praksi uporablja dvigalo z enojno dvižno mizo (slika 28a). Pri tej rešitvi TSE prihajajo v sistem po desnem valjčnem transporterju, zapuščajo pa ga po levem.

V primeru zahtev po večji pretočni zmogljivosti se uporablja sistem dveh neodvisnih dvigal s pripadajočo dvižno mizo (slika 28b). Pri tej rešitvi TSE prihajajo v sistem po desnem valjčnem transporterju, zapuščajo pa ga tudi po desnem valjčnem transporterju. Slednje pomeni, da lahko vsako dvigalo zase deluje kot celota, zato so pretočne zmogljivosti neprimerno večje kot pri dvigalu z enojno dvižno mizo.

Hitrost dvižne mize dvigala je odvisna od izvedbe SBS/RS in lahko znaša od $v_y = 2$ m/s pa vse do $v_y = 5$ m/s.



Slika 28: Izvedbi dvigala za pomik zabojčkov v navpični smeri

Vir: lasten

Danes se v praksi poleg navedenega SBS/RS z avtomatskimi vozički v vsaki etaži skladiščnega regala (ang. *tier-captive SBS/RS*) uporabljajo različne variante SBS/RS. V nadaljevanju bodo našteje posamezne izvedbe, ki se uspešno uporabljajo v praksi.

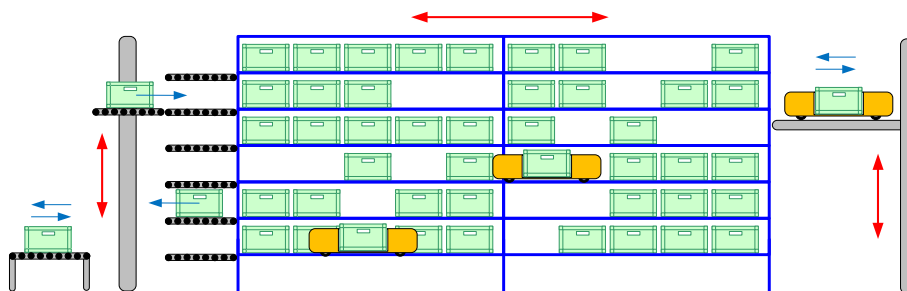
3.1.3 Posebne izvedbe SBS/RS glede na gibanje avtomatskih vozičkov

SBS/RS z dodatnim dvigalom za pomik avtomatskih vozičkov med etažami skladiščnega regala

Pri tej izvedbi SBS/RS avtomatski voziček ni dodeljen vsaki posamezni etaži skladiščnega regala, kot je prikazano na sliki 26, temveč se lahko z uporabo dvigala premika med etažami. V angleškem jeziku se navedeni sistem imenuje *tier-to-tier SBS/RS*.

Na sliki 29 imamo dve neodvisni dvigali za transport TSE in avtomatskega vozička. Na vhodu v skladišče dvigalo izvaja premik TSE v vmesne zalogovnike skladiščnega regala, medtem ko dvigalo na drugem delu skladišča izvaja premik avtomatskih vozičkov med posameznimi etažami. Tako zmanjšamo število avtomatskih vozičkov na potrebno

(zahtevano) število, da bo sistem dvigal skupaj z avtomatskimi vozički deloval z maksimalno zmogljivostjo. Sistem je fleksibilen, kar pomeni, da lahko dodajamo ali odvezujemo avtomatske vozičke glede na zahtevano pretočno zmogljivost. Dodaten strošek predstavlja dvigalo za pomik avtomatskih vozičkov med etažami, ki pa se lahko kompenzira z manjšim številom potrebnih avtomatskih vozičkov.

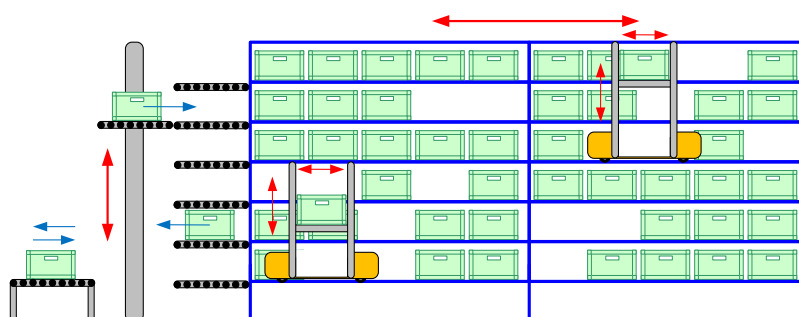


Slika 29: Izvedba SBS/RS z dodatnim dvigalom za pomik avtomatskih vozičkov med etažami skladiščnega regala

Vir: lasten

SBS/RS z avtomatskimi vozički za delo v več etažah skladiščnega regala

Pri tej izvedbi SBS/RS avtomatski voziček zagotavlja vožnjo v vodoravni (x) smeri in hkrati omogoča pomik dvižne mize avtomatskega vozička v navpični (y) smeri (slika 30). V angleškem jeziku se naveden sistem imenuje *multi-tier-captive SBS/RS*. Tako avtomatski voziček z integrirano dvižno mizo oskrbuje več etaž hkrati, kar vpliva na doseganje večje izkoriščenosti avtomatskega vozička. Na vhodu v skladišče dvigalo izvaja premik TSE v vmesne zalogovnike skladiščnega regala. Tudi pri tej izvedbi SBS/RS zmanjšamo število avtomatskih vozičkov na potrebno (zahtevano) število, da bo sistem deloval z maksimalno zmogljivostjo. Sistem je fleksibilen, kar pomeni, da lahko dodajamo ali odvezujemo avtomatske vozičke glede na zahtevano pretočno zmogljivost. Dodaten strošek predstavlja posebna izvedba avtomatskega vozička z integrirano dvižno mizo, ki pa se lahko kompenzira z manjšim številom potrebnih avtomatskih vozičkov.

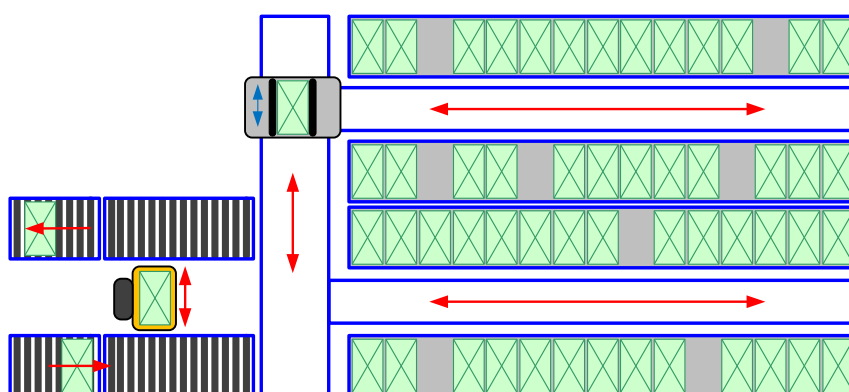


Slika 30: Izvedba SBS/RS z avtomatskimi vozički za delo v več etažah skladiščnega regala

Vir: lasten

SBS/RS z avtomatskimi vozički za vožnjo v vodoravni in prečni smeri skladiščnega regala v izbrani etaži

Pri tej izvedbi SBS/RS avtomatski voziček ni dodeljen posameznemu hodniku v etaži skladiščnega regala, temveč se lahko premika med hodniki v prečni (\approx) smeri v izbrani etaži (slika 31). V angleškem jeziku se naveden sistem imenuje *3D-level-captive shuttle carriers*. Tako avtomatski voziček oskrbuje več regalnih hodnikov v izbrani etaži skladiščnega regala, kar vpliva na doseganje večje izkoriščenosti avtomatskega vozička. Na vhodu v skladišče dvigalo izvaja premik TSE v vmesne zalogovnike skladiščnega regala. Tudi pri tej izvedbi SBS/RS zmanjšamo število avtomatskih vozičkov na potrebno (zahtevano) število, da bo sistem deloval z maksimalno zmogljivostjo. Sistem je fleksibilen, kar pomeni, da lahko dodajamo ali odvezujemo avtomatske vozičke glede na zahtevano pretočno zmogljivost. Dodaten strošek predstavlja izvedba avtomatskega vozička za transport v vzdolžni (x) in v prečni (\approx) smeri, ki pa se lahko kompenzira z manjšim številom potrebnih avtomatskih vozičkov.



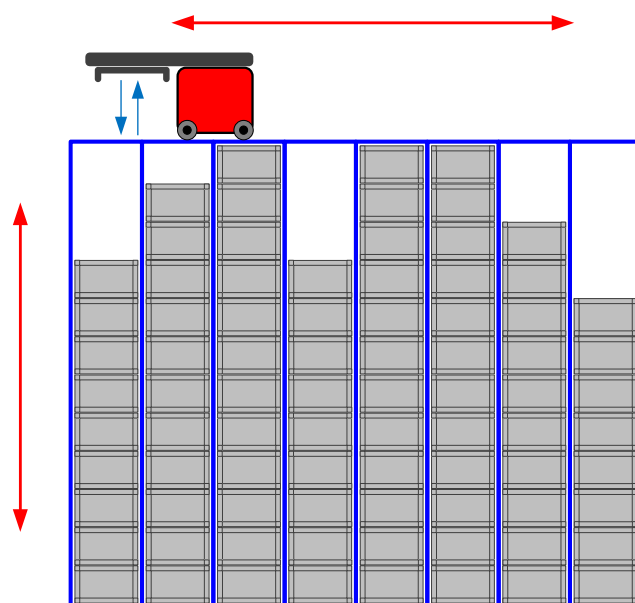
Slika 31: SBS/RS z avtomatskimi vozički za vožnjo v vodoravni in prečni smeri skladiščnega regala v izbrani etaži

Vir: lasten

Transportno-skladiščni sistem Autostore

Transportno-skladiščni sistem Autostore podjetja Swisslog (<https://www.swisslog.com/>) predstavlja posebno obliko skladišča z uporabo avtomatskih vozičkov, ki omogočajo transport v vodoravni (x) in v prečni (y) smeri, hkrati pa na osnovi dvižnega mehanizma zagotavljajo premik TSE (dvig/spust) v globino skladiščnega regala (slika 32).

Sistem Autostore zagotavlja maksimalno izkoriščenost kapacitete skladišča, saj v primerjavi z drugimi izvedbami SBS/RS za svoje delovanje ne potrebuje hodnikov za transport avtomatskih vozičkov. Le-ti so nameščeni na vrhnji ploščadi skladiščnega regala. Sistem Autostore je fleksibilen, kar pomeni, da lahko dodajamo ali odvezemamo avtomatske vozičke glede na zahtevano pretočno zmogljivost.



Slika 32: Transportno-skladiščni sistem Autostore

Vir: lasten

Dvižni mehanizem vozička omogoča dvig/spust TSE do 16 odlagalnih mest v globino skladiščnega regala. Če je treba odpremiti TSE, ki so na 16. globini regala, je treba prestaviti 15 TSE, za kar Autostore potrebuje okoli $t = 3,5$ min. Vsekakor je dolgoročno treba ustrezno planirati odlaganje TSE, da zmanjšamo manipulacijske čase uskladiščenja in odpreme TSE in tako zagotovimo maksimalno pretočno zmogljivost skladišča (slika 33).

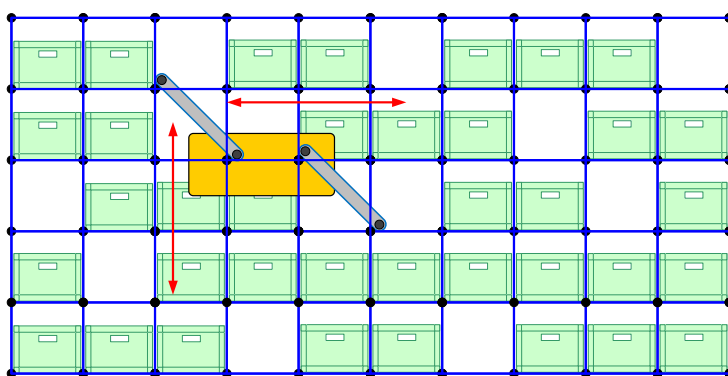


Slika 33: Uporaba transportno-skladiščnega sistema Autostore v distribucijskem centru

Vir: lasten.

SBS/RS z avtomatskimi vozički za vožnjo v vodoravni in v diagonalni smeri skladiščnega regala

Transportno-skladiščni sistem Rack Racer organizacije Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (<https://www.iml.fraunhofer.de/>) s posebno izvedbo avtomatskega vozička z nagibnim mehanizmom omogoča premikanje avtomatskega vozička v vodoravni (x) in v diagonalni (x, y) smeri (slika 34). Zaradi posebne izvedbe avtomatskega vozička ne potrebujemo dvigala za transport TSE, ki je potreben pri drugih izvedbah SBS/RS. Nagibni mehanizem avtomatskega vozička ima nameščen zobati jermen, ki omogoča premikanje na podpornih točkah v skladiščnem regalu. Sistem Rack Racer je fleksibilen, kar pomeni, da lahko dodajamo ali odvezujemo avtomatske vozičke glede na zahtevano pretočno zmogljivost. Glede na sorazmerno manjšo hitrost premikanja avtomatskega vozička je Rack Racer primeren za srednje velike pretočne zmogljivosti skladišča.



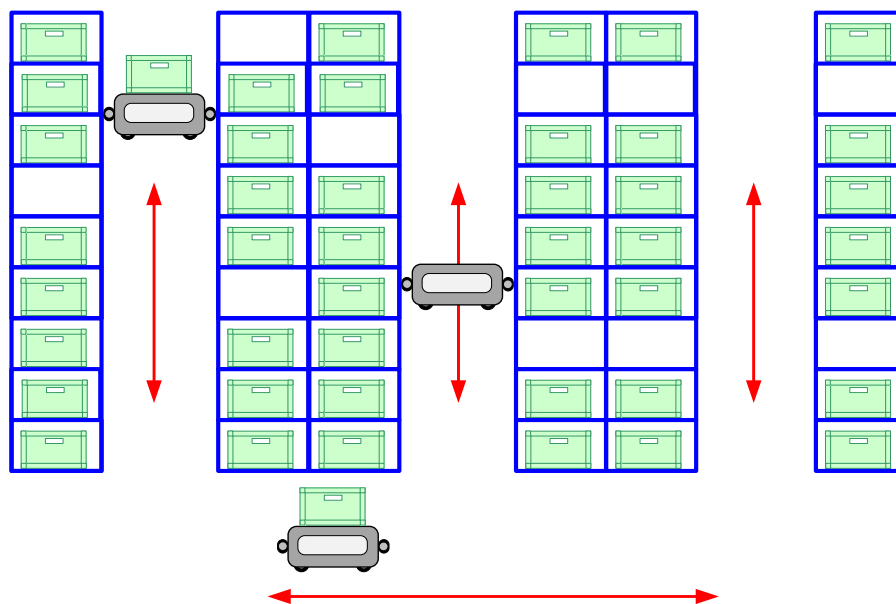
Slika 34: SBS/RS z avtomatskim vozičkom Rack Racer za vožnjo v vodoravni in v diagonalni smeri skladiščnega regala

Vir: lasten

SBS/RS z avtomatskimi vozički za vožnjo v vodoravni in v navpični smeri skladiščnega regala Skypod

Transportno-skladiščni sistem Skypod podjetja Exotec (<https://www.exotec.com/>) s posebno izvedbo avtomatskega vozička ima na obeh straneh nameščen poseben pogonski mehanizem za premik v navpični smeri (slika 35). Avtomatski voziček se v regalnem hodniku pred izbranim stolpcem pripne na vodila, nameščena na skladiščnem regalu, kar omogoča premikanje avtomatskega vozička v navpični (y) smeri. Zaradi posebne izvedbe avtomatskega vozička ne potrebujemo dvigala za transport TSE, ki je potreben pri drugih izvedbah SBS/RS. Sistem Skypod je fleksibilen, kar pomeni, da lahko dodajamo ali odvezujemo avtomatske vozičke glede na zahtevano pretočno zmogljivost. Po izvedbi

operacije uskladiščenja ali odpreme TSE vozički potujejo do komisionirnega delovnega mesta (primer dobre ergonomske rešitve), kjer se izvede proces komisioniranja. Avtomatski vozički potujejo s hitrostjo tudi do $v_x = 4$ m/s in lahko prenašajo tovor do $m = 30$ kg.



Slika 35: SBS/RS z avtomatskimi vozički za vožnjo v vodoravni in v navpični smeri skladiščnega regala
Skypod
Vir: lasten

3.2 Pretočna zmogljivost SBS/RS

Za določitev pretočne zmogljivosti SBS/RS, merjene v TSE/uro, se v literaturi in v praksi uporabljajo analitični in numerični modeli, ki ponazarjajo delovanje izbranega SBS/RS skladiščnega sistema.

Obstajajo različni časovno-odvisni modeli, ki za vožnjo avtomatskih vozičkov in pomika dvižne mize dvigala upoštevajo: (i) enakomerno hitrostno-časovno odvisnost ($v = \text{konst.}$) in (ii) hitrostno-časovno odvisnost, ki poleg enakomerne hitrosti upošteva tudi vpliv pospeševanja in pojemanja ($v \neq \text{konst.}$).

Poleg predpostavke o izbrani hitrostno-časovni odvisnosti je v veliki večini modelov upoštevana uporaba enakomerne statistične porazdelitve, kjer ima vsaka skladiščna lokacija enako verjetnost, da bo izbrana za proces uskladiščenja ali odpreme TSE.

V nadaljevanju bodo predstavljeni modeli za določitev pretočne zmogljivosti posameznega SBS/RS pri enojnem (SC) in dvojnem (DC) delovnem ciklu avtomatskega vozička in dvižne mize dvigala.

3.2.1 SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu

Analitični model za določitev pretočne zmogljivosti SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu (ang. *tier-captive SBS/RS*) upošteva hitrostno-časovno odvisnost, ki poleg enakomerne hitrosti upošteva tudi vpliv pospeševanja in pojemanja ($v \neq \text{konst.}$).

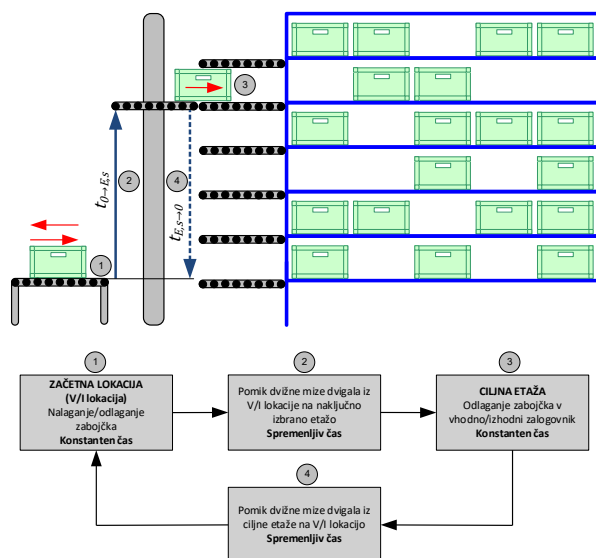
Pri izpeljavi pričakovane (povprečne) vrednosti manipulacijskega časa enojnega (SC) in dvojnega (DC) delovnega cikla avtomatskega vozička (SCAR) in dvižne mize dvigala (LIFT) je uporabljen model avtorjev Bozerja in Whita, 1984.

V nadaljevanju bodo najprej izpeljani izrazi $E(\text{SC})_{\text{LIFT}}$, $E(\text{DC})_{\text{LIFT}}$, $\lambda(\text{SC})_{\text{LIFT}}$ in $\lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}}$ za dvižno mizo dvigala in nato še izrazi $E(\text{SC})_{\text{SCAR}}$, $E(\text{DC})_{\text{SCAR}}$, $\lambda(\text{SC})_{\text{SCAR}}$ in $\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}$ za avtomatski voziček.

Dvižna miza dvigala

Enojni delovni cikel

Potek enojnega (SC) delovnega cikla dvižne mize dvigala je prikazan in obrazložen na sliki 36. Enojni (SC) delovni cikel se navezuje na pomik dvižne mize od V/I-lokacije do naključno izbrane etaže (m) skladiščnega regala, kjer se izvrši uskladiščenje ali odprema zabojčka.



Slika 36: Potek enojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala

Vir: lasten

Za primer enojnega delovnega cikla uporabimo porazdelitveno funkcijo $F(z)$ avtorjev Bozerja in Whita, 1984, ki je enaka izrazu (3.2):

$$F_y(z) = \begin{cases} \frac{z}{d_y} & 0 \leq z \leq d_y \\ 1 & z \geq d_y \end{cases} \quad (3.2)$$

Gostota verjetnosti $f_y(z)$ je enaka izrazu (3.3):

$$f_y(z) = \frac{dF(z)}{dz} = \begin{cases} \frac{1}{d_y} & 0 \leq z \leq d_y \\ 0 & z \geq d_y \end{cases} \quad (3.3)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost časa pomika dvizhne mize med V/I-lokacijo in naključno izbrano etažo skladiščnega regala je enaka izrazu (3.4):

$$\begin{aligned} E(ES)_{\text{LIFT}} &= \frac{v_y}{a_y} + \frac{1}{v_y} \cdot \int_0^{d_y} z \cdot \left(\frac{1}{d_y}\right) dz \\ &= \frac{v_y}{a_y} + \frac{d_y}{2 \cdot v_y} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega (SC) delovnega cikla $E(SC)_{\text{LIFT}}$ je enaka dvakratniku $E(ES)_{\text{LIFT}}$ in dvakratniku časa za nalaganje/odlaganje zaboječka $t_{P/S \text{ LIFT}}$ in je enaka izrazu (3.5):

$$\begin{aligned} E(SC)_{\text{LIFT}} &= 2 \cdot t_{P/S \text{ LIFT}} + 2 \cdot E(ES)_{\text{LIFT}} \\ E(SC)_{\text{LIFT}} &= 2 \cdot t_{P/S \text{ LIFT}} + 2 \cdot \left(\frac{v_y}{a_y} + \frac{H_{\text{SR}}}{2 \cdot v_y}\right) \\ E(SC)_{\text{LIFT}} &= 2 \cdot t_{P/S \text{ LIFT}} + 2 \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{H_{\text{SR}}}{v_y} \end{aligned} \quad (3.5)$$

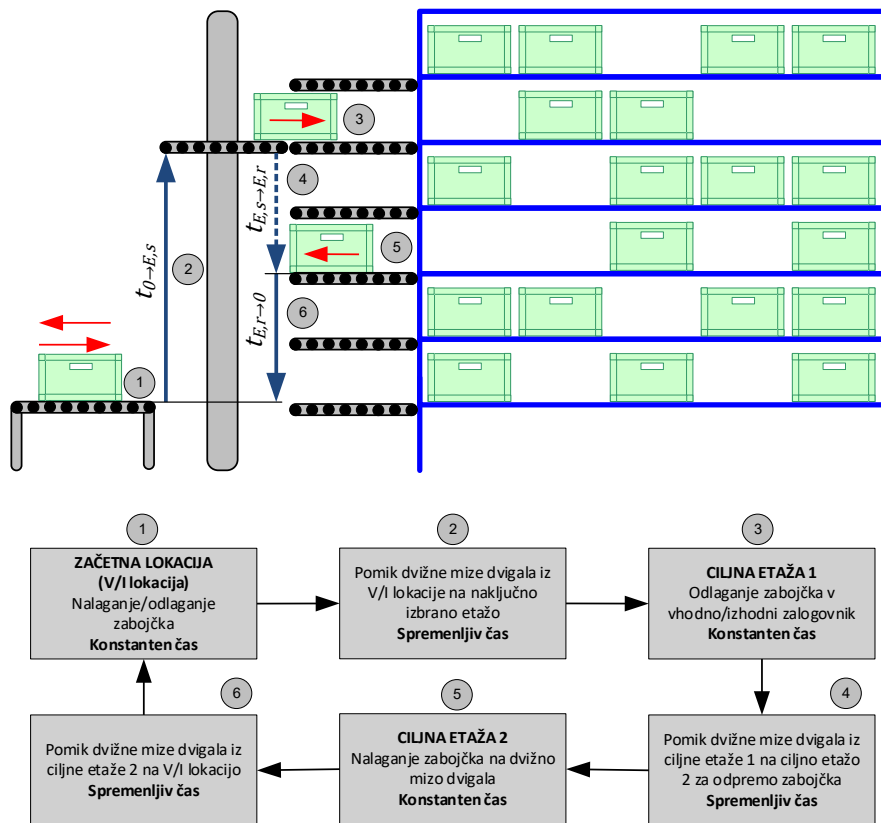
Opomba: $d_y = H_{\text{SR}}$

Pričakovana urna pretočna zmogljivost dvizhne mize dvigala pri enojnem delovnem ciklu $\lambda(SC)_{\text{LIFT}}$ je enaka izrazu (3.6):

$$\lambda(SC)_{\text{LIFT}} = \frac{3600}{E(SC)_{\text{LIFT}}} \cdot 1 \quad (3.6)$$

Dvojni delovni cikel

Potek dvojnega (DC) delovnega cikla dvizhne mize dvigala je prikazan in obrazložen na sliki 37. Dvojni (DC) delovni cikel obsega enojni delovni cikel in dodaten čas za pomik dvizhne mize med dvema naključno izbranimi etažama (m, n) skladiščnega regala, kjer se izvršita uskladiščenje zaboječka in odprema zaboječka.



Slika 37: Potek dvojnega delovnega cikla dvizhne mize dvigala

Vir: lasten

Ob upoštevanju naključne izbire etaže skladiščnega regala določimo porazdelitveno funkcijo $F_y(z)$ in gostoto verjetnosti $f_y(z)$ od z_i ($i=1, 2 \dots n$).

Za primer dvojnega delovnega cikla uporabimo porazdelitveno funkcijo $F(z)$ avtorjev Bozerja in Whita, 1984, ki je enaka izrazu (3.5):

$$F_y(z) = \begin{cases} \frac{2z}{d_y} - \frac{z^2}{d_y^2} & 0 \leq z \leq d_y \\ 1 & z \geq d_y \end{cases} \quad (3.7)$$

Gostota verjetnosti $f_y(z)$ je enaka izrazu (3.8):

$$f_y(z) = \frac{dF(z)}{dz} = \begin{cases} \frac{2}{d_y} - \frac{2z}{d_y^2} & 0 \leq z \leq d_y \\ 0 & z \geq d_y \end{cases} \quad (3.8)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost časa pomika dvizhne mize med dvema naključno izbranimi etažama (m, n) skladiščnega regala je enaka izrazu (3.9):

$$\begin{aligned} E(\text{TB})_{\text{LIFT}} &= \frac{v_y}{a_y} + \frac{1}{v_y} \cdot \int_0^{d_y} z \cdot \left(\frac{2}{d_y} - \frac{2z}{d_y^2} \right) dz \\ &= \frac{v_y}{a_y} + \frac{d_y}{3 \cdot v_y} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega (DC) delovnega cikla $E(\text{DC})$ je enaka vsoti $E(\text{SC})_{\text{LIFT}}$ in $E(\text{TB})_{\text{LIFT}}$ ter štirikratniku časa za nalaganje/odlaganje zabojevka $t_{\text{P/S LIFT}}$ in je enaka izrazu (3.10):

$$\begin{aligned} E(\text{DC})_{\text{LIFT}} &= 4 \cdot t_{\text{P/S LIFT}} + 2 \cdot E(\text{ES})_{\text{LIFT}} \\ &\quad + E(\text{TB})_{\text{LIFT}} \\ E(\text{DC})_{\text{LIFT}} &= 4 \cdot t_{\text{P/S LIFT}} + 2 \cdot \left(\frac{v_y}{a_y} + \frac{H_{\text{SR}}}{2 \cdot v_y} \right) \\ &\quad + \frac{v_y}{a_y} + \frac{H_{\text{SR}}}{3 \cdot v_y} \\ E(\text{DC})_{\text{LIFT}} &= 4 \cdot t_{\text{P/S LIFT}} + 3 \cdot \frac{v_y}{a_y} + \frac{4}{3} \cdot \frac{H_{\text{SR}}}{v_y} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Opomba: $d_y = H_{\text{SR}}$

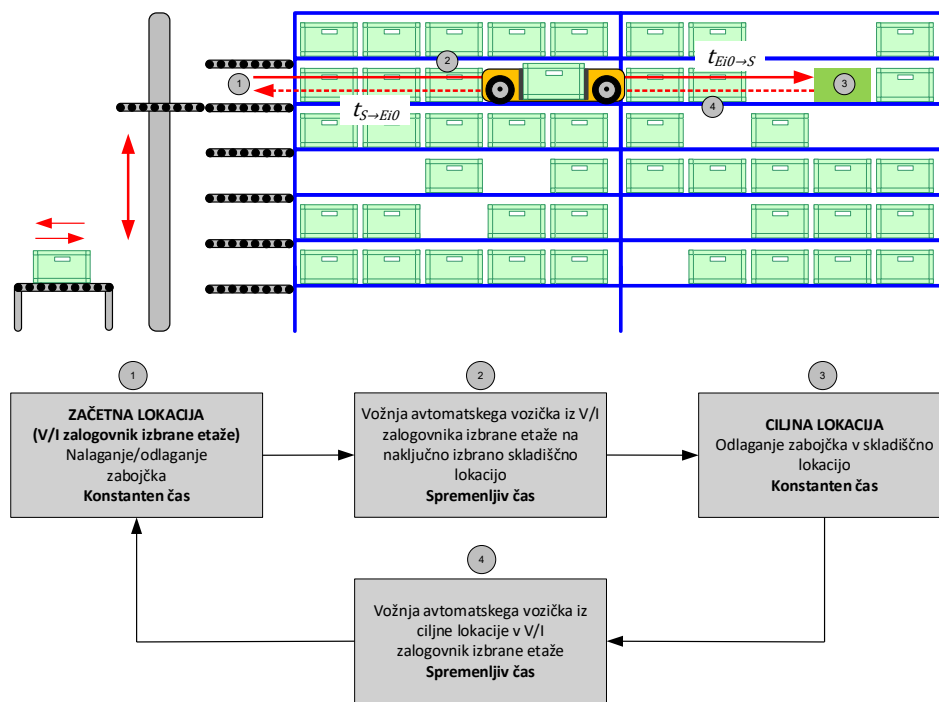
Pričakovana urna pretočna zmogljivost dvizhne mize pri dvojnem delovnem ciklu $\lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}}$ je enaka izrazu (3.11):

$$\lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}} = \frac{3600}{E(\text{DC})_{\text{LIFT}}} \cdot 2 \quad (3.11)$$

Avtomatski voziček

Enojni delovni cikel

Potek enojnega (SC) delovnega cikla avtomatskega vozička je prikazan in obrazložen na sliki 38. Enojni (SC) delovni cikel se navezuje na vožnjo avtomatskega vozička od V/I-lokacije do naključno izbranega skladiščnega mesta (s) skladiščnega regala, kjer se izvrši uskladiščenje ali odprema zabojčka.



Slika 38: Potek enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička

Vir: lasten

Čas vožnje avtomatskega vozička $t_x(z)$ do zadnjega stolpca skladiščnega regala je enak izrazu (3.12):

$$t_x(z) = \frac{v_x}{a_x} + \frac{z}{v_x} \quad 0 < z \leq d_x \quad (3.12)$$

Ob upoštevanju naključne izbire skladiščnega mesta v skladiščnem regalu določimo porazdelitveno funkcijo $F_x(z)$ in gostoto verjetnosti $f_x(z)$ od z_i ($i=1, 2 \dots n$).

Za primer enojnega delovnega cikla uporabimo porazdelitveno funkcijo $F(z)$ avtorjev Bozerja in Whita, 1984, ki je enaka izrazu (3.13):

$$F_x(z) = \begin{cases} \frac{z}{d_x} & 0 \leq z \leq d_x \\ 1 & z \geq d_x \end{cases} \quad (3.13)$$

Gostota verjetnosti $f_x(z)$ je enaka izrazu (3.14):

$$f_x(z) = \frac{dF(z)}{dz} = \begin{cases} \frac{1}{d_x} & 0 \leq z \leq d_x \\ 0 & z \geq d_x \end{cases} \quad (3.14)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost časa vožnje avtomatskega vozička med V/I-lokacijo in naključno izbrano skladiščno lokacijo (v izbrani etaži) skladiščnega regala je enaka izrazu (3.15):

$$\begin{aligned} E(ES)_{SCAR} &= \frac{v_x}{a_x} + \frac{1}{v_x} \cdot \int_0^{d_x} z \cdot \left(\frac{1}{d_x}\right) dz \\ &= \frac{v_x}{a_x} + \frac{d_x}{2 \cdot v_x} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega (SC) delovnega cikla $E(SC)_{SCAR}$ je enaka dvakratniku $E(ES)_{SCAR}$ in dvakratniku časa za nalaganje/odlaganje zaboječka $t_{P/S SCAR}$ in je enaka izrazu (3.16):

$$\begin{aligned} E(SC)_{SCAR} &= 2 \cdot t_{P/S SCAR} + 2 \cdot E(ES)_{SCAR} \\ E(SC)_{SCAR} &= 2 \cdot t_{P/S SCAR} + 2 \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{L_{SR}}{2 \cdot v_x}\right) \\ E(SC)_{SCAR} &= 2 \cdot t_{P/S SCAR} + 2 \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{L_{SR}}{v_x} \end{aligned} \quad (3.16)$$

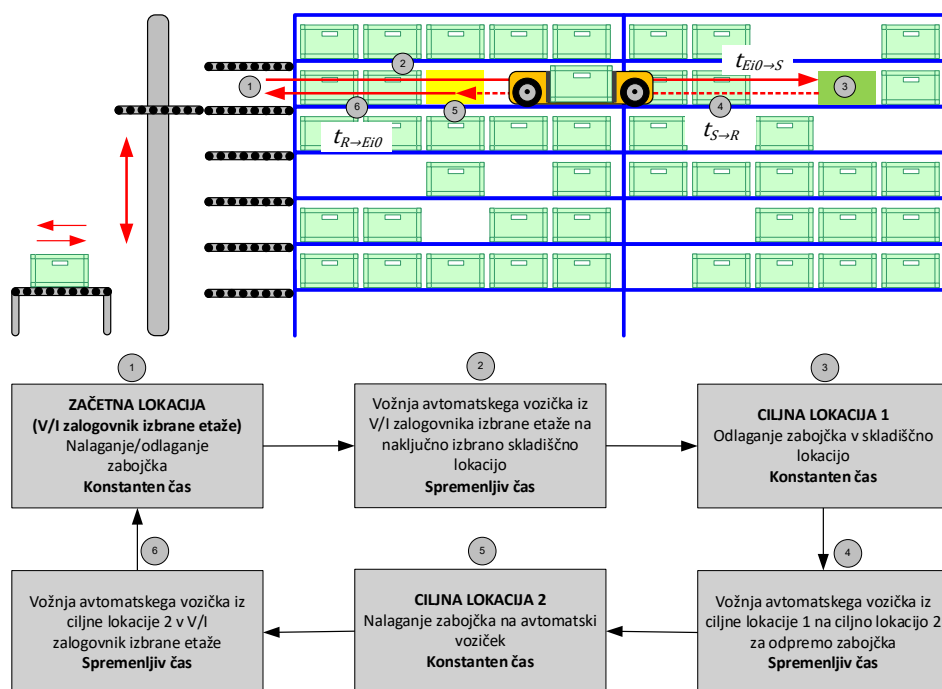
Opomba: $d_x = L_{SR}$

Pričakovana urna pretočna zmogljivost avtomatskega vozička pri enojnem delovnem ciklu $\lambda(SC)_{SCAR}$ je enaka izrazu (3.17):

$$\lambda(SC)_{SCAR} = \frac{3600}{E(SC)_{SCAR}} \cdot 1 \quad (3.17)$$

Dvojni delovni cikel

Potek dvojnega (DC) delovnega cikla avtomatskega vozička je prikazan in obrazložen na sliki 39. Dvojni (DC) delovni cikel obsega enojni delovni cikel in dodaten čas za vožnjo avtomatskega vozička med dvema naključno izbranimi skladiščnima lokacijama (s , r) skladiščnega regala, kjer se izvršita uskladiščenje zabojevka in odprema zabojevka.



Slika 39: Potek dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička

Vir: lasten

Ob upoštevanju naključne izbire skladiščnega mesta v skladiščnem regalu določimo porazdelitveno funkcijo $F_x(z)$ in gostoto verjetnosti $f_x(z)$ od z_i ($i=1, 2 \dots n$).

Za primer dvojnega delovnega cikla uporabimo porazdelitveno funkcijo $F(z)$ avtorjev Bozerja in Whita, 1984, ki je enaka izrazu (3.18):

$$F_x(z) = \begin{cases} \frac{2z}{d_x} - \frac{z^2}{d_x^2} & 0 \leq z \leq d_x \\ 1 & z \geq d_x \end{cases} \quad (3.18)$$

Gostota verjetnosti $f_x(z)$ je enaka izrazu (3.19):

$$f_x(z) = \frac{dF(z)}{dz} = \begin{cases} \frac{2}{d_x} - \frac{2z}{d_x^2} & 0 \leq z \leq d_x \\ 0 & z \geq d_x \end{cases} \quad (3.19)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost vožnje avtomatskega vozička med dvema naključno izbranimi skladiščnima lokacijama v skladiščnem regalu je enaka izrazu (3.20):

$$\begin{aligned} E(\text{TB})_{\text{SCAR}} &= \frac{v_x}{a_x} + \frac{1}{v_x} \cdot \int_0^{d_x} z \cdot \left(\frac{2}{d_x} - \frac{2z}{d_x^2} \right) dz \\ &= \frac{v_x}{a_x} + \frac{d_x}{3 \cdot v_x} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega (DC) delovnega cikla $E(\text{DC})_{\text{SCAR}}$ je enaka vsoti $E(\text{SC})_{\text{SCAR}}$ in $E(\text{TB})_{\text{SCAR}}$ ter štirikratniku časa za nalaganje/odlaganje zaboječka $t_{P/S \text{ SCAR}}$ in je enaka izrazu (3.20):

$$\begin{aligned} E(\text{DC})_{\text{SCAR}} &= 4 \cdot t_{P/S \text{ SCAR}} + 2 \cdot E(\text{ES})_{\text{SCAR}} \\ &\quad + E(\text{TB})_{\text{SCAR}} \\ E(\text{DC})_{\text{SCAR}} &= 4 \cdot t_{P/S \text{ SCAR}} + 2 \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{L_{\text{SR}}}{2 \cdot v_x} \right) \\ &\quad + \frac{v_x}{a_x} + \frac{L_{\text{SR}}}{3 \cdot v_x} \\ E(\text{DC})_{\text{SCAR}} &= 4 \cdot t_{P/S \text{ SCAR}} + 3 \cdot \frac{v_x}{a_x} + \frac{4}{3} \cdot \frac{L_{\text{SR}}}{v_x} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Opomba: $d_x = L_{\text{SR}}$

Pričakovana urna pretočna zmogljivost avtomatskega vozička pri dvojnem delovnem ciklu $\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}$ je enaka izrazu (3.21):

$$\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}} = \frac{3600}{E(\text{DC})_{\text{SCAR}}} \cdot 2 \quad (3.21)$$

Sistemska zmogljivost SBS/RS

Sistemska zmogljivost SBS/RS je odvisna od zmogljivosti avtomatskih vozičkov ali dvizhne mize dvigala. V nadaljevanju bo prikazan primer določitve sistemske zmogljivosti SBS/RS v primeru dvojnega (DC) delovnega cikla avtomatskih vozičkov in dvizhne mize dvigala.

Izkoriščenost (η) dvizhne mize dvigala/avtomatskih vozičkov je enaka izrazu (3.22):

$$\eta = \frac{\min(\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}, \lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}})}{\max(\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}, \lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}})} \quad (3.22)$$

Pričakovano ozko grlo SBS/RS, označeno s (τ), je enako izrazu (3.23):

$$\tau = \max(\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}, \lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}}) \quad (3.23)$$

Sistemska zmogljivost $\lambda(\text{DC})$ samostojnega SBS/RS (število regalnih hodnikov $A = 1$) je enaka izrazu (3.24):

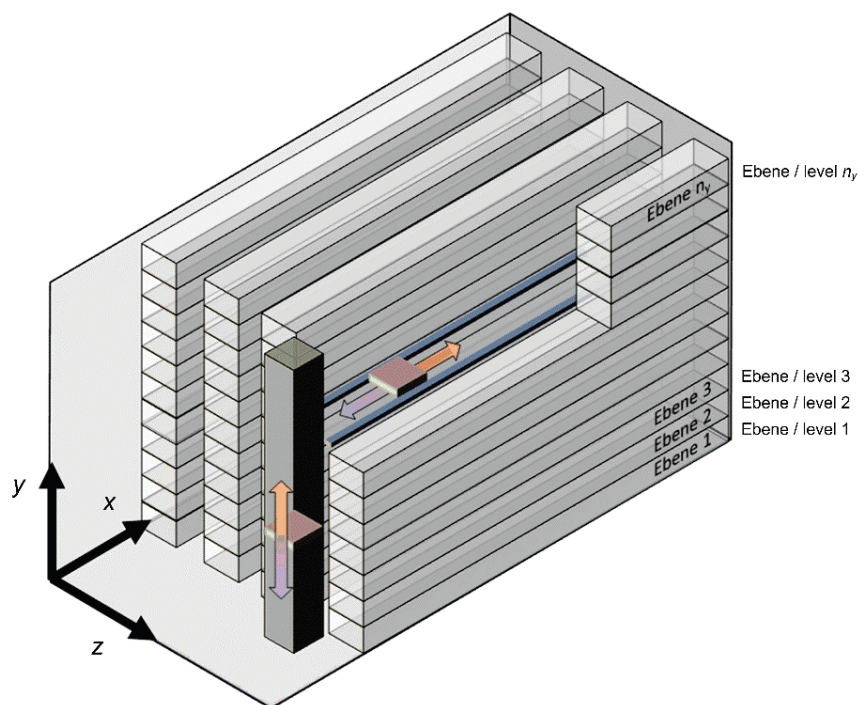
$$\lambda(\text{DC}) = \min(\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}, \lambda(\text{DC})_{\text{LIFT}}) \quad (3.24)$$

Celotna sistemska zmogljivost $\lambda(\text{DC})_{\text{SBS/RS}}$ v primeru SBS/RS z večjim številom regalnih hodnikov ($A > 1$) je enaka izrazu (3.25):

$$\lambda(\text{DC})_{\text{SBS/RS}} = A \cdot \lambda(\text{DC}) \quad (3.25)$$

3.2.2 SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu VDI 2692

Zaradi naraščajoče uporabe SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu (slika 40) je bilo izdano tehnično priporočilo VDI 2692 Blatt 1. Namen tehničnega priporočila VDI 2692 Blatt 1 je seznaniti strokovno javnost o zgradbi in delovanju SBS/RS in podati dovolj enostaven model za določitev pretočne zmogljivosti SBS/RS skladiščnega sistema.



Legenda: Ebene 1 – prva etaža, Ebene 2 – druga etaža, Ebene 3 – tretja etaža, Ebene n_y – n -ta etaža.

Slika 40: SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu, definiran po tehničnem priporočilu VDI 2692 Blatt 1

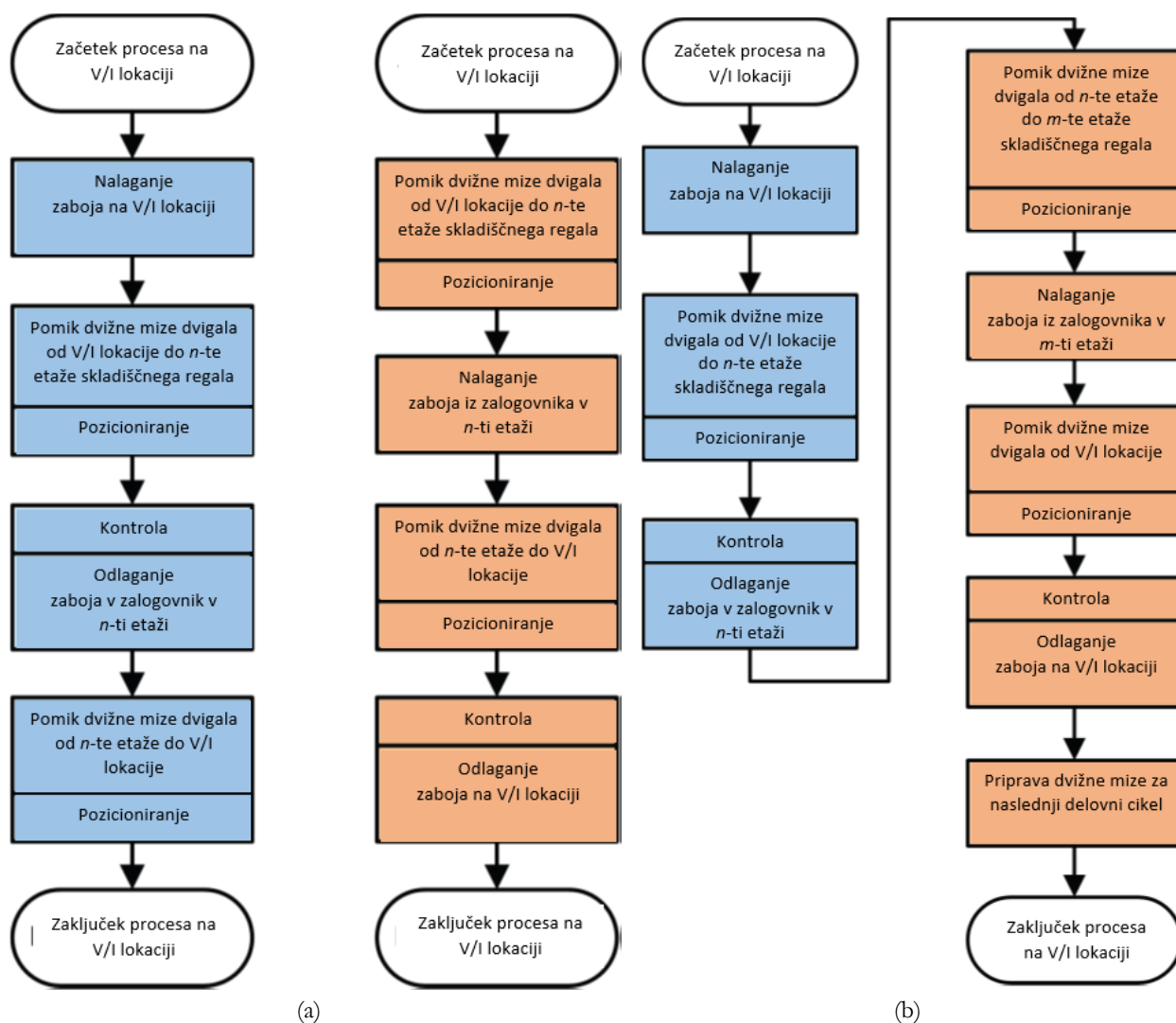
Vir: VDI 2692 Blatt 1, 2015: slika 1, str. 6, System axes

Model, predstavljen v tehničnem priporočilu VDI 2692 Blatt 1, upošteva SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu (ang. *tier-captive SBS/RS*) in hitrostno-časovno odvisnost, ki poleg enakomerne hitrosti upošteva tudi vpliv pospeševanja in pojemanja ($v \neq \text{konst.}$) ter enakomerno statistično porazdelitev.

Določitev izraza za izračun pretočne zmogljivosti SBS/RS temelji na ločeni obravnavi dvizhne mize dvigala in avtomatskega vozička.

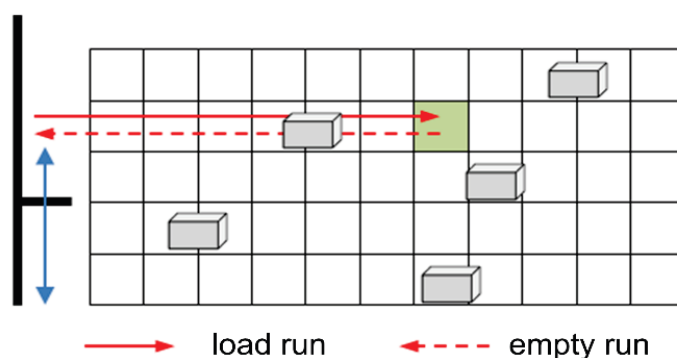
Model upošteva potek enojnega (SC) delovnega cikla (slika 41a) in dvojnega (DC) delovnega cikla (slika 41b) dvizhne mize dvigala ter enojnega (SC) in dvojnega (DC) delovnega cikla avtomatskega vozička (slika 42, slika 43).

V nadaljevanju bodo podani izrazi $s_{1,y}$, $s_{2,y}$, $t_{FE,y}$ in $t_{FD,y}$ za dvizhno mizo dvigala in izrazi $s_{1,x}$, $s_{2,x}$, $t_{FE,x}$ in $t_{FD,x}$ za avtomatski voziček. Prav tako bo podan izraz za kombinirani delovni cikel $t_{S\text{Shuttle}}$ in izraz za pretočno zmogljivost $\lambda_{S\text{Shuttle}}$ kombiniranega delovnega cikla SBS/RS.



Slika 41: Potek enojnega (a) in dvojnega (b) delovnega cikla dvizne mize dvigala po VDI 2692

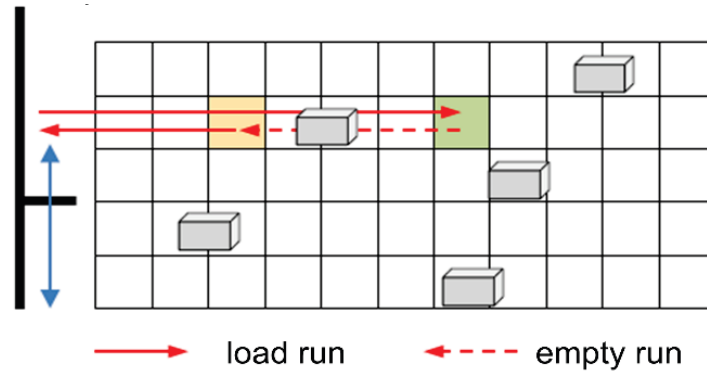
Vir: VDI 2692 Blatt 1, 2015: slika 6, str. 18, Process sequence for lift in single cycles with single load pick-up (predelava) in slika 7, str. 19, Process sequence for the vehicle lift of one double cycle (predelava)



Legenda: "load run" – delovna vožnja avtomatskega vozička in "empty run" – prazna vožnja avtomatskega vozička

Slika 42: Potek enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička po VDI 2692

Vir: VDI 2692 Blatt 1, 2015: slika 10, str. 22, Sequence of single and double cycle for the shuttle vehicle



Legenda: "load run" – delovna vožnja avtomatskega vozička in "empty run" – prazna vožnja avtomatskega vozička

Slika 43: Potek dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička po VDI 2692

Vir: VDI 2692 Blatt 1, 2015: slika 10, str. 22, Sequence of single and double cycle for the shuttle vehicle

Povprečna dolžina poti ($s_{1,y}$) dvizhne mize dvigala pri enojnem delovnem ciklu je enaka izrazu (3.26):

$$s_{1,y} = l_{0,y} + \frac{1}{2}(n_y - 1) \cdot l_y \quad (3.26)$$

Povprečna dolžina poti ($s_{2,y}$) dvizhne mize dvigala pri dvojnem delovnem ciklu je enaka izrazu (3.27):

$$s_{2,y} = l_{0,y} + \frac{2}{3}(n_y - 1) \cdot l_y \quad (3.27)$$

Opomba: $l_{0,y}$ je razdalja med vhodno/izhodno lokacijo in prvo etažo regalnega skladišča, n_y je število etaž regalnega skladišča in l_y je višina etaže regalnega skladišča.

Na podoben način določimo povprečno dolžino poti avtomatskega vozička.

Povprečna dolžina poti ($s_{1,x}$) avtomatskega vozička pri enojnem delovnem ciklu je enaka izrazu (3.28):

$$s_{1,x} = l_{0,x} + \frac{1}{2}(n_x - 1) \cdot l_x \quad (3.28)$$

Povprečna dolžina poti ($s_{2,x}$) avtomatskega vozička pri dvojnem delovnem ciklu je enaka izrazu (3.29):

$$s_{2,x} = l_{0,x} + \frac{2}{3}(n_x - 1) \cdot l_x \quad (3.29)$$

Opomba: $l_{0,x}$ je razdalja med vhodno/izhodno lokacijo in prvim stolpcem regalnega skladišča, n_x je število stolpcev regalnega skladišča in l_x je širina stolpa regalnega skladišča.

Povprečni čas ($t_{FE,y}$) enojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala je enak izrazu (3.30):

$$t_{FE,y} = 2 \cdot \left(\frac{s_{1,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) \quad (3.30)$$

$$t_{SE,y} = t_{FE,y} + 2 \cdot (t_{G,y} + t_{P,y})$$

Opomba: $t_{FE,y}$ obsega samo čas pomika dvižne mize dvigala, medtem ko $t_{SE,y}$ obsega celoten čas enojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala, vključujoč konstanten čas $t_{G,y}$ za nalaganje/odlaganje zabojčkov in konstanten čas $t_{P,y}$ za pozicioniranje dvižne mize dvigala.

Povprečni čas ($t_{FD,y}$) dvojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala je enak izrazu (3.31):

$$t_{FD,y} = 2 \cdot \left(\frac{s_{2,y}}{v_y} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{v_y}{a_y} \quad (3.31)$$

$$t_{SD,y} = t_{FD,y} + 2 \cdot t_{G,x} + 2 \cdot t_{G,y} + 3 \cdot t_{P,y}$$

Opomba: $t_{FD,y}$ obsega samo čas pomika dvižne mize dvigala, medtem ko $t_{SD,y}$ obsega celoten čas dvojnega delovnega cikla dvižne mize dvigala, vključujoč konstanten čas $t_{G,x}$ in $t_{G,y}$ za nalaganje/odlaganje zabojčkov in konstanten čas $t_{P,y}$ za pozicioniranje dvižne mize dvigala.

Povprečni čas ($t_{FE,x}$) enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička je enak izrazu (3.32):

$$t_{FE,x} = 2 \cdot \left(\frac{s_{1,x}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) \quad (3.32)$$

$$t_{SE,x} = t_{FE,x} + 2 \cdot (t_{G,x} + t_{P,x})$$

Opomba: $t_{FE,x}$ obsega samo čas vožnje avtomatskega vozička, medtem ko $t_{SE,x}$ obsega celoten čas enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička, vključujoč konstanten čas $t_{G,x}$ za nalaganje/odlaganje zabojčkov ter konstanten čas $t_{P,x}$ za pozicioniranje avtomatskega vozička.

Povprečni čas ($t_{FD,x}$) dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička je enak izrazu (3.33):

$$t_{FD,x} = 2 \cdot \left(\frac{s_{2,x}}{v_x} + \frac{v_x}{a_x} \right) + \frac{v_x}{a_x} \quad (3.33)$$

$$t_{SD,x} = t_{FD,x} + 4 \cdot t_{G,x} + 3 \cdot t_{P,x}$$

Opomba: $t_{FD,x}$ obsega samo čas vožnje avtomatskega vozička, medtem ko $t_{SD,x}$ obsega celoten čas enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička, vključujoč konstanten čas $t_{G,x}$ za nalaganje/odlaganje zabojčkov ter konstanten čas $t_{P,x}$ za pozicioniranje avtomatskega vozička.

Kombinirani povprečni čas ($t_{SShuttle}$) dvojnega delovnega cikla dvizne mize dvigala in avtomatskega vozička je enak izrazu (3.34):

$$t_{SShuttle} = t_{FD,x} + t_{FD,y} + 4 \cdot t_{G,x} + 3 \cdot (t_{P,x} + t_{P,y}) + t_W \quad (3.34)$$

Opomba: t_W se navezuje na (morebitni) čakalni čas.

Pretočna urna zmogljivost ($\lambda_{SShuttle}$) kombiniranega delovnega cikla dvizne mize dvigala in avtomatskega vozička je enak izrazu (3.35):

$$\lambda_{SShuttle} = \frac{3600}{t_{SShuttle}} \left(\frac{n_{DC}}{\text{uro}} \right) \quad (3.35)$$

Opomba: n_{DC} je število dvojnih delovnih ciklov.

3.2.3 SBS/RS z avtomatskimi vozički za delo v več etažah skladiščnega regala

Analitični model za določitev pretočne zmogljivosti SBS/RS z avtomatskimi vozički za delo v več etažah skladiščnega regala (ang. *multi-tier-captive SBS/RS*) upošteva hitrostno-časovno odvisnost, ki poleg enakomerne hitrosti upošteva tudi vpliv pospeševanja in pojemanja ($v \neq \text{konst.}$).

Pri izpeljavi pričakovane (povprečne) vrednosti manipulacijskega časa enojnega (SC) in dvojnega (DC) delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah skladiščnega regala (SCAR) je uporabljen model avtorja Gudehusa, 1973.

Opomba: Izrazi za izračun pričakovane vrednosti manipulacijskega časa enojnega $E(SC)_{LIFT}$ in dvojnega $E(DC)_{LIFT}$ delovnega cikla ter pretočne zmogljivosti dvizne mize dvigala $\lambda(SC)_{LIFT}$ in $\lambda(DC)_{LIFT}$ so enaki kot v poglavju 3.2.1 za sistem SBS/RS z avtomatskimi vozički v skladiščnem regalu.

V nadaljevanju bodo najprej izpeljani izrazi $E(SC)_{SCAR}^{MTC}$, $E(SC)_{SCAR}^{MTC}$ in $\lambda(SC)_{SCAR}^{MTC}$ pri enojnem delovnem ciklu in $E(DC)_{SCAR}^{MTC}$, $E(DC)_{SCAR}^{MTC}$ in $\lambda(DC)_{SCAR}^{MTC}$ pri dvojnem delovnem ciklu avtomatskega vozička za delo v več etažah.

Faktor oblike (b) je enak izrazu (3.36):

$$b = \frac{H_{SR}}{L_{SR}} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (3.36)$$

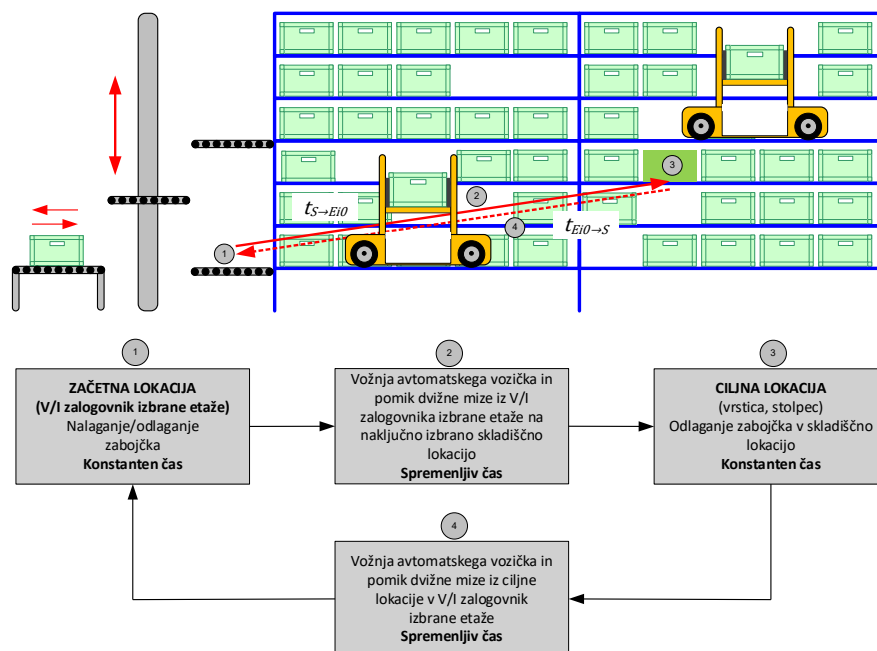
Površina skladiščnega regala (A) je enaka izrazu (3.37):

$$A = H_{SR} \cdot L_{SR} = \text{konst.} \quad (3.37)$$

Na osnovi modela avtorja Gudehusa, 1973, so določeni izrazi za določitev manipulacijskega časa enojnega (SC) in dvojnega (DC) delovnega cikla ter pretočna zmogljivost.

Enojni delovni cikel

Potek enojnega (SC) delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah je prikazan in obrazložen na sliki 44.



Slika 44: Potek enojnega delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah skladiščnega regala

Vir: lasten

Enojni (SC) delovni cikel se navezuje na vožnjo avtomatskega vozička v vodoravni (x) smeri in pomik dvižne mize avtomatskega vozička v navpični (y) smeri od V/I-lokacije do naključno izbrane etaže (m) in stolpca (n) skladiščnega regala, kjer se izvrši uskladiščenje ali odprema zabojčka.

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega (SC) delovnega cikla $E(SC_1)_{SCAR}^{MTC}$, kadar je ($b \leq 1$), je enaka izrazu (3.38):

$$\begin{aligned}
 E(SC_1)_{SCAR}^{MTC} &= 2 \cdot t_{P/S}^{MTC} + \frac{L_{SR}}{v_x} + \frac{2v_x}{a_x} \\
 &+ \frac{A \cdot v_x}{L_{SR}^2 \cdot a_y} + \frac{A^2 \cdot v_x}{3L_{SR}^3 \cdot v_y^2} \\
 &- \frac{A \cdot v_x^2}{L_{SR}^2 \cdot a_x \cdot v_y}
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa enojnega (SC) delovnega cikla $E(SC_2)_{SCAR}^{MTC}$, kadar je ($b > 1$), je enaka izrazu (3.39):

$$\begin{aligned}
 E(SC_2)_{SCAR}^{MTC} &= 2 \cdot t_{P/S}^{MTC} + \frac{A}{L_{SR} \cdot v_y} + \frac{2v_y}{a_y} \\
 &+ \frac{L_{SR}^2 \cdot v_y}{A \cdot a_x} + \frac{L_{SR}^3 \cdot v_y}{3A \cdot v_x^2} - \frac{L_{SR}^2 \cdot v_y^2}{A \cdot a_y \cdot v_x}
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

Pričakovana urna pretočna zmogljivost enojnega (SC) delovnega cikla $\lambda(SC)_{SCAR}^{MTC}$ je enaka izrazu (3.40):

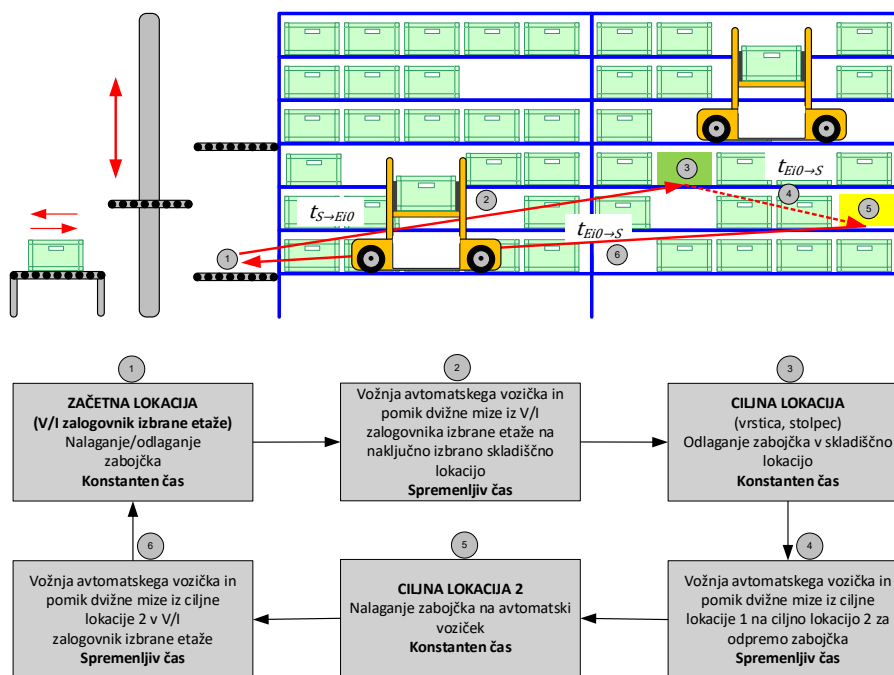
$$\lambda(SC)_{SCAR}^{MTC} = \frac{3600}{E(SC_i)_{SCAR}^{MTC}} \cdot 1 \tag{3.40}$$

Opomba: ($i = 1, 2$)

Dvojni delovni cikel

Potek dvojnega (DC) delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah je prikazan in obrazložen na sliki 45. Dvojni (DC) delovni cikel obsega enojni (SC) delovni cikel in dodaten čas za vožnjo avtomatskega vozička za delo v več etažah med dvema

naključno izbranimi skladiščnima lokacijama (s , r) skladiščnega regala, kjer se izvršita uskladiščenje zabojčka in odprema zabojčka.



Slika 45: Potek dvojnega delovnega cikla avtomatskega vozička za delo v več etažah skladiščnega regala

Vir: lasten

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega (DC) delovnega cikla $E(\text{DC}_1)_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}}$, kadar je ($b \leq 1$), je enaka izrazu (3.41):

$$\begin{aligned}
 E(\text{DC}_1)_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}} &= 4 \cdot t_{\text{P/S SCAR}}^{\text{MTC}} + \frac{4L_{\text{SR}}}{3v_x} + \frac{3v_x}{a_x} \\
 &+ \frac{3A \cdot v_x}{2L_{\text{SR}}^2 \cdot a_y} - \frac{A^3 \cdot v_x^2}{30L_{\text{SR}}^5 \cdot v_y^3} \\
 &+ \frac{A^2 \cdot v_x}{2L_{\text{SR}}^3 \cdot v_y^2} - \frac{3A \cdot v_x^2}{2L_{\text{SR}}^2 \cdot a_x \cdot v_y}
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Pričakovana (povprečna) vrednost manipulacijskega časa dvojnega (DC) delovnega cikla $E(\text{DC}_2)_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}}$, kadar je ($b > 1$), je enaka izrazu (3.42):

$$\begin{aligned}
 E(\text{DC}_2)_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}} &= 4 \cdot t_{\text{P/S SCAR}}^{\text{MTC}} + \frac{4A}{3L_{\text{SR}}v_y} + \frac{3v_y}{a_y} \\
 &+ \frac{2L_{\text{SR}}^2 \cdot v_y}{2A \cdot a_x} - \frac{L_{\text{SR}}^5 \cdot v_y^2}{30A^2 \cdot v_x^3} + \frac{L_{\text{SR}}^3 \cdot v_y}{2A \cdot v_x^2} \\
 &- \frac{3L_{\text{SR}}^2 \cdot v_y^2}{2A \cdot a_y \cdot v_x}
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

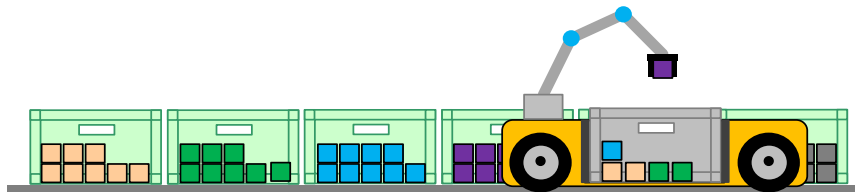
Pričakovana urna pretočna zmogljivost dvojnega (DC) delovnega cikla $\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}}$ je enaka izrazu (3.43):

$$\lambda(\text{DC})_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}} = \frac{3600}{E(\text{DC}_i)_{\text{SCAR}}^{\text{MTC}}} \cdot 2 \tag{3.43}$$

Opomba: ($i = 1, 2$)

3.2.4 SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko – varianta I

Za potrebe robotskega komisioniranja se lahko uporabijo posebne izvedbe avtomatskih vozičkov z integrirano robotsko roko (slika 46) za izvedbo procesa robotskega komisioniranja posameznih artiklov v skladiščnem regalu (Lerher, 2018).



Slika 46: Avtomatski voziček z integrirano robotsko roko – varianta I

Vir: lasten

Navedeni skladiščni sistem se razlikuje od klasičnega SBS/RS, kjer avtomatski vozički izvajajo uskladiščenje in odpremo TSE, medtem ko se proces komisioniranja artiklov izvaja na komisionirnih (delovnih) mestih zunaj skladiščnega regala.

Glede na naročilo v delovnem nalogu avtomatski voziček izvaja vožnjo v izbrani etaži skladiščnega regala, medtem ko robotska roka izvaja komisioniranje artiklov iz izbranih skladiščnih mest v skladiščnem regalu. Za zagotavljanje neoviranega dostopa robotske roke do izbranega skladiščnega mesta v skladiščnem regalu mora biti višina etaže le-temu prilagojena in dovolj visoka. Slednje ima za posledico sorazmerno veliko praznega prostora med posameznimi etažami in posledično slabšo kapaciteto skladišča.

Navedenemu se lahko izognemo z uporabo posebne oblike avtomatskega vozička, kar bo navedeno v nadaljevanju, in sicer v poglavjih 3.2.5 in 3.2.6. Zmogljivost SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko je odvisna od števila posameznih voženj avtomatskega vozička za izvedbo naročila posameznega delovnega naloga. Avtomatski voziček se v okviru delovnega cikla premika po regalnem hodniku v vodoravni (x) smeri v i -ti etaži skladiščnega regala in izvaja proces robotskega komisioniranja. Na zaključku procesa komisioniranja se vrne v izhodiščno lokacijo, kjer odloži komisionirni zabojček z nabranimi artikli, ki je pripravljen za odpremo.

V nadaljevanju bo predstavljen analitični model pri enodimenzionalnem načinu komisioniranja v regalnem hodniku avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko z urejenim zaporedjem obiska skladiščnih lokacij delovnega naloga (Ten Hompel et al., 2011).

Povprečni čas vožnje (t_n) avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko za obisk (n) komisionirnih lokacij je enak izrazu (3.44):

$$t_n = t_n^{x+} + t_n^{x-} \quad (3.44)$$

Izraz (t_n^{x+}) predstavlja delež povprečnega časa vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko pri procesu komisioniranja in je v odvisnosti od pogoja, ali voziček doseže maksimalno hitrost, enak izrazu (3.45):

$$t_n^{x+} = \begin{cases} \frac{s_n}{2v_x} + n \frac{v_x}{a_x}, & \text{kadar velja } \frac{s_n}{2n} \geq \frac{v_x^2}{a_x} \\ 2n \sqrt{\frac{s_n}{2na_x}}, & \text{kadar velja } \frac{s_n}{2n} < \frac{v_x^2}{a_x} \end{cases} \quad (3.45)$$

Izraz (t_n^{x-}) predstavlja delež povprečnega časa vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko pri vračanju vozička (brez ustavljanja) na vhodno/izhodno lokacijo v i -ti etaži skladiščnega regala in je v odvisnosti od pogoja, ali voziček doseže maksimalno hitrost, enak izrazu (3.46):

$$t_n^{x-} = \begin{cases} \frac{s_n}{2v_x} + \frac{v_x}{a_x}, & \text{kadar velja } \frac{s_n}{2n} \geq \frac{v_x^2}{a_x} \\ 2 \sqrt{\frac{s_n}{2a_x}}, & \text{kadar velja } \frac{s_n}{2n} < \frac{v_x^2}{a_x} \end{cases} \quad (3.46)$$

Ob upoštevanju naključne izbire skladiščnega mesta v i -ti etaži skladiščnega regala z uporabo enakomerne statistične porazdelitve, porazdelitvene funkcije $F_x(z)$ in gostote verjetnosti $f_x(z)$ od spremenljivke z_i ($i = 1, 2 \dots n$) je izpeljan izraz za dolžino poti vožnje avtomatskega vozička v skladiščnem regalu (s_n), ki je enak izrazu (3.47):

$$s_n = 2L_{SR} \cdot \frac{n}{n+1} \quad (3.47)$$

Ob upoštevanju pogoja ($s_n/2n \geq v_x^2/a_x$) je povprečni čas vožnje (t_n) avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko za (n) komisionirnih lokacij enak izrazu (3.48):

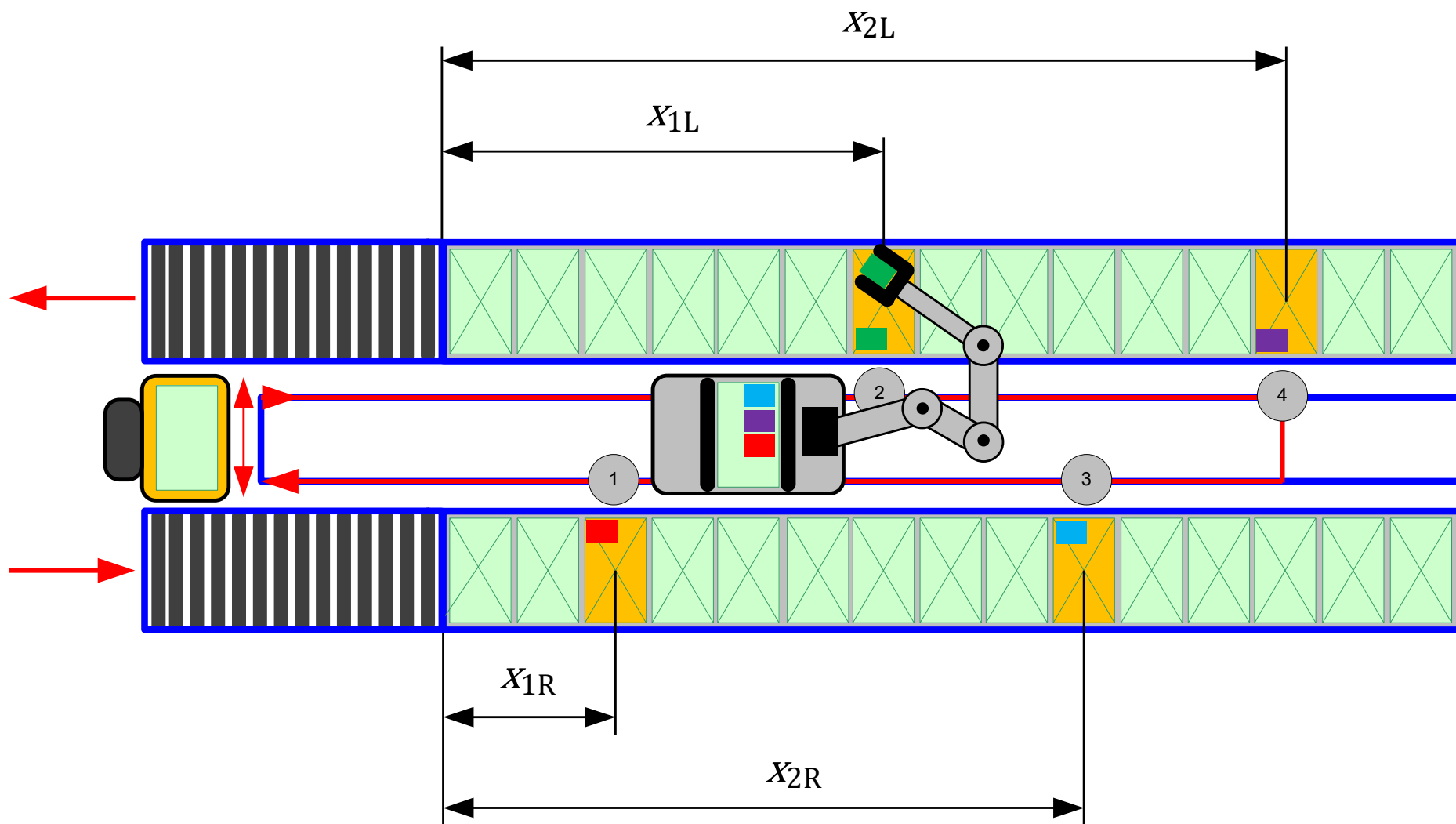
$$t_n = 2 \frac{n}{(n+1)} \cdot \frac{L_{SR}}{v_x} + (n+1) \cdot \frac{v_x}{a_x} \quad (3.48)$$

Za celoten delovni cikel procesa komisioniranja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko je treba prišteti še čas manipulacije z robotsko roko pri procesu robotskega komisioniranja in čas za nalaganje/odlaganje komisionirnega zabojevčka pri obisku (n) skladiščnih lokacij.

Pretočna zmogljivost v primeru obiska štirih ($n = 4$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala (slika 47)

Povprečni čas večkratnega delovnega cikla v primeru obiska štirih ($n = 4$) skladiščnih lokacij $T(\text{MC}_4)$ v i -ti etaži skladiščnega regala je enak izrazu (3.49):

$$T(\text{MC}_4) = 2 \frac{n}{(n+1)} \cdot \frac{L_{SR}}{v_x} + (n+1) \cdot \frac{v_x}{a_x} + 2t_{P/S \text{ tote}} + 4t_{P/S \text{ item}} \quad (3.49)$$



Slika 47: Primer obiska štirih ($n = 4$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala

Vir: lasten

Pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla v primeru obiska štirih ($n = 4$) skladiščnih lokacij $\tau(\text{MC}_4)$ v i -ti etaži skladiščnega regala je enaka izrazu (3.50):

$$\tau(\text{MC}_4) = \frac{3600}{T(\text{MC}_4)} \cdot 4 \left[\frac{\text{artiklov}}{\text{uro}} \right] \quad (3.50)$$

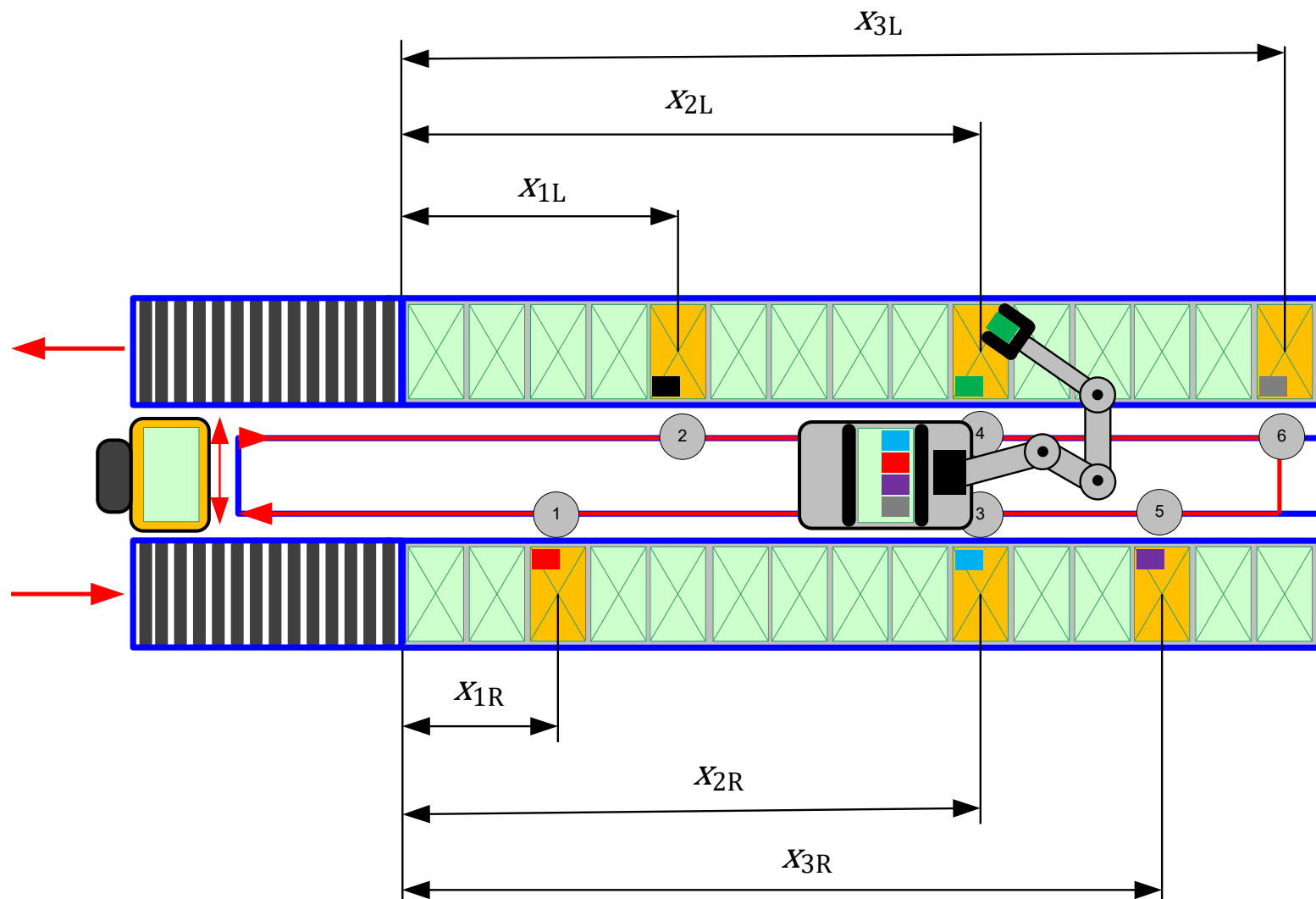
Pretočna zmogljivost v primeru obiska šestih ($n = 6$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala (slika 48)

Povprečni čas večkratnega delovnega cikla v primeru obiska šestih ($n = 6$) skladiščnih lokacij $T(\text{MC}_6)$ v i -ti etaži skladiščnega regala je enak izrazu (3.51):

$$T(\text{MC}_6) = 2 \frac{n}{(n+1)} \cdot \frac{L_{\text{SR}}}{v_x} + (n+1) \cdot \frac{v_x}{a_x} + 2t_{\text{P/S tote}} + 6t_{\text{P/S item}} \quad (3.51)$$

Pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla v primeru obiska šestih ($n = 6$) skladiščnih lokacij $\tau(\text{MC}_6)$ v i -ti etaži skladiščnega regala je enaka izrazu (3.52):

$$\tau(\text{MC}_6) = \frac{3600}{T(\text{MC}_6)} \cdot 6 \left[\frac{\text{artiklov}}{\text{uro}} \right] \quad (3.52)$$



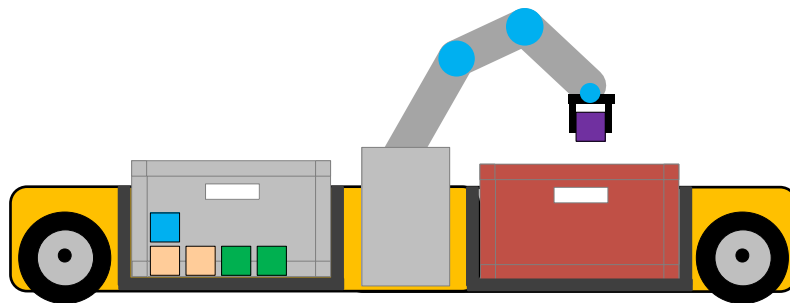
Slika 48: Primer obiska šestih ($n = 6$) skladiščnih lokacij v i -ti etaži skladiščnega regala

Vir: lasten

3.2.5 SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko – varianta II

Slabost avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante I lahko odpravimo s posebno izvedbo avtomatskega vozička, ki ima hkrati dva pomična mehanizma za manipulacijo komisiornega in skladiščnega zabojčka (slika 49).

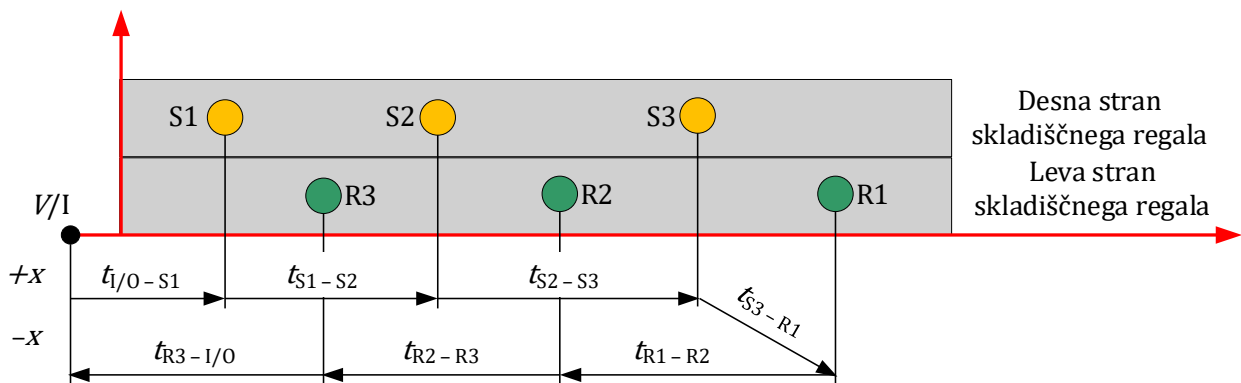
Pri procesu komisioriranja pomični mehanizem izvzame iz skladiščne lokacije zabojček, iz katerega nato prelaga artikle v komisiorirni zabojček. Z uporabo možnosti manipulacije dveh zabojčkov hkrati na avtomatskem vozičku ni več potrebe po izrazito visokih etažah skladišča, saj se proces komisioriranja z robotsko roko izvaja direktno na avtomatskem vozičku.



Slika 49: Avtomatski voziček z integrirano robotsko roko – varianta II

Vir: lasten

Pri določitvi pretočne zmogljivosti avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II je bil uporabljen model avtorja Vidovics, 1994 (slika 50).



Slika 50: Vožnja avtomatskega vozička pri robotskem komisioriranju artiklov v skladiščnem regalu

Vir: lasten

Čas vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko $T(ES)_{SCAR}$ med V/I-lokacijo in naključno izbrano skladiščno lokacijo v j -ti etaži skladiščnega regala je v odvisnosti od pogoja, ali voziček doseže maksimalno hitrost, enak izrazu (3.53):

$$T(ES)_{SCAR} = \begin{cases} \frac{s_x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x}, & \text{kadar velja pogoj } s_x > \frac{v_x^2}{a_x} \\ 2 \sqrt{\frac{s_x}{a_x}}, & \text{kadar velja pogoj } s_x \leq \frac{v_x^2}{a_x} \end{cases} \quad (3.53)$$

Opomba: $s_x = L_{SR}/(j+1) + d_x; j = n/2$

Čas vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko $T(TB)_{SCAR}$ med dvema naključno izbranimi skladiščnima lokacijama v j -ti etaži skladiščnega regala je v odvisnosti od pogoja, ali voziček doseže maksimalno hitrost, enak izrazu (3.54):

$$T(TB)_{SCAR} = \begin{cases} \frac{s_x}{v_x} + \frac{v_x}{a_x}, & \text{kadar velja pogoj } s_x > \frac{v_x^2}{a_x} \\ 2 \sqrt{\frac{s_x}{a_x}}, & \text{kadar velja pogoj } s_x \leq \frac{v_x^2}{a_x} \end{cases} \quad (3.54)$$

Opomba: $s_x = L_{SR}/(j+1); j = n/2$

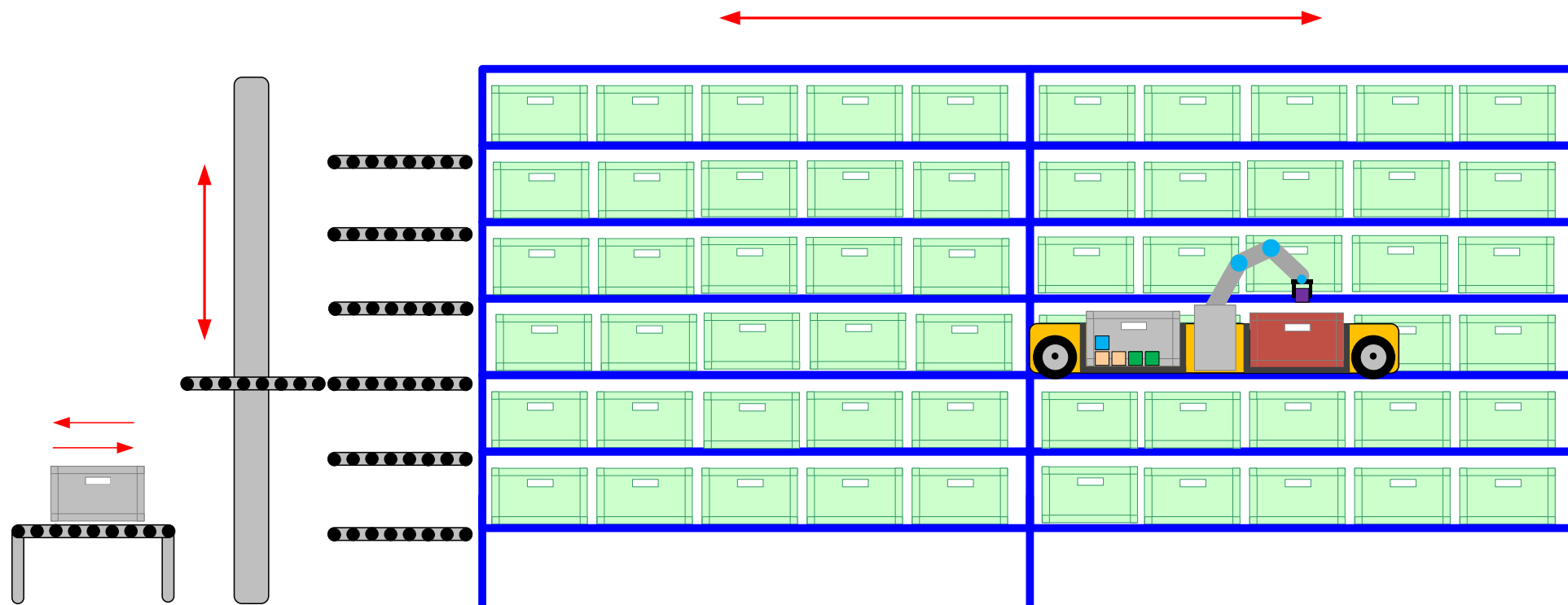
Povprečni čas večkratnega delovnega cikla v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij $T(MC_n)$ v j -ti etaži skladiščnega regala je enak izrazu (3.55):

$$T(MC_n) = 2T(ES)_{SCAR} + (n-1)T(TB)_{SCAR} + n(2t_{P/S \text{ tote}} + t_{P/S \text{ item}}) \quad (3.55)$$

Pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij v j -ti etaži skladiščnega regala $\tau(MC_n)$ je enaka izrazu (3.56):

$$\tau(MC_n) = \frac{3600}{T(MC_n)} \cdot n \left[\frac{\text{artiklov}}{\text{uro}} \right] \quad (3.56)$$

SBS/RS z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko – varianta II je prikazan na sliki 51.



Slika 51: SBS/RS z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko – varianta II

Vir: lasten

Za določitev pretočne zmogljivosti avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II je bil izdelan program v orodju MATLAB.

```

%*****Vhodni podatki*****
L = 30
dx = 1.5
vx = 3
ax = 1.2
n = 6
j = n/2
t_p_s = 3.4
t_rob = 10

%*****Rezultat odvisen od dolžine skladišča*****
L_komb = 30:10:150
k = size(L_komb,2)

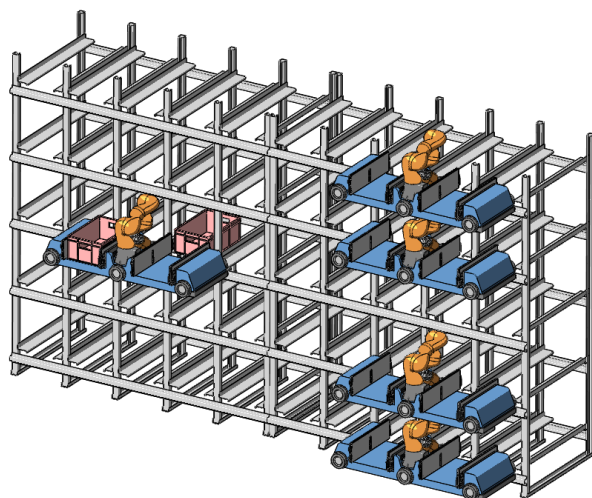
%*****Hitrostno časovna odvisnost*****
for l = 1:k
    L = L_komb(l)
    for i = 1:2
        if (i == 1) sx = L/(j+1)+dx
            if (sx <= (vx^2)/(ax))
                t_sa = 2*(sqrt(sx/ax))
            elseif (sx > (vx^2)/(ax))
                t_sa = (sx/vx) + (vx/ax)
            end
        elseif (i==2) sx = L/(j+1)
            if (sx <= (vx^2)/(ax))
                t_tb = 2*(sqrt(sx/ax))
            elseif (sx > (vx^2)/(ax))
                t_tb = (sx/vx) + (vx/ax)
            end
        end
    end
end

%*****Izračun časa delovnega cikla*****
t_mc_n(l) = 2*t_sa + (n-1)*t_tb
t_mc_man_n(l) = 2*t_sa + (n-1)*t_tb + n*(2*t_p_s+t_rob)
end

```

V nadaljevanju bo podrobneje prikazan proces delovanja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II s prikazom slik v 3D-pogledu, ki so bile izdelane v sodelovanju z Laboratorijem za transportne naprave, sisteme in logistiko (LTN) Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru ter Laboratorijem za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije (LASOK) Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani.

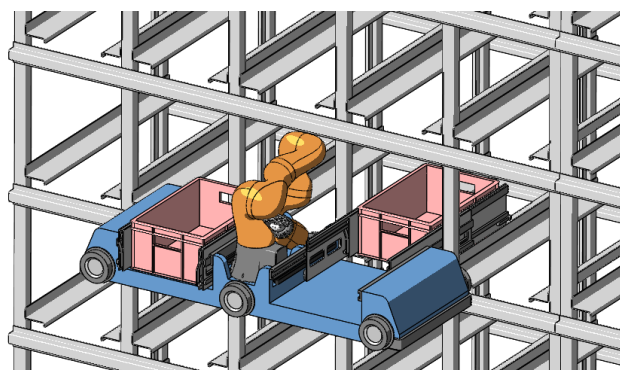
Na sliki 52 je prikazan položaj avtomatskih vozičkov z integrirano robotsko roko variante II v skladiščnem regalu.



Slika 52: Položaj avtomatskih vozičkov z integrirano robotsko roko variante II v skladiščnem regalu

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

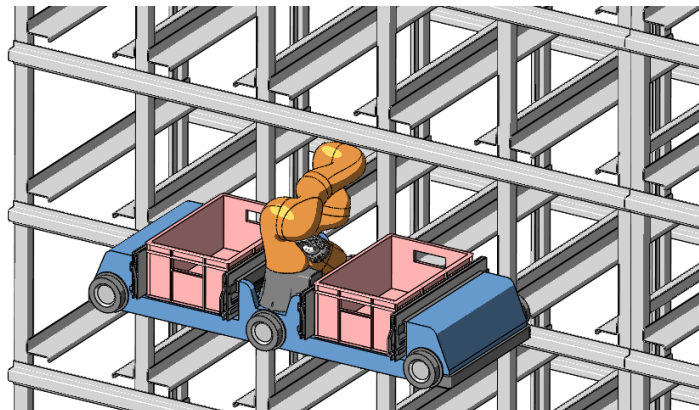
Glede na naročilo za komisioniranje artiklov v delovnem nalogu sledita vožnja in pozicioniranje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante II do i -tega stolpca v j -ti etaži skladiščnega regala (slika 53).



Slika 53: Pozicioniranje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante II v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

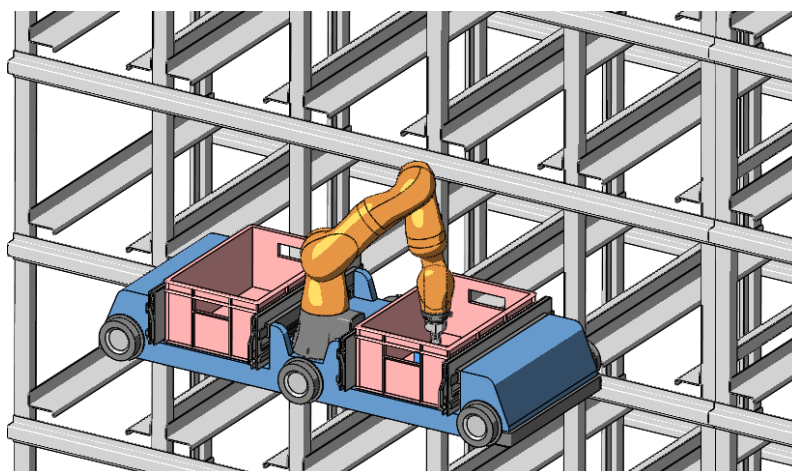
Sledita izvzem skladiščnega zabojevčka s pomičnim mehanizmom, nameščenim na avtomatskem vozičku z integrirano robotsko roko variante II, in priprava na proces robotskega komisioniranja (slika 54).



Slika 54: Izvzem zabojevčka s pomičnim mehanizmom avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante II v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala ter priprava na proces robotskega komisioniranja

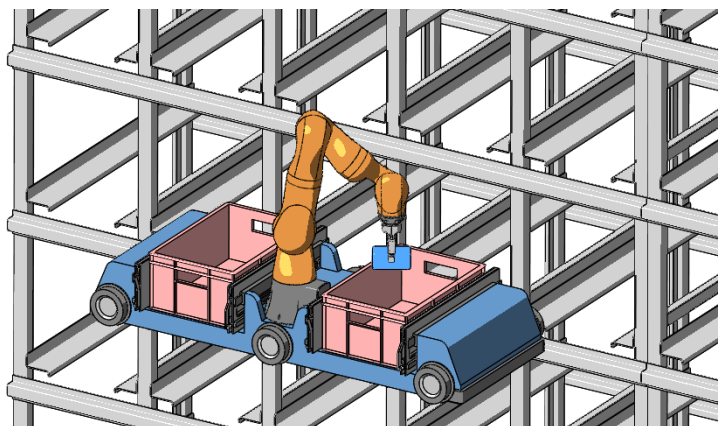
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Z uporabo robotske roke z ustreznim robotskim prijemalom, ki je nameščena na avtomatskem vozičku, se začne proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojevček (slike 55, 56, 57).



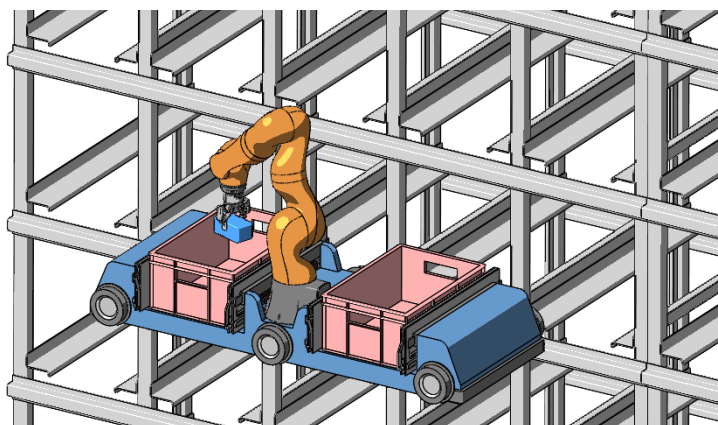
Slika 55: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojevček, 1/3

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 56: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zaboječek, 2/3

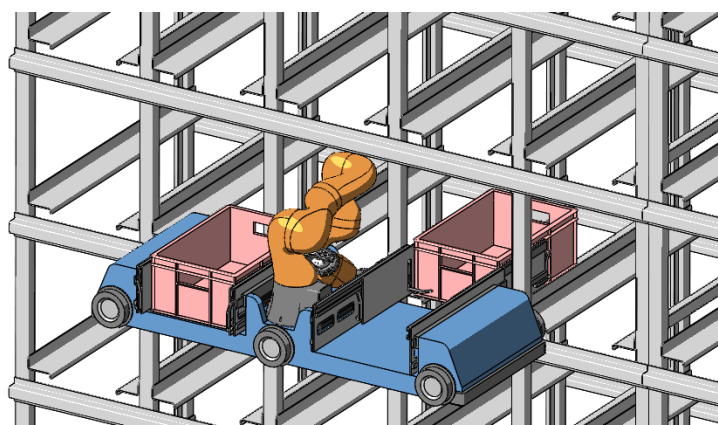
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 57: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zaboječek, 3/3

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

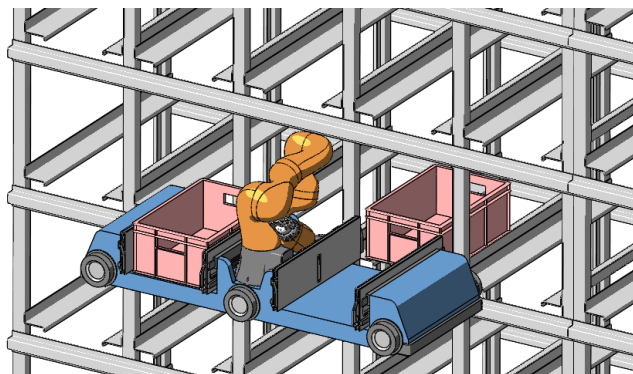
Po izvedenem procesu komisioniranja se skladiščni zaboječek odloži nazaj na isto skladiščno mesto v skladiščnem regalu (slika 58).



Slika 58: Vnos zaboječka s pomičnim mehanizmom avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante II v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Sledi vožnja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante II na naslednjo skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala (slika 59).

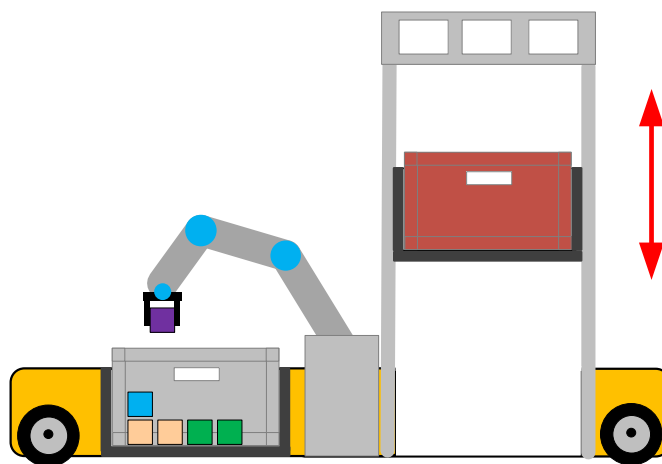


Slika 59: Nadaljevanje vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante II na naslednjo skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

3.2.6 SBS/RS z avtomatskimi vozički z integrirano robotsko roko – varianta III

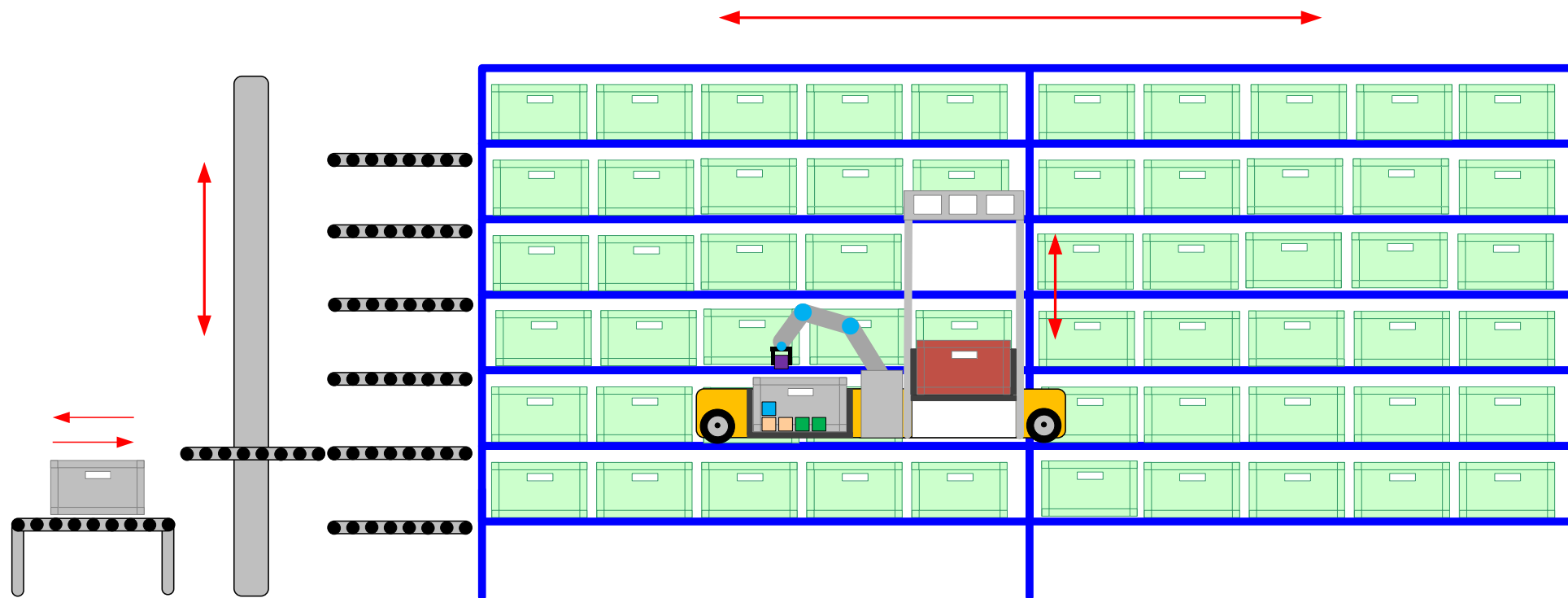
Avtomatski voziček z integrirano robotsko roko variante III ima karakteristike avtomatskega vozička variante II z nadgradnjo dvižnega mehanizma, s čimer lahko oskrbuje več etaž hkrati (slika 60).



Slika 60: Avtomatski voziček z integrirano robotsko roko – varianta III

Vir: lasten

SBS/RS z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko – varianta III je prikazan na sliki 61.



Slika 61: SBS/RS z avtomatskim vozičkom z integrirano robotsko roko – varianta III

Vir: lasten

Pri določitvi pretočne zmogljivosti avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta III je bil uporabljen model avtorja Gudehusa, 1973.

Faktor oblike (α) skladiščnega regala je enak izrazu (3.57):

$$\alpha = \frac{H_{SR}}{L_{SR}} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (3.57)$$

Kadar je ($\alpha < 1$), je vrednost funkcije $\Theta = 1$, kadar pa je ($\alpha > 1$), je vrednost funkcije $\Theta = 0$.

Z upoštevanjem odvisnosti razmerja časa pospeševanja in zaviranja v vodoravni (x) in v navpični (y) smeri uporabimo naslednji izraz (3.58):

$$\beta = \frac{v_y}{a_y} \left(\frac{v_x}{a_x} - \frac{v_y}{a_y} \right) \quad (3.58)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost časa vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko med vhodno in izhodno (V/I) lokacijo do prve $P(1)$ od n -tih lokacij, razvrščenih po naraščajoči strategiji x , je enaka izrazoma (3.59) in (3.60).

Delež časa ustaljene vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko je enak izrazu (3.59):

$$I_n^1 = \frac{H_{SR}}{2v_y} \left[1 + \frac{2}{(n+1)(n+2)} \cdot \frac{1}{\alpha^2} (1 - \Theta(1 - \alpha)^{n+2}) \right] \quad (3.59)$$

Delež časa neustaljene (pospeševanje in pojemanje) vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko je enak izrazu (3.60):

$$B_n^1 = \frac{v_y}{a_y} \left[1 + \frac{\beta}{n+1} \cdot \frac{1}{\alpha} (1 - \Theta(1 - \alpha)^{n+1}) \right] \quad (3.60)$$

Pričakovana (povprečna) vrednost časa vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko med dvema zaporednima lokacijama $P(i)$ in $P(i + 1)$ po naraščajoči strategiji x je enaka izrazoma (3.61) in (3.62).

Delež časa ustaljene vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko je enak izrazu (3.61):

$$I_n^i = \frac{H_{SR}}{3v_y} \left[1 + \frac{6}{(n+1)(n+2)} \cdot \frac{1}{\alpha^3} \left(\alpha - \frac{1}{n+3} (1 - \Theta(1 - \alpha)^{n+3}) \right) \right] \quad (3.61)$$

Delež časa neustaljene (pospeševanje in pojemanje) vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko je enak izrazu (3.62):

$$B_n^i = \frac{v_y}{a_y} \left[1 + \frac{2\beta}{n+1} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \left(\alpha - \frac{1}{n+2} (1 - \Theta(1 - \alpha)^{n+2}) \right) \right] \quad (3.62)$$

Pričakovani (povprečni) čas večkratnega delovnega cikla avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij $E(MC_n)$ je enak izrazu (3.63):

$$E(MC_n) = 2(I_n^1 + B_n^1) + (n-1)(I_n^i + B_n^2) + n(2t_{P/S \text{ tote}} + t_{P/S \text{ item}}) \quad (3.63)$$

Pretočna zmogljivost večkratnega delovnega cikla avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko v primeru obiska n -tih skladiščnih lokacij $\tau(MC_n)$ je enaka izrazu (3.64):

$$\tau(MC_n) = \frac{3600}{E(MC_n)} \cdot n \left[\frac{\text{artiklov}}{\text{uro}} \right] \quad (3.64)$$

Za določitev pretočne zmogljivosti avtomatskega vozilčka z integrirano robotsko roko – varianta III je bil izdelan program v orodju MATLAB.

```

%*****Vhodni podatki*****
L = 30
H = 6
dx = 0
vx = 3
vy = 1.5
ax = 1.2
ay = 1.5
n = 3
j = n/2
%*****Faktor oblike skladišča*****

alfa = (H*vx)/(L*vy)

if alfa < 1
    theta = 1
elseif alfa > 1
    theta = 0
end

beta = (vy/ay)*((vx/ax)-(vy/ay))

%*****Hitrostno časovni model*****

%od začetke točke do vhoda v regalno skladišče
im = (1-(theta*power((1-alfa),n+2)))
InIO=(H/(2*vy))*(1+((2*im)/((n+1)*(n+2)*alfa*alfa)))

im2 = (1-(theta*power((1-alfa),n+1)))
BnIO = (vy/ay)*(1+((beta*im2)/((n+1)*alfa)))

%vmesne vožnje v regalnem skladišču
im3 = (1-(theta*power((1-alfa),n+3)))
InM = (H/(3*vy))*(1+(6/((n+1)*(n+2)*power(alfa,3))*(alfa-(im3/(n+3))))))
BnM = (vy/ay)*(1+((2*beta)/((n+1)*(alfa*alfa))*(alfa-(im/(n+2))))))

Tsum = (InIO+BnIO)*2+InM+BnM

%*****Izračun časa delovnega cikla*****

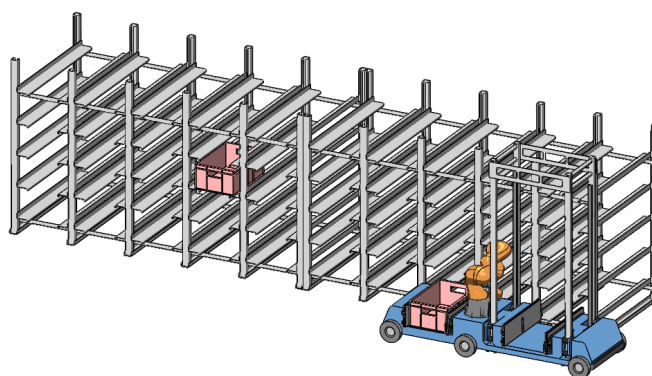
T0 = InIO+BnIO
T1 = InM+BnM

TSum = 2*T0+5*T1

```

V nadaljevanju bo podrobneje prikazan proces delovanja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II s prikazom slik v 3D-pogledu, ki so bile izdelane v sodelovanju z Laboratorijem za transportne naprave, sisteme in logistiko (LTN) Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru ter Laboratorijem za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije (LASOK) Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani.

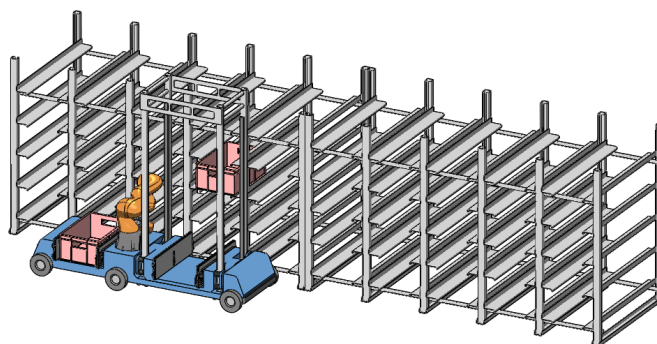
Na sliki 62 je prikazan položaj avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante III v skladiščnem regalu.



Slika 62: Položaj avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante III v skladiščnem regalu

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

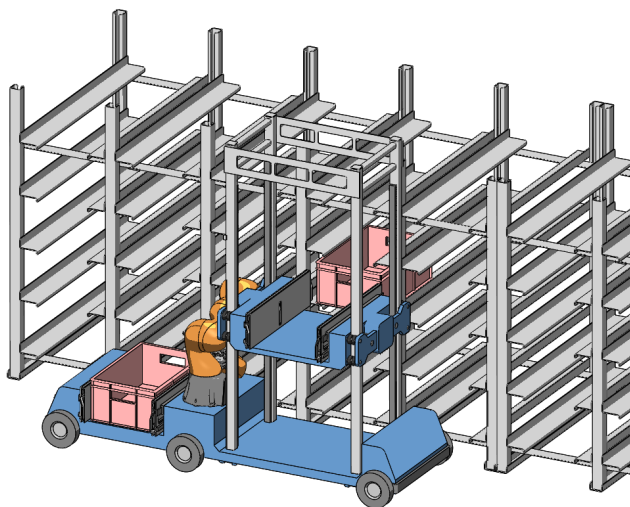
Glede na naročilo za komisioniranje artiklov v delovnem nalogu sledita vožnja in pozicioniranje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante III do i -tega stolpca skladiščnega regala (slika 63).



Slika 63: Vožnja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante III do i -tega stolpca skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

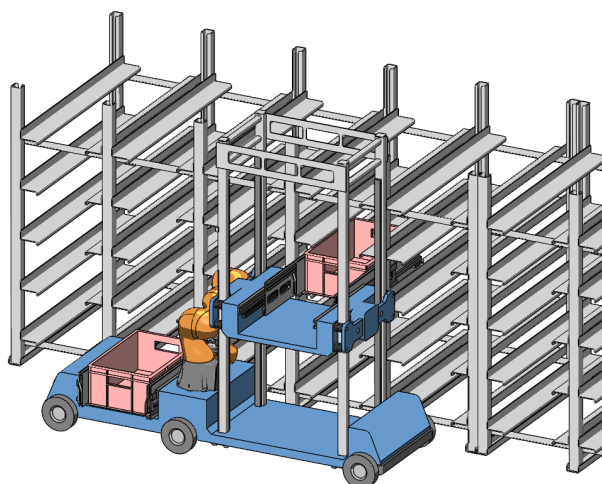
Sledi pomik dvižne mize avtomatskega vozilčka z integrirano robotsko roko variante III do j -te etaže skladiščnega regala (slika 64).



Slika 64: Pomik dvižne mize avtomatskega vozilčka z integrirano robotsko roko variante III do j -te etaže skladiščnega regala

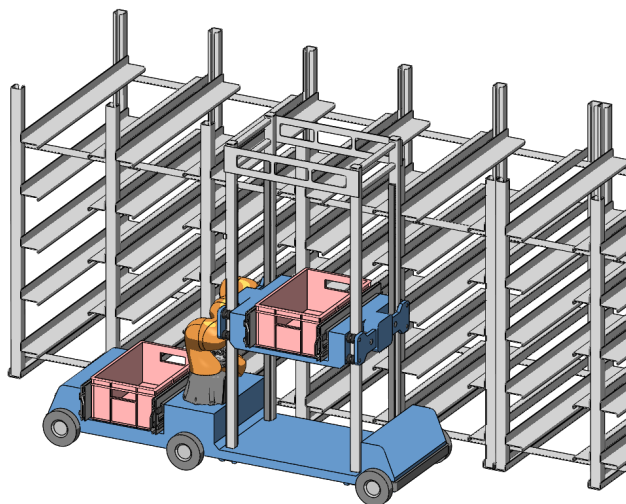
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Nadalje sledita izvzem skladiščnega zaboječka s pomičnim mehanizmom, nameščenim na avtomatskem vozilčku z integrirano robotsko roko variante III, in pozicioniranje skladiščnega zaboječka na dvižni mizi (sliki 65, 66).



Slika 65: Izvzem zaboječka s pomičnim mehanizmom dvižne mize avtomatskega vozilčka v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

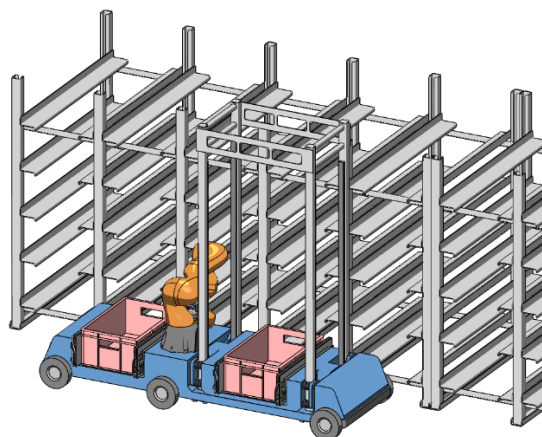
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 66: Pozicioniranje zabojčka na dvižni mizi avtomatskega vozička v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

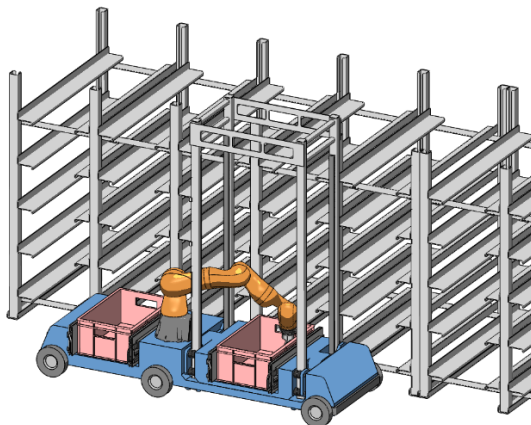
Za izvedbo procesa robotskega komisioniranja je potreben pomik skladiščnega zabojčka na položaj za izvedbo procesa robotskega komisioniranja, kar je prikazano na sliki 67.



Slika 67: Pomik zabojčka na dvižni mizi avtomatskega vozička v i -tem stolpcu na položaj za izvedbo procesa robotskega komisioniranja

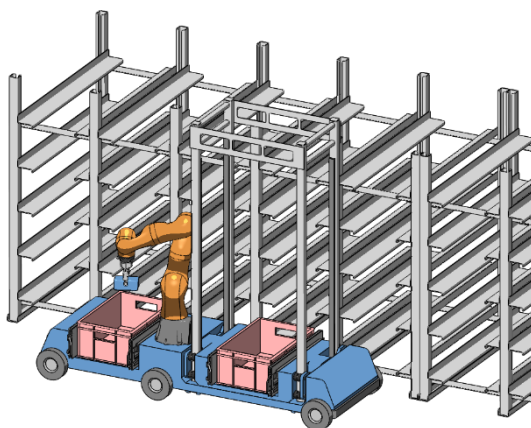
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Z uporabo robotske roke z ustreznim robotskim prijemalom, ki je nameščena na avtomatskem vozičku, se začne proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojček (sliki 68, 69).



Slika 68: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladišnega v komisionirni zaboječ, 1/2

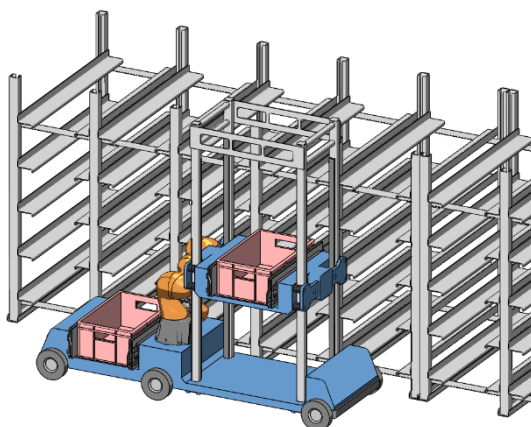
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 69: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladišnega v komisionirni zaboječ, 2/2

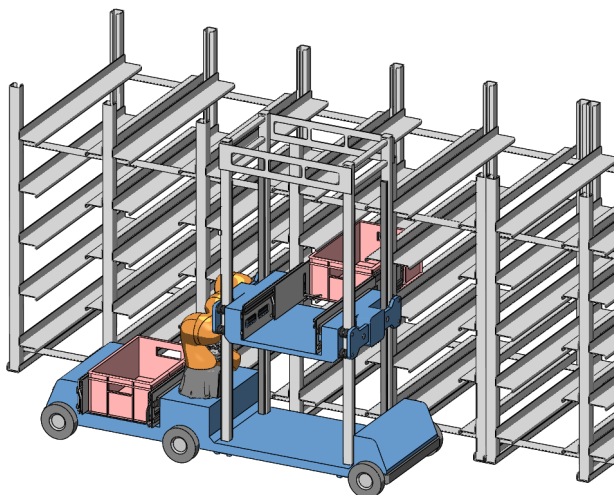
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Po izvedenem procesu komisioniranja se skladišni zaboječ z uporabo dvižne mize pomakne nazaj v j -to etažo in se odloži nazaj na isto skladiščno mesto v skladiščnem regalu (sliki 70, 71).



Slika 70: Pomik zabojčka na dvižni mizi avtomatskega vozička v j -to etažo skladišnega regala

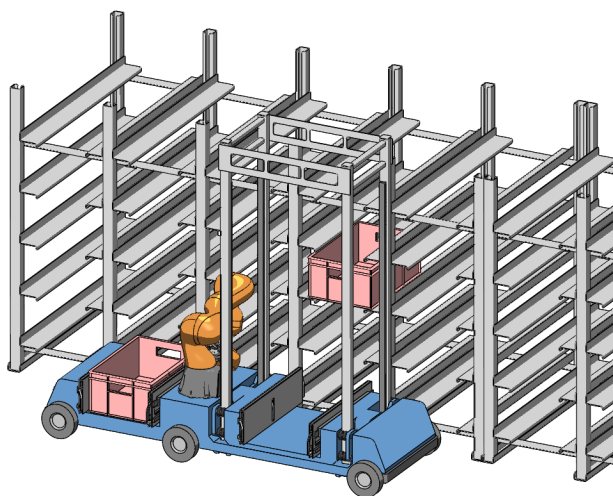
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 71: Vnos zabojčka s pomičnim mehanizmom dvižne mize avtomatskega vozička v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Sledi vožnja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante III na naslednjo skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu skladiščnega regala (slika 72).

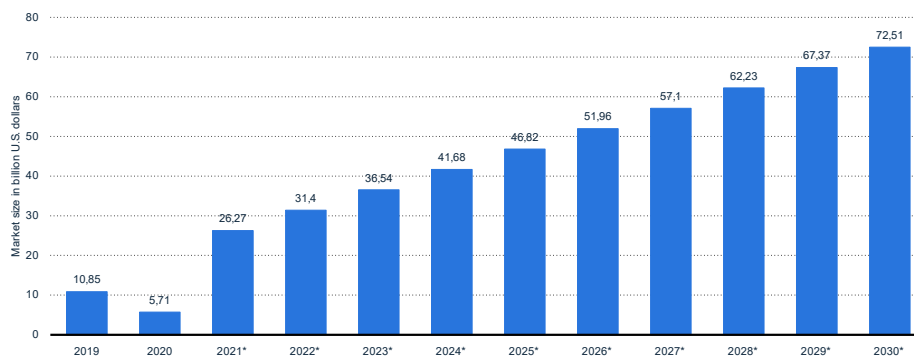


Slika 72: Nadaljevanje vožnje avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko variante III na naslednjo skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

4 Avtonomni mobilni roboti v intralogistiki

Zaradi naraščajočega deleža e-trgovine se v skladiščno-distribucijskih centrih vedno pogosteje uporabljajo avtonomni mobilni roboti (ang. *Autonomous Mobile Robots; AMR*), kot je tudi prikazano na sliki 73.



Slika 73: Velikost svetovnega trga mobilne robotike v letih 2019 in 2020 z napovedjo za obdobje od 2021 do 2030

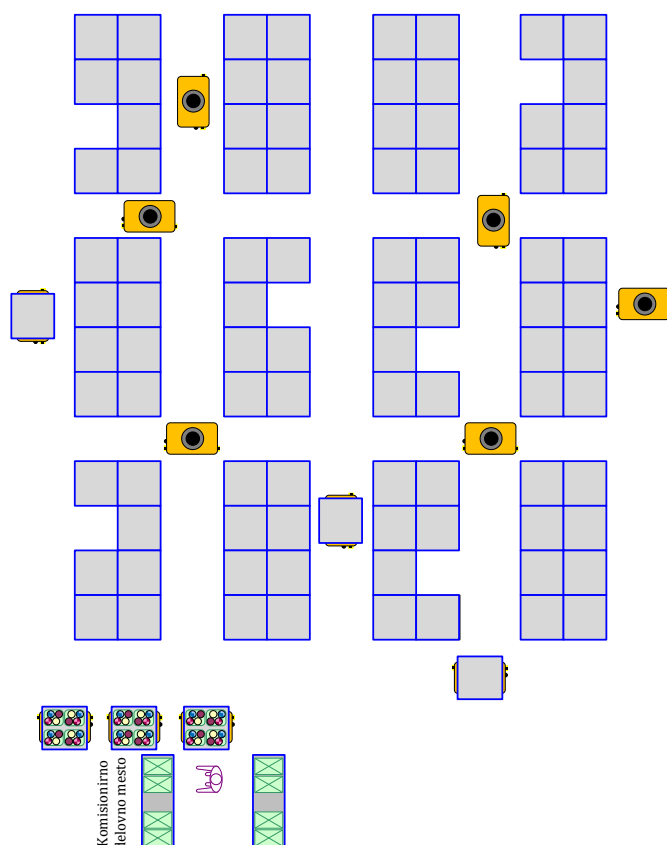
Vir: <https://www.statista.com/>

Avtonomne mobilne robote lahko v osnovi razvrstimo v naslednje skupine:

- AMR za podporo procesu komisioniranja »blago h komisionarju«;
- AMR za podporo hibridnemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«;
- AMR za podporo popolnoma avtomatiziranemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«.

4.1 AMR za podporo procesu komisioniranja »blago h komisionarju«

Skladišča, v katerih se uporablja tehnološka rešitev z AMR za podporo procesu komisioniranja »blago h komisionarju« ima fiksna delovna (komisionirna) mesta s komisionarji, ki jim artikle dostavljajo mobilni roboti (slika 74) na premičnih poličnih regalih (ang. *movable shelf racks*).



Slika 74: Tloris skladišča z AMR za podporo procesu komisioniranja »blago h komisionarju«

Vir: Lasten

Proces komisioniranja z AMR, ki na komisionirna mesta dostavljajo premične polične regale, je izrazito kompleksen in zahteva dobro računalniško podprto storitev za vodenje in usmerjanje AMR in komisionirnih delovnih mest. V skladiščno-distribucijskem centru lahko deluje več deset ali tudi več sto AMR, ki morajo delovati usklajeno glede na zahteve naročil v delovnih nalogih za komisioniranje artiklov (slike 75, 76 in 77).



Slika 75: Prikaz delovanja AMR za podporo procesu komisioniranja blago h komisionarju
Vir: ©/Adobe Stock



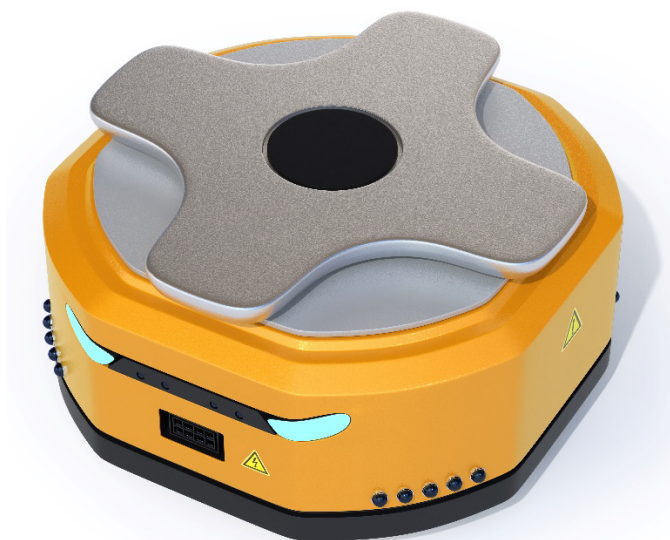
Slika 76: Prikaz delovanja AMR za podporo procesu komisioniranja blago h komisionarju
Vir: ©/Adobe Stock



Slika 77: AMR za podporo procesu komisioniranja blago h komisionarju

Vir: ©/Adobe Stock

Komercialne rešitve za izvajanje procesa komisioniranja blaga h komisionarju z uporabo AMR ponujajo različna podjetja, kot so (slika 78): Amazon Robotics (www.amazonrobotics.com), Grenzebach (www.grenzebach.com), Swisslog (www.grenzebach.com) in Scallog (www.scallog.com).

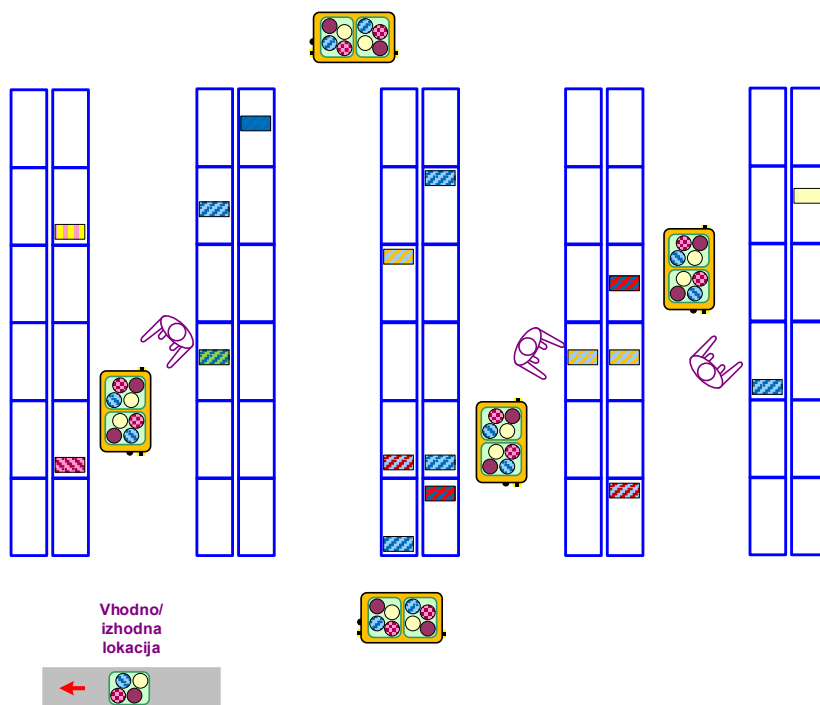


Slika 78: Mobilni AMR za izvajanje procesa komisioniranja

Vir: Vir: ©/Adobe Stock

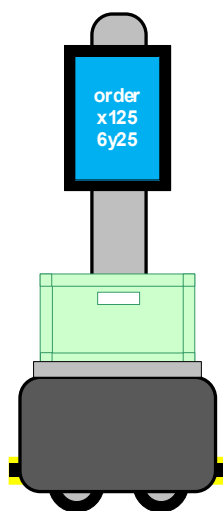
4.2 AMR za podporo hibridnemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«

Za razliko od predhodnega sistema, predstavljenega v poglavju 4.1, v tem sistemu AMR zagotavljajo podporo komisionarjem, ki se premikajo v regalnih hodnikih med poličnimi regali in komisionirajo blago glede na naročilo v delovnem nalogu. Naloga komisionarjev je zgolj manipulacija artiklov iz poličnih regalov na AMR z zabožki, kamor se odlagajo artikli. Komisionarji so po navadi dodeljeni posamezni (izbrani) coni skladišča, medtem ko lahko AMR zasedajo celotno območje skladišča (slika 79). Sistem je decentraliziran, kar pomeni, da izbrano naročilo delovnega naloga obdela več komisionarjev pri uporabi več AMR. Primer sodelujočega AMR podjetja Locus Robotics (<https://locusrobotics.com/>) je prikazan na sliki 80.



Slika 79: Tloris skladišča z AMR za podporo hibridnemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«

Vir: lasten



Slika 80: Kolaborativni AMR

Vir: lastni

Pri načrtovanju hibridnega procesa komisioniranja komisionar k blagu z uporabo AMR izhajamo iz naslednjih predpostavk (Boysen et al., 2019):

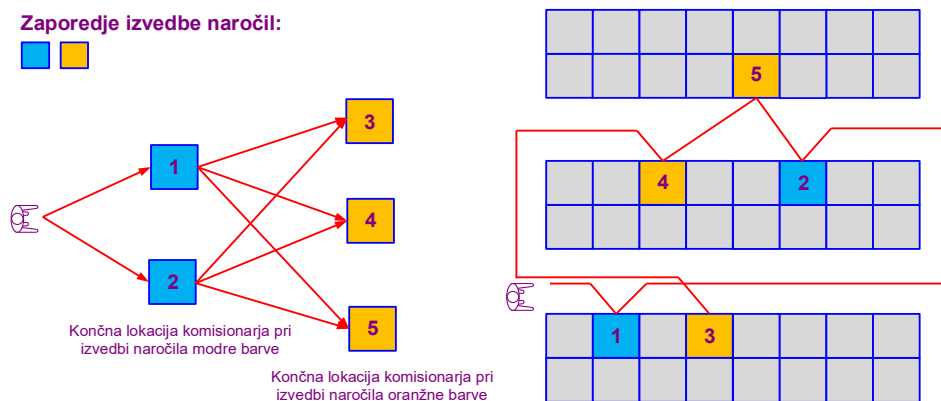
- AMR ne predstavljajo ozkega grla v skladišču.
- V skladišču deluje eden ali več komisionarjev, ki so dodeljeni posamezni skladiščni coni.

Glede na podano:

- listo naročil artiklov (I),
- listo skladiščnih (komisionirnih) lokacij (P_k) naročila (k)

je treba poiskati pot komisionarja med skladiščnimi (komisionirnimi) lokacijami vseh prejetih naročil ($P_k, k \in I$), da bosta izpolnjena naslednja pogoja (slika 81):

- Vsa prejeta naročila so strukturirana v ustreznem vrstnem redu. Vse skladiščne (komisionirne) lokacije (P_k) obišče komisionar, preden se začne izvajati novo naročilo (P_m, k in $m \in I$).
- Dolžina poti komisionarja naj bo minimirana.

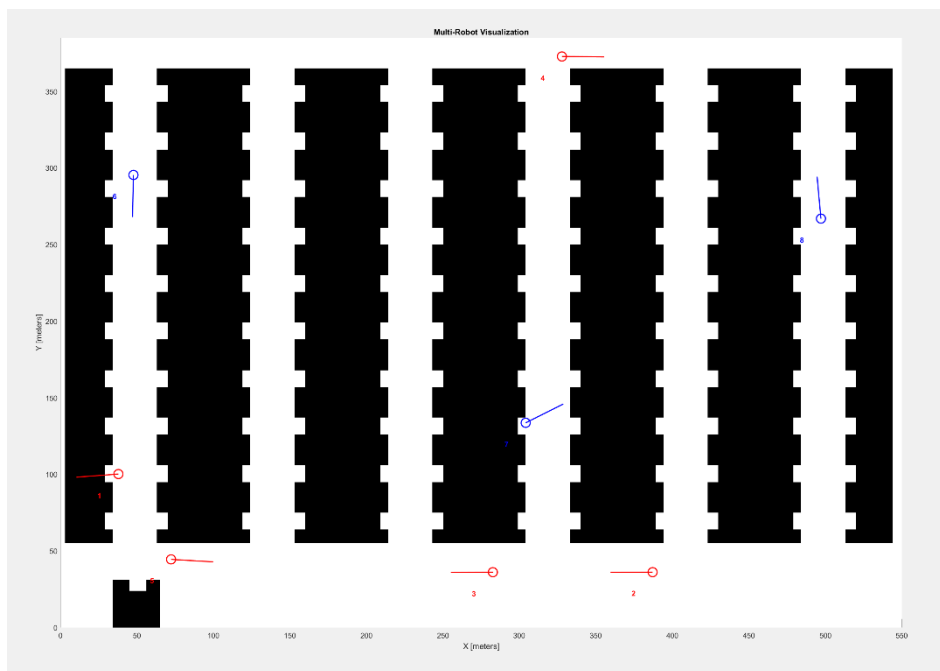


Slika 81: Izbira najkrajše poti glede na podano listo naročila v delovnem nalogu

Vir: lasten

V laboratoriju za kognitivne sisteme v logistiki na Fakulteti za logistiko Univerze v Mariboru je bil v okviru raziskovalnega dela in diplomskega dela z naslovom "Primerjava klasičnega in conskega komisioniranja s pomočjo avtonomnih vozil" (Marković, 2021) v programu MatLab razvit hibridni model komisioniranja s sodelovanjem AMR. Za potrebe vizualizacije procesa komisioniranja z uporabo AMR je bil uporabljen gradnik "Mobile Robotics Simulation Toolbox" programa MatLab.

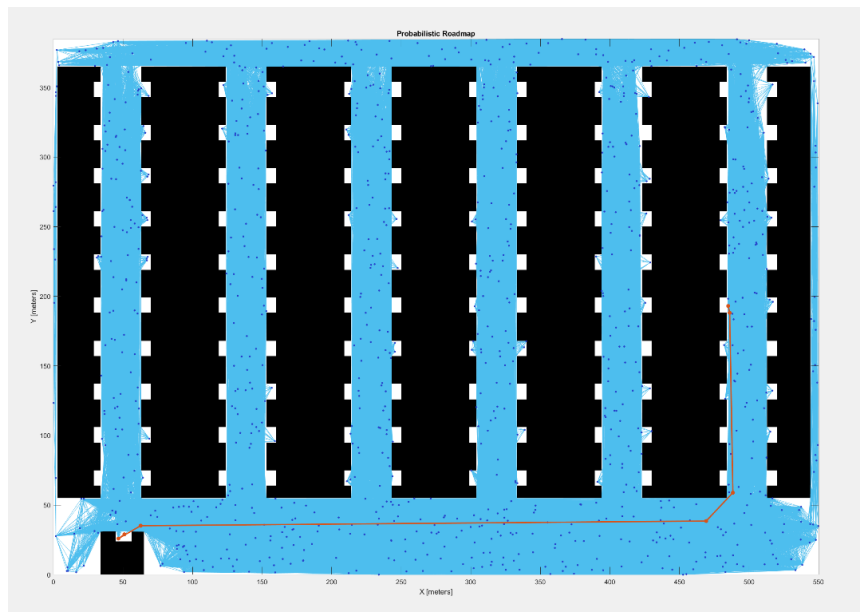
Na sliki 82 lahko vidimo (poenostavljen) tloris skladišča z dvema prečnima in šestimi regalnimi hodniki. V vsakem regalnem hodniku imamo deset skladiščnih lokacij, in sicer na levi in desni strani regalnega hodnika. Vhodno/izhodna lokacija je nameščena na spodnjem levem robu skladišča.



Slika 82: Tloris skladišča z AMR za podporo hibridnemu procesu komisioniranja komisinar k blagu, izdelan v MatLabu
Vir: Marković, 2021

V skladišču imamo tri komisinarje, ki so dodeljeni posameznim conam skladišča, in pet AMR, ki so podpora komisinarjem in opravljajo funkcijo transporta artiklov iz skladišča do vhodno/izhodne lokacije.

Generiranje naročil v deloven nalogu za vsakega posameznega komisinarja temelji na Poissonovi statistični porazdelitvi. Naročila se izvajajo zaporedno, pri čemer se mora vsako posamezno naročilo prej zaključiti, preden lahko komisinar sprejme v izvajanje novo naročilo. Iskanje najkrajše poti AMR je izvedeno z uporabo teorije grafov in algoritmom, ki poišče najkrajšo pot med dvema točkama (vozliščema) v skladišču (slika 83).



Slika 83: Tloris skladišča z vozlišči

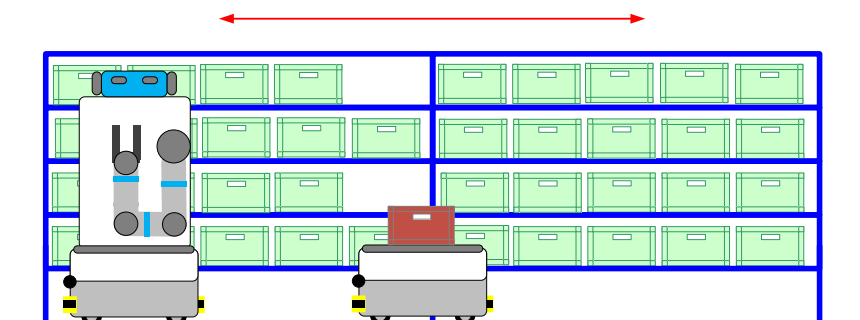
Vir: Marković, 2021

4.3 AMR za podporo popolnoma avtomatiziranemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu«.

4.3.1 AMR "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics

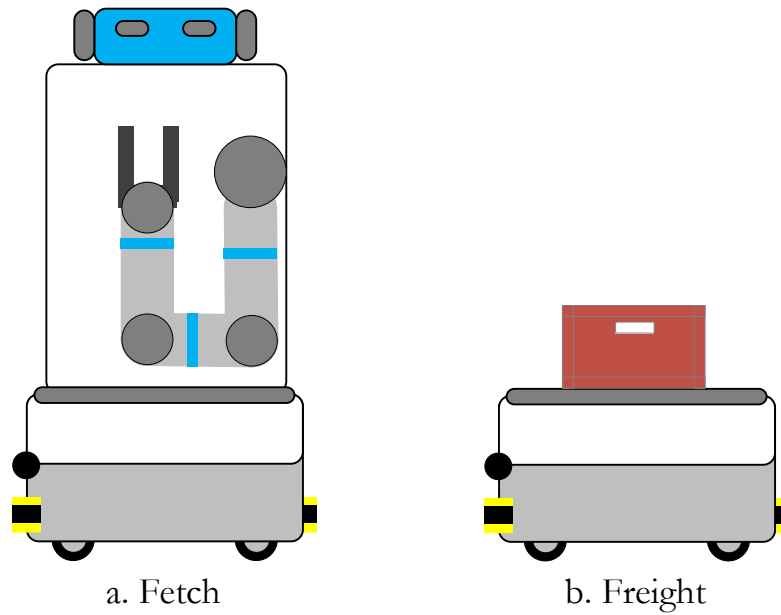
Nadgradnja sistema AMR za podporo hibridnemu procesu komisioniranja »komisionar k blagu« je uporaba AMR z integrirano robotsko roko za izvedbo manipulacij namesto komisionarja.

Na sliki 84 je prikazan primer uporabe tehnološke rešitve podjetja Fetch Robotics (<https://locusrobotics.com/>), kjer AMR z robotsko roko, imenovan "Fetch" (slika 85a), izvaja manipulacijo artiklov, medtem ko AMR, imenovan "Freight" (slika 85b), omogoča transport artiklov v skladišču.



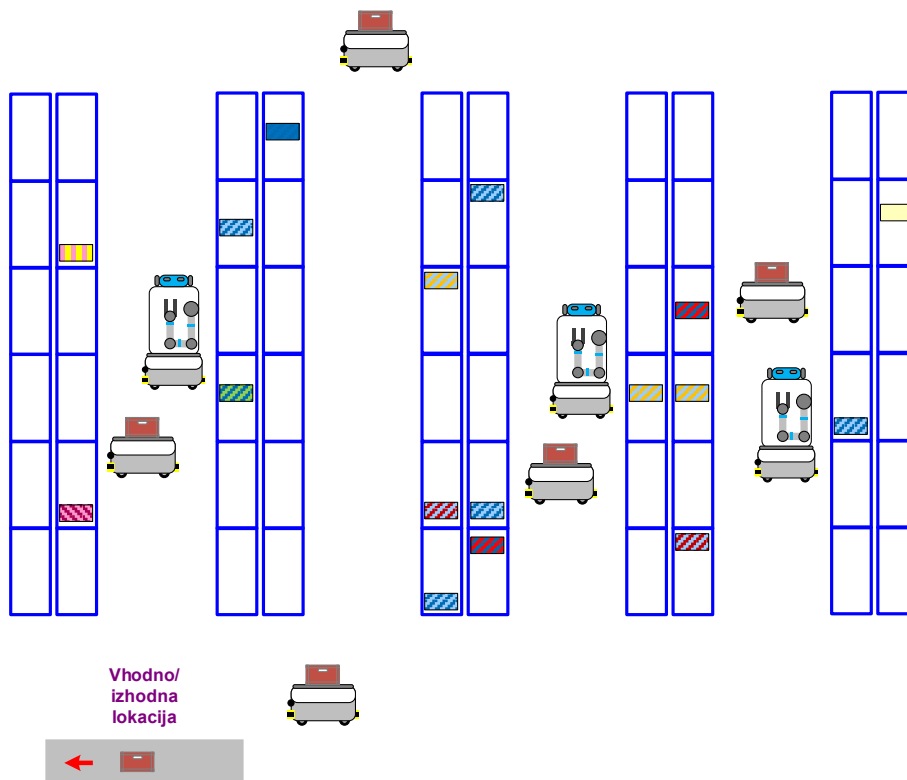
Slika 84: Uporaba sistema "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics

Vir: lasten



Slika 85: Sistem "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics
Vir: lasten

Na sliki 86 lahko vidimo koncept skladišča za robotsko komisioniranje artiklov z uporabo tehnološke rešitve "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics (<https://locusrobotics.com/>).

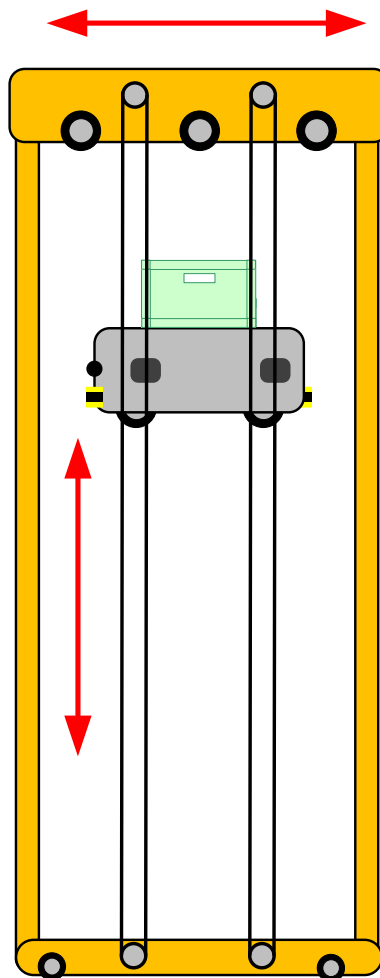


Slika 86: Koncept uporabe tehnološke rešitve "Fetch and Freight" podjetja Fetch Robotics
Vir: <https://locusrobotics.com/>

4.4 Posebne izvedbe AMR za delo v skladiščnem regalu

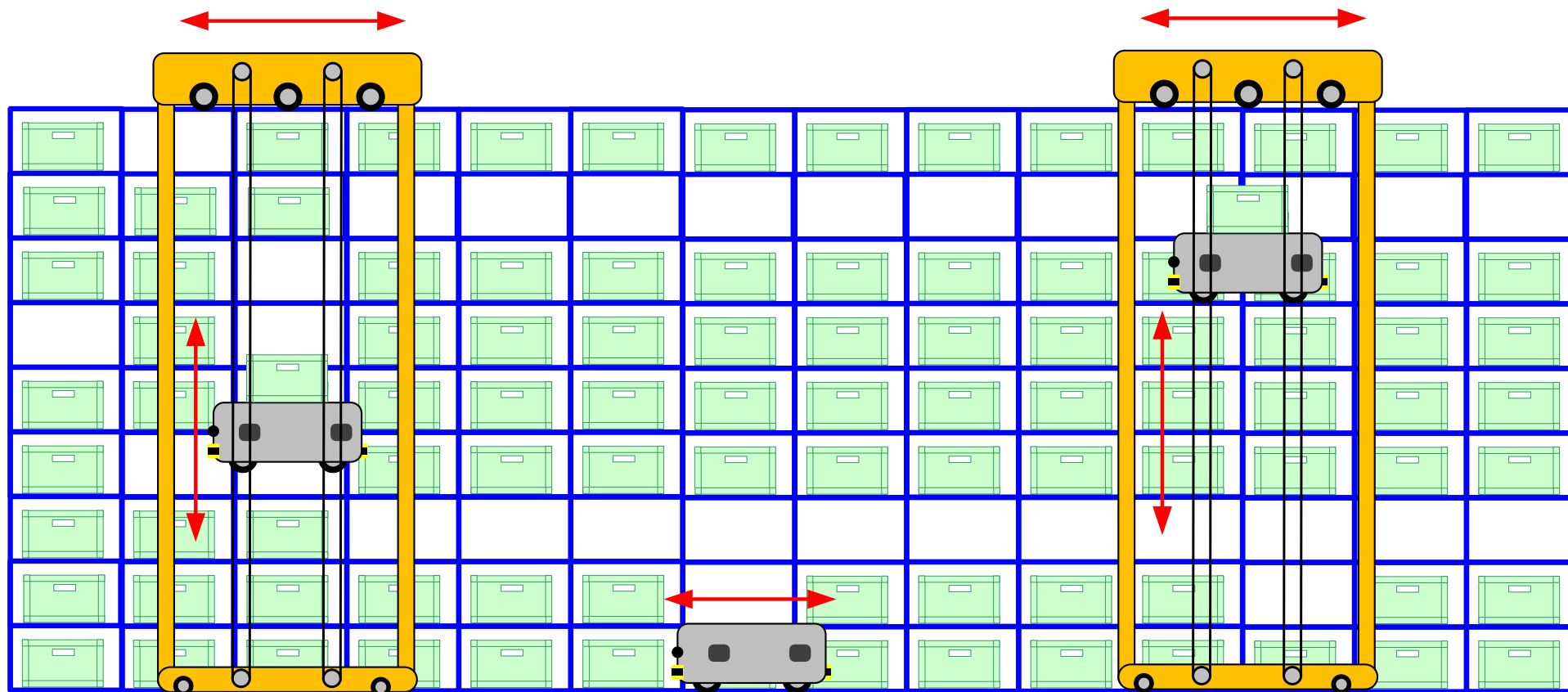
4.4.1 AMR v sodelovanju s pomičnim dvižnim vrvmim mehanizmom

AMR v sodelovanju s pomičnim dvižnim vrvmim mehanizmom vključuje premično konstrukcijo z dvižnim vrvmim mehanizmom, ki se neodvisno premika v vodoravni (x) smeri in skrbi za dvig AMR v navpični (y) smeri (slika 87). AMR ima na obeh straneh poseben teleskopski mehanizem, ki omogoča vpetje na dvižno vrv. Na izbrani lokaciji uskladiščenja ali odpreme zabojčka v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala se AMR dodatno pripne z zatičem v regalno konstrukcijo. Tako se zagotovi dovolj velika togost pri procesu odlaganja in/ali nalaganja zabojčkov. Sistem je fleksibilen, saj lahko poljubno dodajamo pomične dvižne vrvmne mehanizme in AMR glede na zahtevano pretočno zmogljivost skladišča (slika 88).



Slika 87: Pomični vrvmi dvižni mehanizem za dvig AMR

Vir: lasten

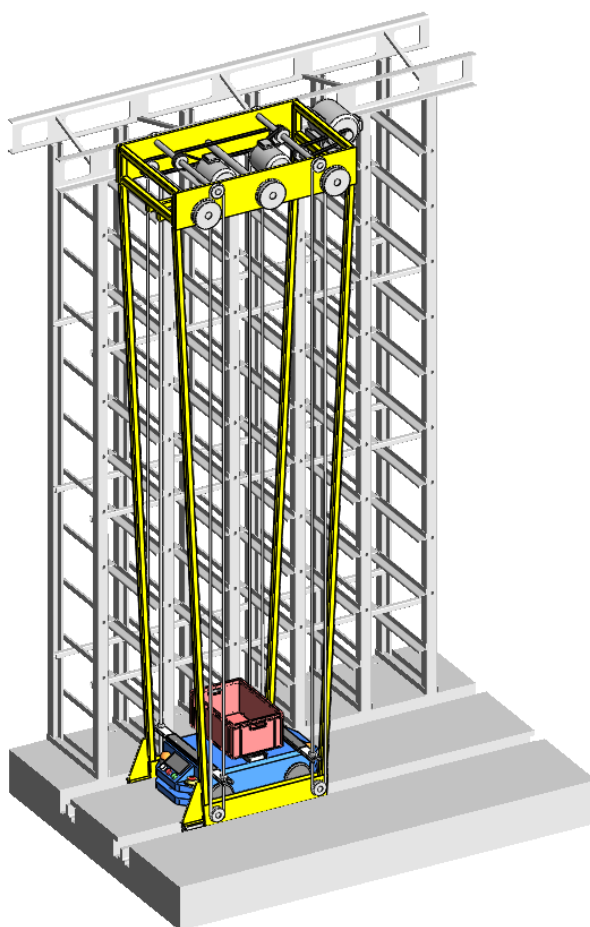


Slika 88: AMR v sodelovanju s pomičnim dvižnim vrtnim mehanizmom

Vir: lasten

V nadaljevanju bo podrobneje prikazan proces delovanja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II s prikazom slik v 3D-pogledu, ki so bile izdelane v sodelovanju z Laboratorijem za transportne naprave, sisteme in logistiko (LTN) Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru ter Laboratorijem za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije (LASOK) Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani.

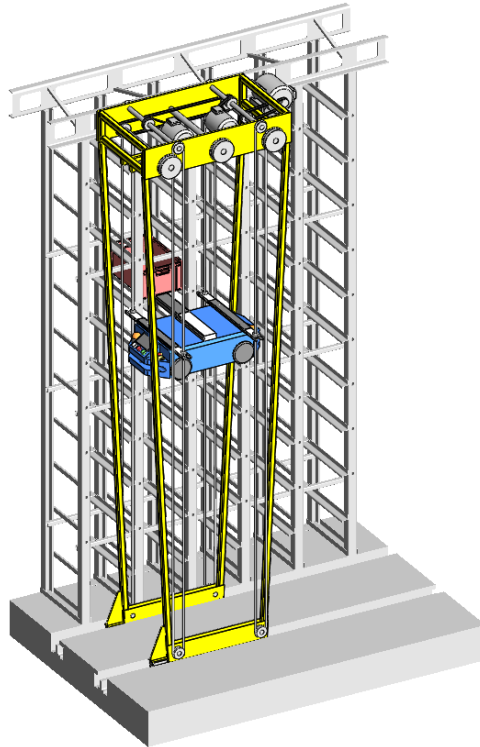
Na sliki 89 je prikazan položaj AMR v območju pomičnega vravnega dvižnega mehanizma.



Slika 89: Vpetje AMR na pomični dvižni vrveni mehanizem

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

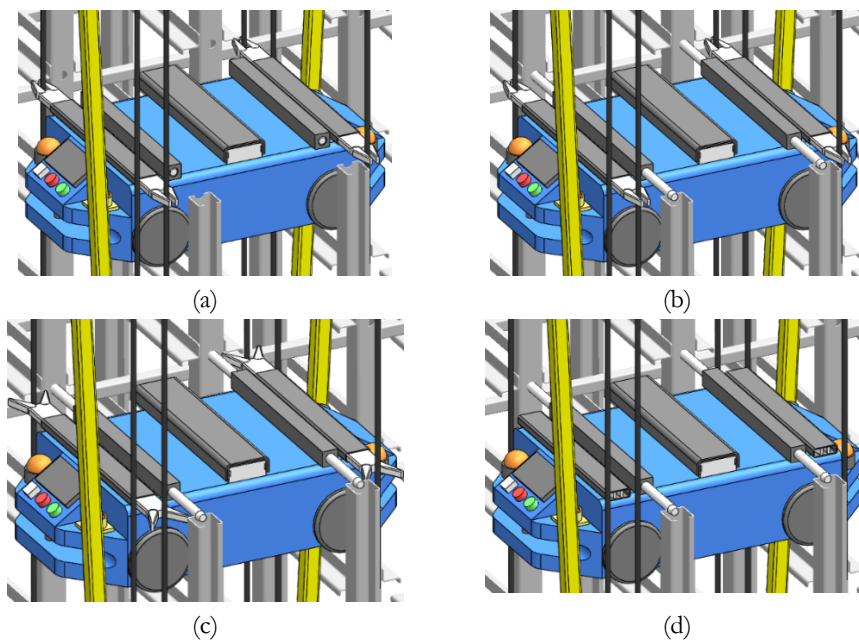
Dvižni mehanizem z uporabo vrvi omogoči dvig AMR na izbrano skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala (slika 90).



Slika 90: Dvig AMR s pomičnim dviznim vrvnim mehanizmom

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Na sliki 91 lahko vidimo detajle (a, b, c in d), kako se AMR pozicionira na izbrani skladiščni lokaciji v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala.

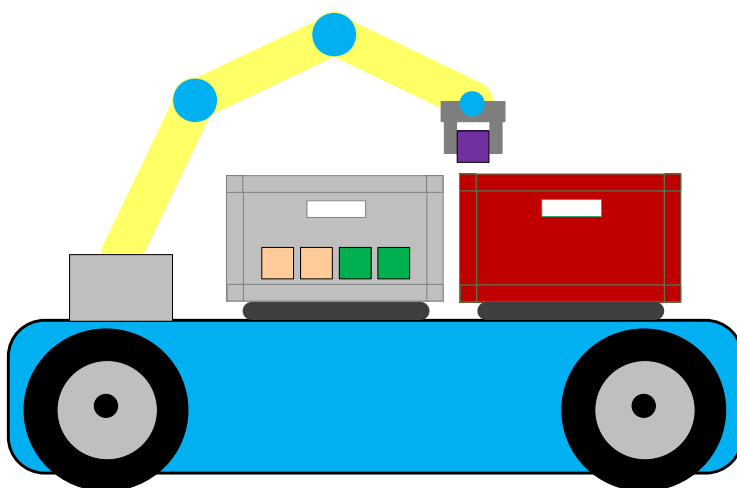


Slika 91: Pozicioniranje AMR na izbrani skladiščni lokaciji v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

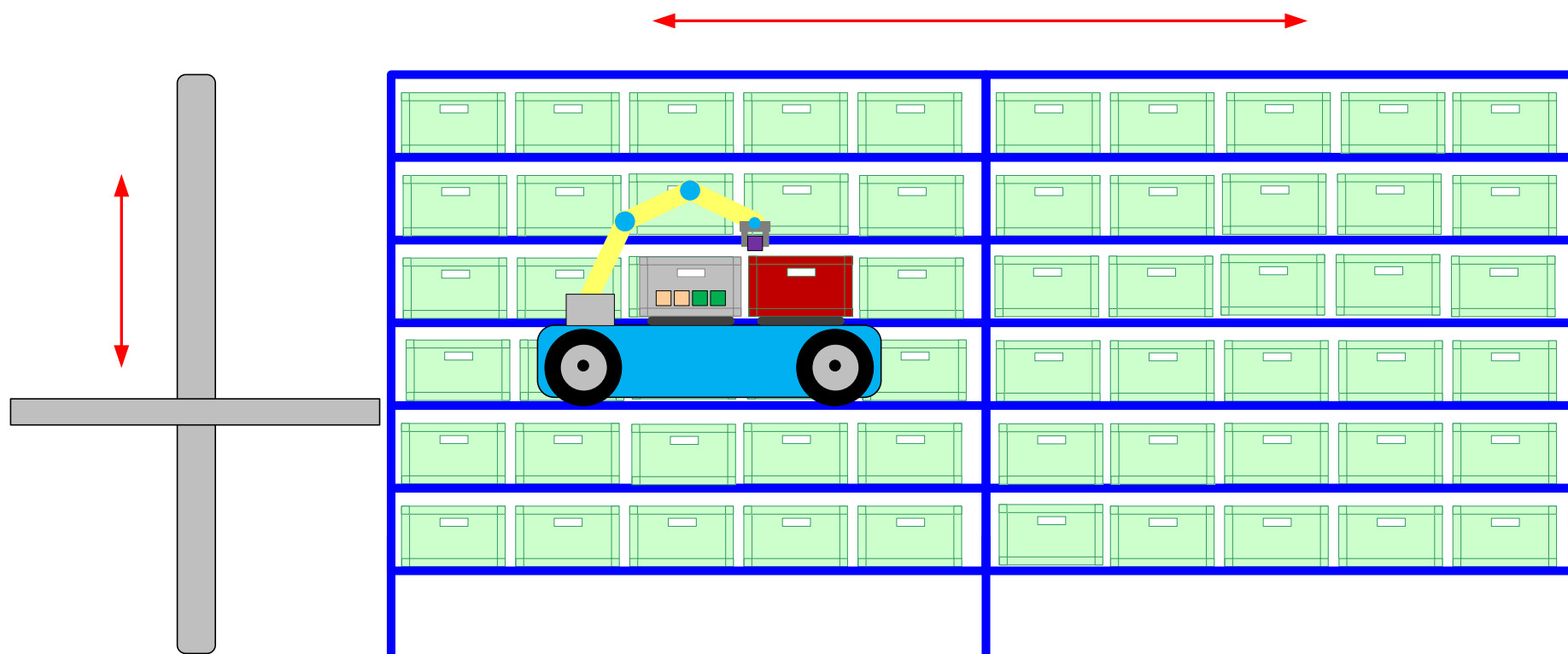
4.4.2 AMR z robotsko roko za delo v skladiščnem regalu

Posebna izvedba AMR z robotsko roko za delo v skladiščnem regalu ima na podstavku AMR nameščena dva pomična mehanizma za manipulacijo in transport dveh zabojčkov, in sicer komisionirnega in skladiščnega zabojčka (slika 92).



Slika 92: Koncept AMR z robotsko roko

Vir: lasten

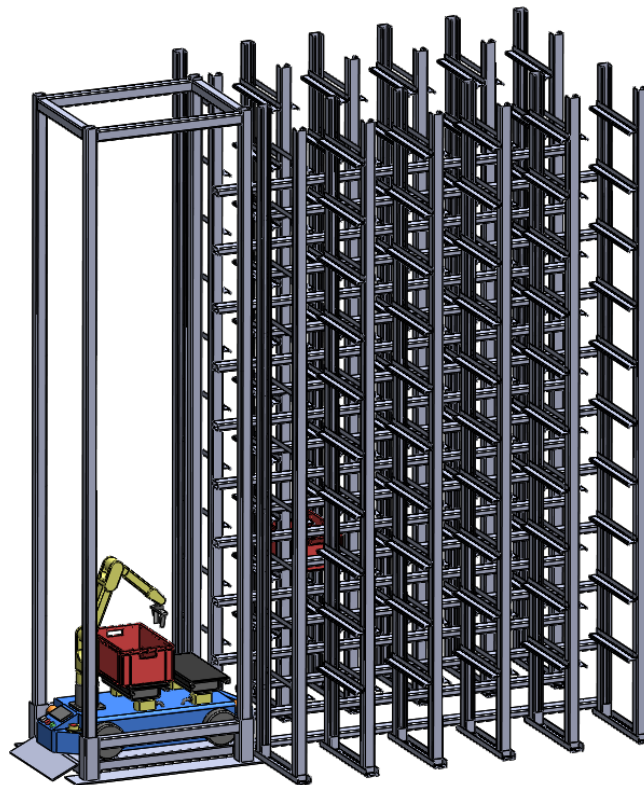


Slika 93: AMR z robotsko roko za delo v skladiščnem regalu

Vir: lasten

Namen uporabe posebej komisionirnega in skladiščnega zaboječka je v izrazito majhni višini etaže skladiščnega regala, kar ima za posledico omejitve direktnega dostopa robotske roke do artiklov v skladiščnem zaboječku. Pri procesu komisioniranja pomični mehanizem na AMR izvzame skladiščni zaboječek iz skladiščnega mesta v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala. Sledi proces robotskega komisioniranja z robotsko roko oz. proces prelaganja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zaboječek, ki je nameščen tik ob robotski roki. Po zaključku procesa komisioniranja pomični mehanizem na AMR odloži skladiščni zaboječek nazaj na skladiščno mesto v skladiščnem regalu. Sledi vožnja AMR na drugo skladiščno mesto v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala, kjer se ponovi proces robotskega komisioniranja artiklov (slika 93).

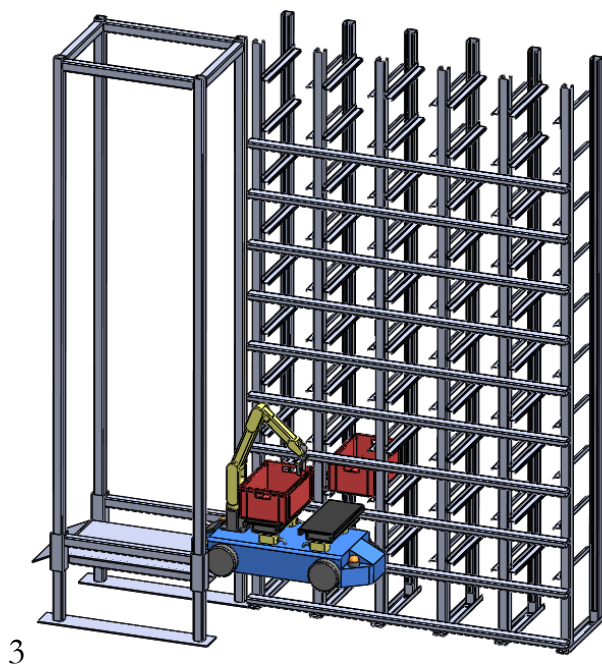
V nadaljevanju bo podrobneje prikazan proces delovanja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II s prikazom slik v 3D-pogledu, ki so bile izdelane v sodelovanju z Laboratorijem za transportne naprave, sisteme in logistiko (LTN) Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru ter Laboratorijem za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije (LASOK) Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani. Na sliki 94 je prikazan položaj AMR z robotsko roko na dvizni mizi dvigala skladiščnega regala



Slika 94: Pozicioniranje AMR na dvizni mizi dvigala skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

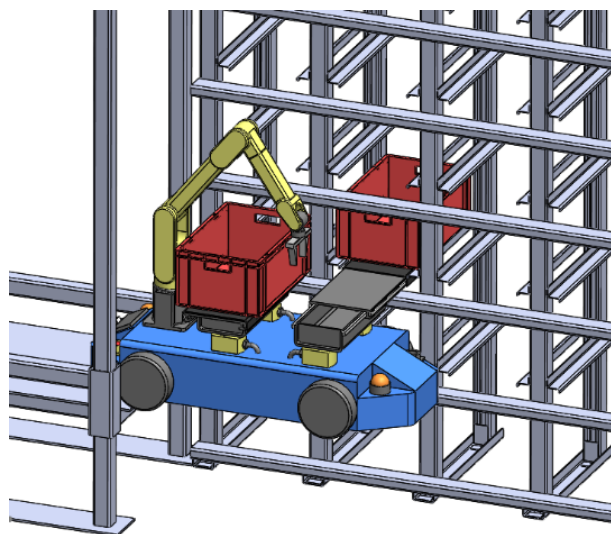
Glede na naročilo v delovnem nalogu se z uporabo dvizhne mize dvigala AMR pomakne v navpični (y) smeri do j -te etaže skladiščnega regala. Sledi vožnja AMR v vodoravni (x) smeri do skladiščnega mesta v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala, kjer je v zabojčku zahtevani artikel (slika 95).



Slika 95: Dvig AMR na j -to etažo skladiščnega regala

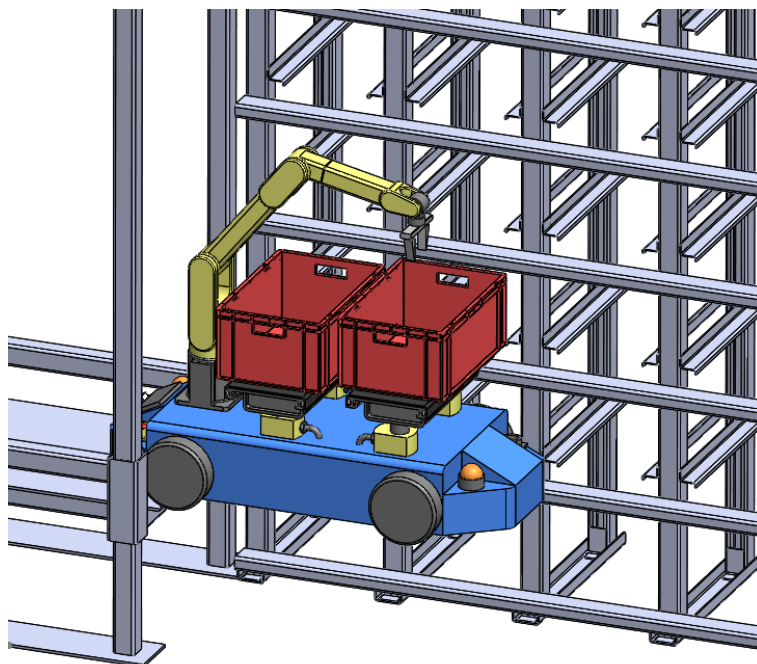
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Nato zabojček iz skladiščnega mesta izvzame pomični mehanizem, nameščen na AMR (sliki 96 in 97).



Slika 96: Vožnja AMR na izbrano skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

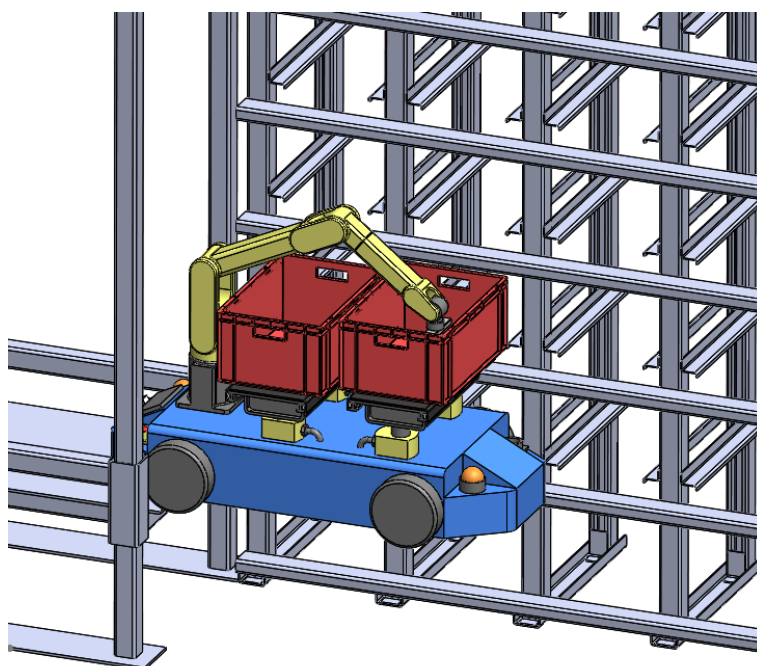
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 97: Izvzem zabojevka s pomičnim mehanizmom AMR v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

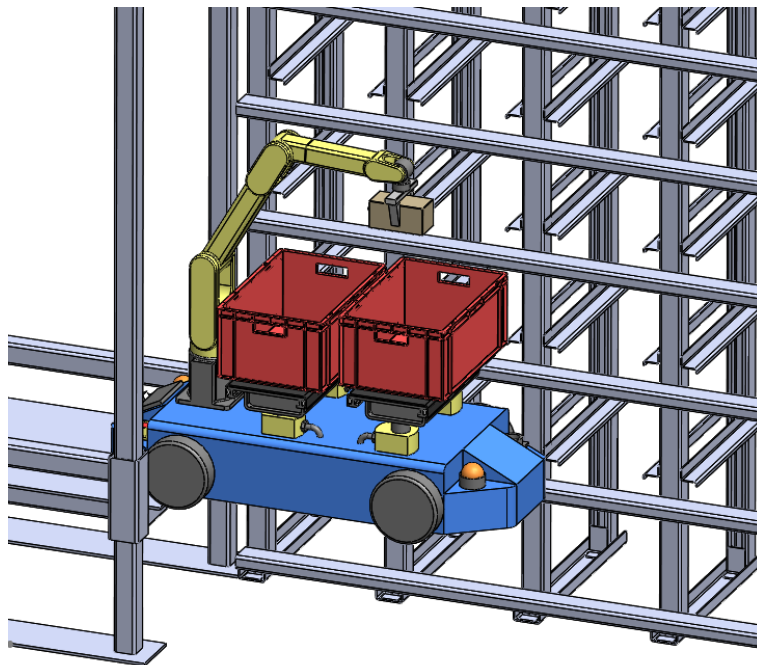
Sledi proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega zabojevka v komisionirni zabojevka, ki je nameščen tik ob robotski roki (slike 98, 99 in 100).



Slika 98: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojevka, 1/3

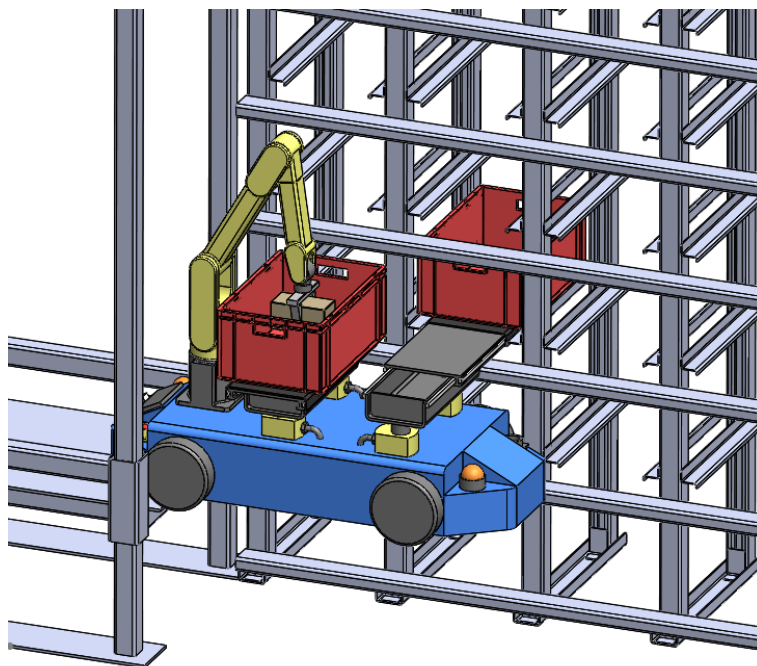
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Glede na dimenzije AMR in uporabljenih transportnih zaboječkov je treba zagotoviti ustrezen doseg robotske roke skupaj z robotskim prijematlom za učinkovit oprijem artiklov pri procesu robotskega komisioniranja.



Slika 99: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zaboječek, 2/3

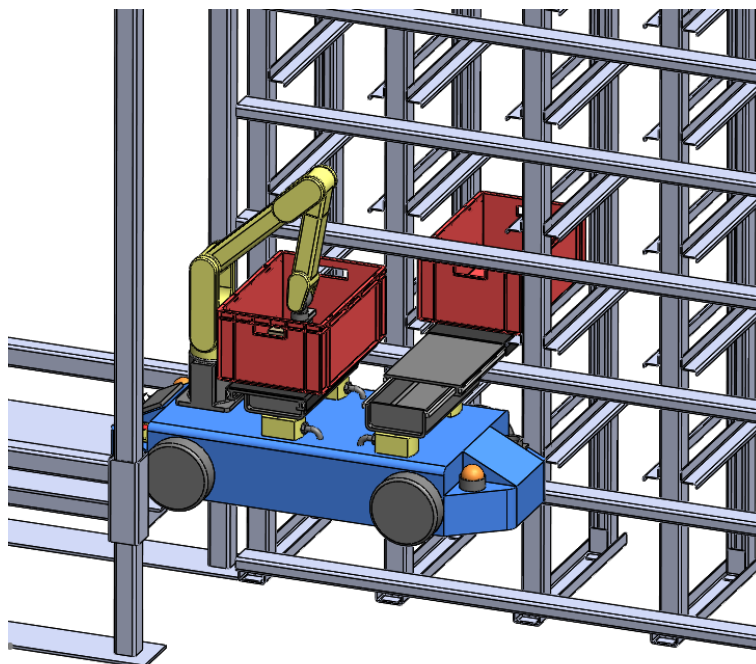
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 100: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zaboječek, 3/3

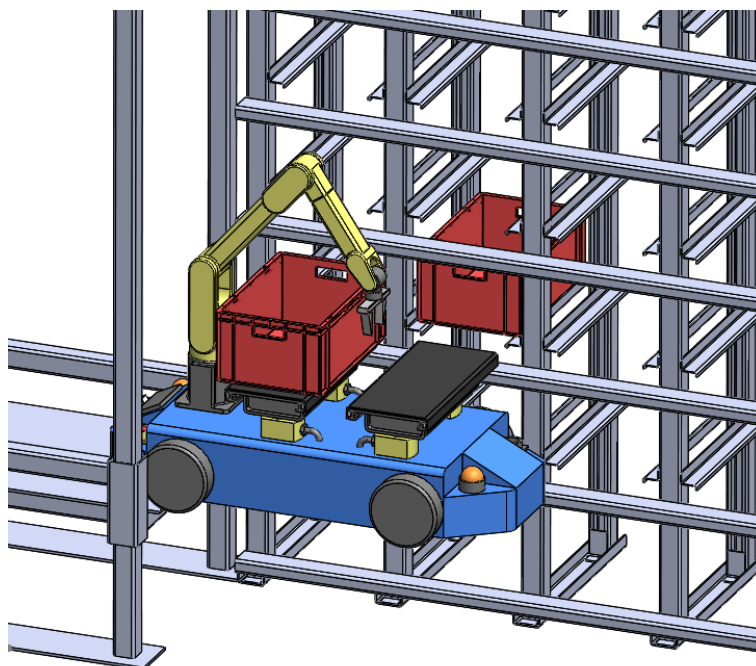
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Po izvedenem procesu robotskega komisioriranja sledi vnos skladiščnega zaboječka nazaj na isto skladiščno mesto v regalnem skladišču (sliki 101 in 102).



Slika 101: Vnos zaboječka s pomičnim mehanizmom AMR v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



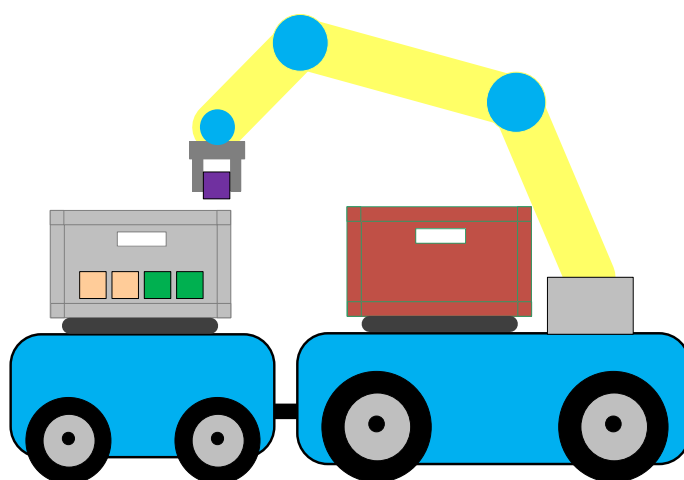
Slika 102: Nadaljevanje vožnje AMR na naslednjo skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Enak proces komisioniranja se izvede na naslednjem skladiščnem mestu glede na naročilo artiklov v posameznem delovnem nalogu.

4.4.3 AMR z robotsko roko in pomožnim vozičkom za delo v skladiščnem regalu

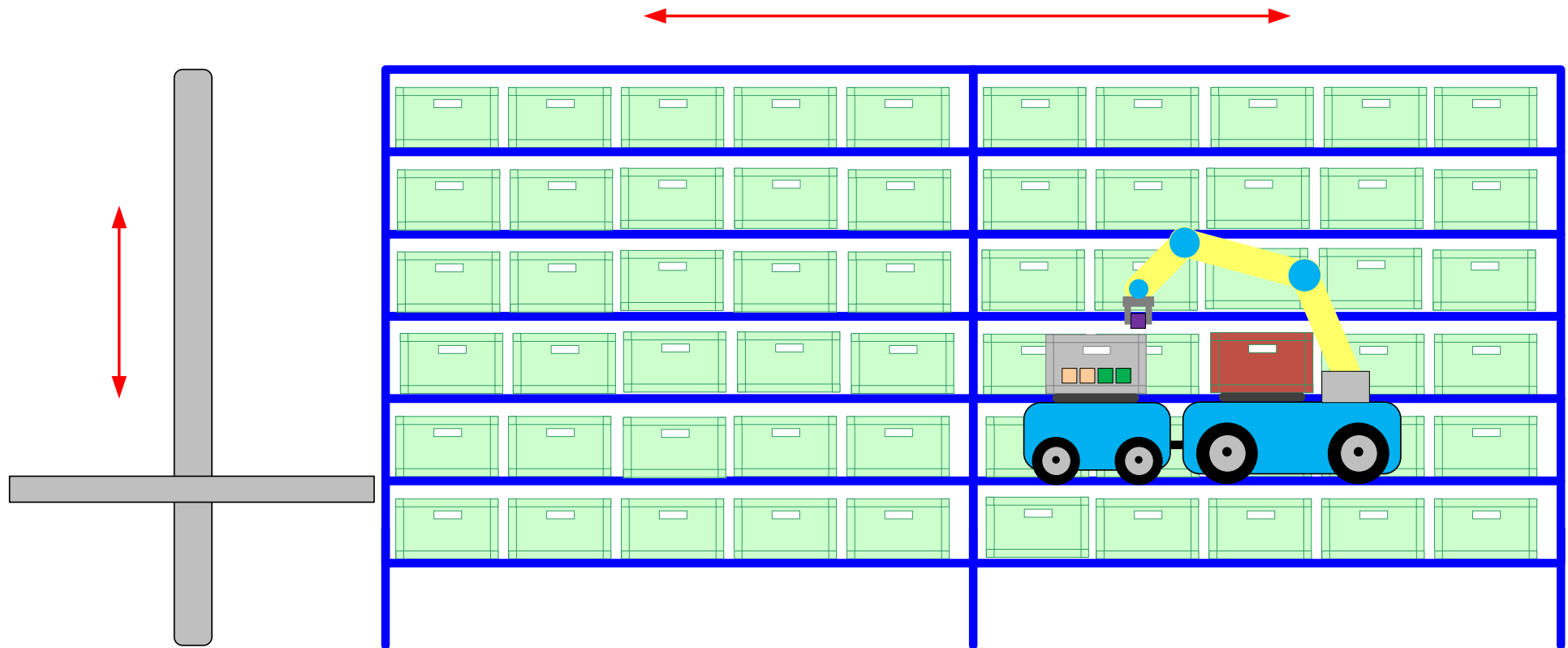
Posebna izvedba AMR z robotsko roko in pomožnim vozičkom za delo v skladiščnem regalu je sestavljena iz delovnega AMR z robotsko roko za manipulacijo skladiščnih zabojčkov in pomožnega AMR za potrebe transporta komisionirnih zabojčkov. Na obeh AMR sta nameščena pomična mehanizma za manipulacijo zabojčkov (slika 103).



Slika 103: AMR z robotsko roko in pomožnim vozičkom

Vir: lasten

Tudi v tem primeru delovni AMR zagotavlja manipulacijo skladiščnega zabojčka zaradi izrazito majhne višine etaže skladiščnega regala, kar ima za posledico omejitve direktnega dostopa robotske roke do artiklov v skladiščnem zabojčku. Proces robotskega komisioniranja se vedno izvaja v kombinaciji obeh AMR (delovnega in pomožnega). Pri procesu komisioniranja pomični mehanizem na delovnem AMR izvzame skladiščni zabojček iz skladiščnega mesta v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala. Sledi proces robotskega komisioniranja z robotsko roko oz. proces prelaganja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojček, ki je nameščen na pomožnem AMR. Po zaključku procesa komisioniranja pomični mehanizem na AMR odloži skladiščni zabojček nazaj na skladiščno mesto v skladiščnem regalu. Sledi vožnja AMR na drugo skladiščno mesto v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala, kjer se ponovi proces robotskega komisioniranja artiklov. Po izvedenem procesu komisioniranja lahko pomožni AMR zapusti delovni AMR za odpremo zabojčka z artikli ali pa oba nadaljujeta vožnjo na naslednjo skladiščno lokacijo (slika 104).

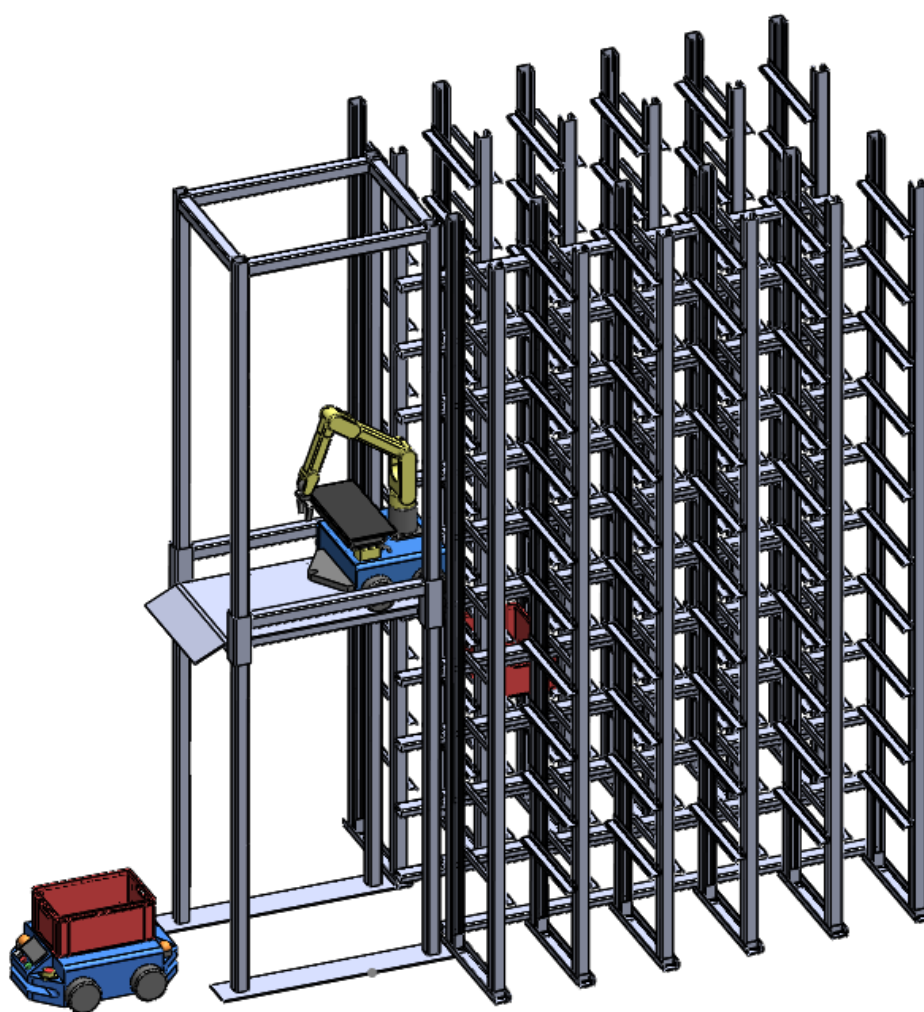


Slika 104: AMR z robotsko roko in pomožnim vozičkom za delo v skladiščnem regalu

Vir: lasten

V nadaljevanju bo podrobneje prikazan proces delovanja avtomatskega vozička z integrirano robotsko roko – varianta II s prikazom slik v 2D- in 3D-pogledu, ki so bile izdelane v sodelovanju z Laboratorijem za transportne naprave, sisteme in logistiko (LTN) Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru ter Laboratorijem za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije (LASOK) Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani.

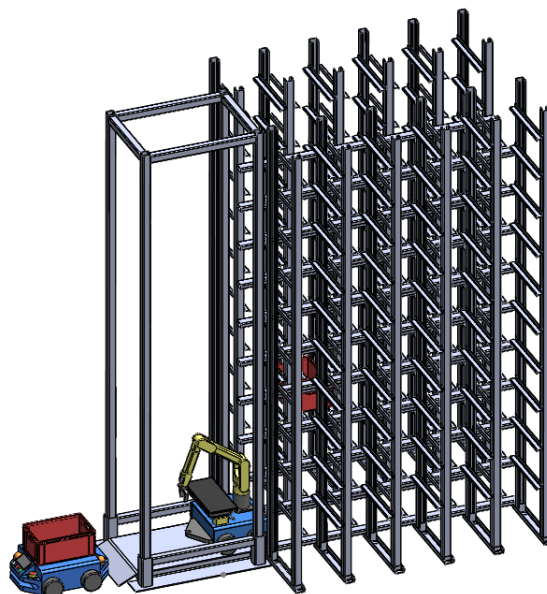
Na sliki 105 je prikazan položaj delovnega AMR z robotsko roko na dvizni mizi dvigala ter pomožnega AMR pred vhodom v regalno skladišče.



Slika 105: Položaj delovnega in pomožnega AMR v skladiščnem regalu

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

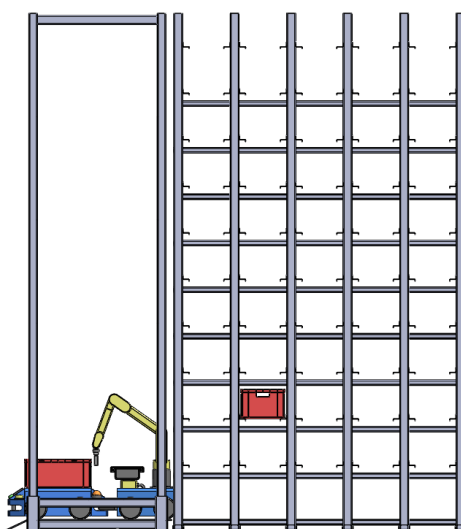
Sledi pomik dvižne mize z delovnim AMR do prve etaže skladišča, kjer se združita delovni in pomožni AMR (slika 106).



Slika 106: Pomik delovnega AMR v prvo etažo skladiščnega regala

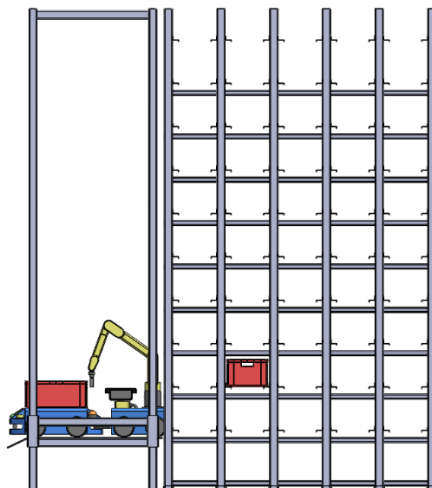
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Glede na naročilo za komisioniranje artiklov v izbranem delovnem nalogu sledi pomik sklopa delovnega in pomožnega AMR v navpični (y) smeri na j -to etažo skladiščnega regala. Glede na izbrano skladiščno mesto sledi vožnja sklopa delovnega in pomožnega AMR v vodoravni (x) smeri do i -tega stolpca skladiščnega regala (slike 107, 108 in 109).



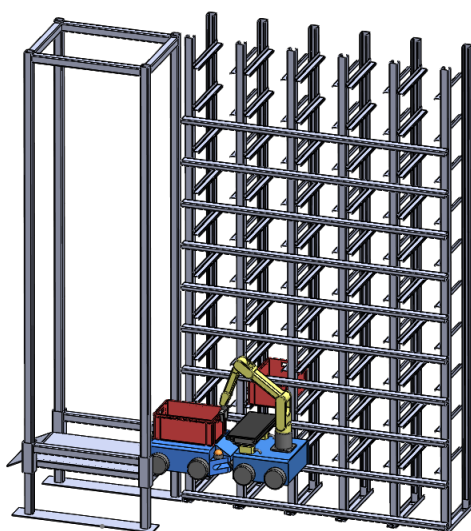
Slika 107: Združitev delovnega AMR in pomožnega AMR v zaključen sklop delovnega in pomožnega AMR

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 108: Dvig sklopa delovnega in pomožnega AMR na j -to etažo skladiščnega regala

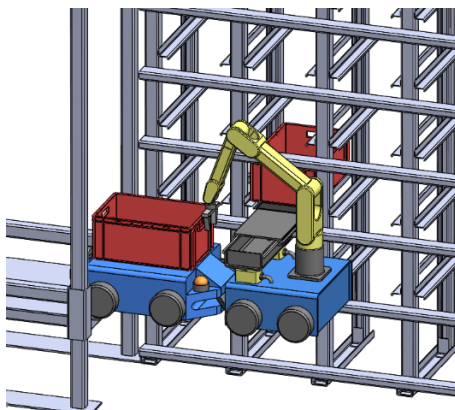
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 109: Vožnja sklopa delovnega in pomožnega AMR na izbrano skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

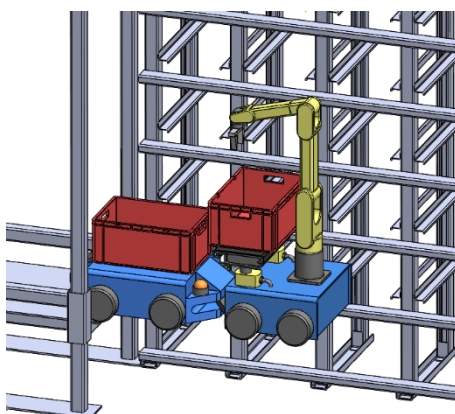
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Sledita izvzem skladiščnega zabojevka s pomičnim mehanizmom, nameščenim na delovnem AMR, in priprava robotske roke na proces robotskega komisioniranja artiklov (sliki 110 in 111).



Slika 110: Izvzem skladiščnega zaboječka s pomičnim mehanizmom delovnega AMR v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

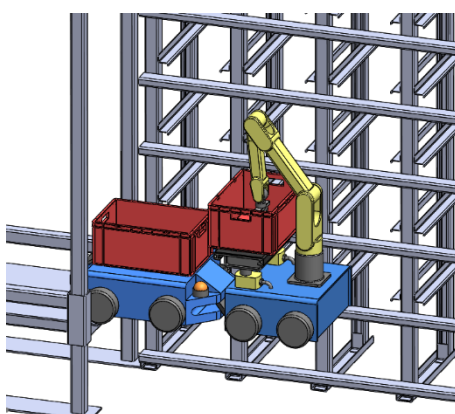
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 111: Priprava robotske roke na proces robotskega komisioniranja artiklov

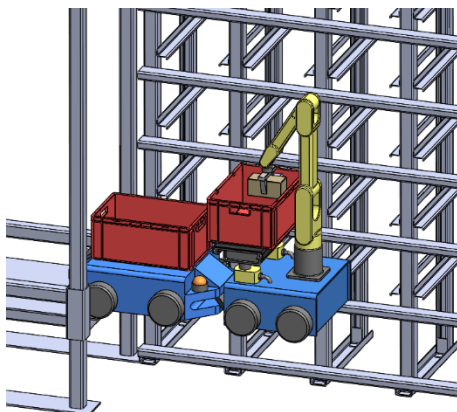
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Z uporabo robotske roke z robotskim prijemalom, ki mora zagotavljati ustrezen doseg za odlaganje artiklov v komisionirni zaboječek, se izvede proces robotskega komisioniranja (slike 112, 113 in 114).



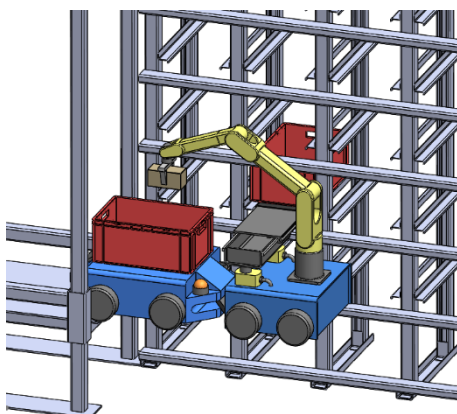
Slika 112: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zaboječek, 1/3

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 113: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojček, 2/3

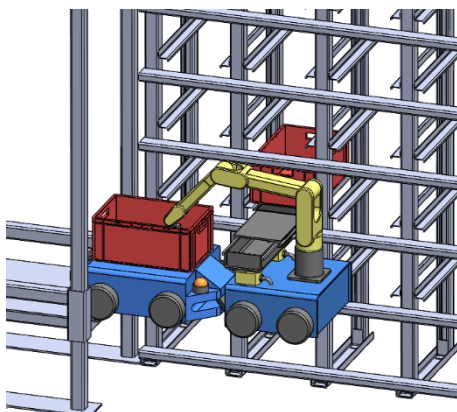
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 114: Proces robotskega komisioniranja artiklov iz skladiščnega v komisionirni zabojček, 3/3

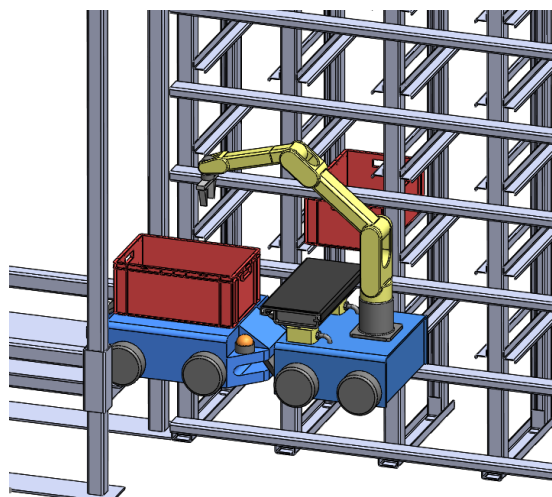
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Po izvedenem procesu robotskega komisioniranja se skladiščni zabojček odloži na isto skladiščno mesto v skladiščnem regalu; sledi pozicioniranje robotske roke v položaj za transport sklopa delovnega in pomožnega AMR (sliki 115 in 116).



Slika 115: Vnos zabojčka s pomičnim mehanizmom delovnega AMR v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

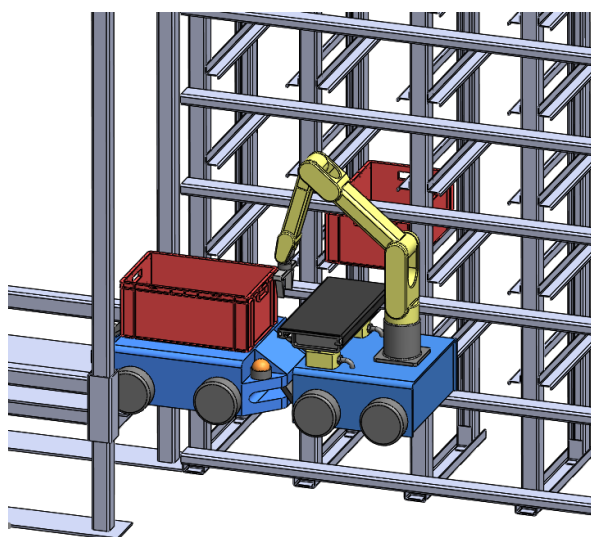
Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani



Slika 116: Pozicioniranje robotske roke v položaj za transport sklopa delovnega in pomožnega AMR

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Sledi vožnja sklopa delovnega in pomožnega AMR na naslednjo skladiščno lokacijo, kjer se proces robotskega komisioniranja ponovi (slika 117).



Slika 117: Nadaljevanje vožnje sklopa delovnega in pomožnega AMR na naslednjo skladiščno lokacijo v i -tem stolpcu in j -ti etaži skladiščnega regala

Vir: LASOK, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani

Po zaključku procesa komisioniranja delovni AMR nadaljuje svoje delo v skladiščnem regalu, medtem ko pomožni AMR dostavi transportni zabojček z artikli na vhodno/izhodno lokacijo skladišča za odpremo.

Literatura

- Alexandersson S. (2016) *Driverless vehicles – a reality at Volvo already in 1973*. https://www.kollmorgen.com/en-us/blogs/_blog-in-motion/articles/samuel-alexandersson/driverless-vehicles-a-reality-at-volvo-already-in-1973/, dostop 21. 6. 2021
- Bozer A. Y., White A. J. (1984). Travel-Time Models for Automated Storage and Retrieval Systems, *IIE Transactions*, vol. 16, no. 4, str. 329–338.
- FEM 9.860. *Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems*, 2017.
- Fragapane, G., De Koster, R., Sgarbossa, F., Strandhagen, J.O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda, Volume 294, Issue 2, str. 405–426.
- Gudehus T. *Principles of order picking: Operations in Distribution and Warehousing Systems*, Essen, Germany, 1973.
- Kay M. B. *Lecture Notes for Production system design*, North Carolina State University, USA, 2016.
- Laboratorij za transportne naprave in sisteme ter nosilne strojne konstrukcije (LASOK), Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, 2021. Slikovno gradivo idejnih konceptov avtomatiziranih in robotiziranih transportno-skladiščnih sistemov AGV in AMR v fazi koncipiranja in nadaljnega razvoja.
- Lerher, T., Ekren, B.Y., Dukic, G., Rosi, B. (2015). Travel Time Model for Shuttle-based Storage and Retrieval Systems, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Volume 78 (9–12), str. 1705–1725.
- Lerher, T. (2018). Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems with Robotic Order-Picking Shuttle Carrier. 15th IMHRC Proceedings (Savannah, Georgia. USA – 2018).
https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2018/7
- MATLAB. (2021). version 7.10.0 (R2020a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Malmberg, C.J. (2002). Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems, *International Journal of Production Research*, Volume 40, Issue (8), str. 1807–1822.
- Marković, G. Primerjava klasičnega in conskega komisioniranja s pomočjo avtonomnih vozil, diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa, Fakulteta za logistiko UM, 2021.
- Nils Boysen, N., De Koster, R., Weidinger F. (2019). Warehousing in the e-commerce era: A survey, *European Journal of Operational Research*, Volume 277, Issue 2, str. 396–411.
- Ten Hompel, M., Sadowsky, V., Beck, M. *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 – Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- Ullrich G. (2015) *The History of Automated Guided Vehicle Systems*. In: Automated Guided Vehicle Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44814-4_1

- Van Wijngaarden, B., Ketelaars, T. (2014). Shuttles in Warehouse Logistics, *Logistik Werkstatt Graz* 2015, Graz University of Technology, Austria.
- VDI 2692 Blatt 1. *Automated vehicle storage and retrieval systems for small unit loads*, 2015.
- Vidovics H. *Die Systemanalyse und Umschlagleistungen von Regalförderzeugen mit Mehrfachlastaufnahmemitteln*, Ph.D. dissertation, Technische Universität Graz, 1994.

Spletni viri:

Adobe Stock

<https://stock.adobe.com/>, dostop 21. 6. 2021

Amazon Robotics

<http://www.amazonrobotics.com/>, dostop 21. 6. 2021

European materials handling federation

<https://www.fem-eur.com/>, dostop 21. 6. 2021

Exotec

<https://www.exotec.com/>, dostop 21. 6. 2021

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik

<https://www.iml.fraunhofer.de/>, dostop 21. 6. 2021

Grenzebach

<https://www.grenzebach.com/>, dostop 21. 6. 2021

Kollmorgen

<https://www.kollmorgen.com/>, dostop 21. 6. 2021

Locus Robotics

<https://locusrobotics.com/>, dostop 21. 6. 2021

Magazino

<https://www.magazino.eu/>, dostop 21. 6. 2021

Scallog

<https://www.scallog.com/>, dostop 21. 6. 2021

Statista

<https://www.statista.com/>, dostop 21. 6. 2021

Swisslog

<https://www.swisslog.com/>, dostop 21. 6. 2021

AVTOMATSKA VOZILA IN MOBILNI ROBOTI V INTRALOGISTIKI

TONE LERHER

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija
tone.lerher@um.si

Povzetek Učbenik obravnava avtomatizacijo in robotizacijo notranjega transporta v intralogistiki, kjer so navedena avtomatsko vodena vozila AGV in avtonomni mobilni roboti AMR. Poleg tehnično-tehnoloških karakteristik AGV in AMR so predstavljene posamezne izvedbe AGV in AMR, ki se uporabljajo širše v logistiki. V učbeniku so posebej obravnavani avtomatski vozički za delo v avtomatiziranih regalnih skladiščnih sistemih in avtonomni mobilni roboti za delovanje v skladiščih prihodnosti. Navedeni so temeljni analitični in numerični modeli za določitev pretočne zmogljivosti AGV in AMR v skladiščnih sistemih. Poleg že ustaljenih rešitev AGV in AMR v skladiščih v praksi so predstavljeni novi idejni koncepti avtomatiziranih in robotiziranih transportno-skladiščnih sistemov AGV in AMR, ki so trenutno se v fazi koncipiranja in nadaljnega razvoja.

Ključne besede:

Intralogistika,
skladišča,
avtomatizacija in
robotizacija,
AGV in
AMR,
idejni
koncepti
AGV in
AMR



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

