



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Arttu Kangasperko

Työstökoneiden työkaluhallinnan kehittäminen kohti Teollisuus 4.0:n vaatimuksia

Opinnäytetyö

Kevät 2022

Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Sähköautomaatio

Tekijä: Arttu Kangasperko

Työn nimi: Työstökoneiden työkaluhallinnan kehittäminen kohti Teollisuus 4.0:n vaatimuksia

Ohjaaja: Niko Ristimäki

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 79

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Tamperelainen JTA Connection Oy. Yritys tarjoaa lukuisille teollisuuden toimialoille räätälöityjä tuotanto- ja logistiikka-automaatoratkaisuja. Työ tehtiin yhteistyössä ylöjärveläisen Suomen suurimman vaativiin hydraulisiin lohko- ja komponenttierikoissarjoihin erikoistuneen ST-Koneistus Oy:n kanssa, jonka työstökoneisiin tämä työ toteutettiin.

Työn tavoitteena oli mahdollistaa Tongtai SH-4000P -työstökoneiden työkalutietojen käsittely sekä työstökoneiden työkalumakasiinien ohjaus ulkoisella järjestelmällä. Tavoitteena työkalutietojen osalta oli mahdollistaa työkalujen rekisteröinti ja myös niiden poistaminen työstökoneilta, sekä työkaluihin liittyvien geometriatietojen ja leikkuaikojen luku ja kirjoitus. Makasiinin ohjauksen tavoitteena oli mahdollistaa sen paikoitus esimerkiksi ulkoisella ohjelmoitavalla logiikalla, jotta työkaluja voitaisiin lastata työstökoneeseen robotin avulla.

Työn toteutus alkoi työkalutietojen käsittelyllä. Ensin selvitettiin työkalutietojen tallennuspaikat työstökoneiden muistista. Tallennuspaikkojen selvityksen jälkeen luotiin kirjasto C# .NET -ympäristössä. Tähän kirjastoon lisättiin funktiot työkalutietojen käsittelyyn Fanuc FOCAS -kirjastoa käyttäen. Tämän jälkeen työstökoneiden logiikkaohjelmiin tehtiin tarvittavat muutokset, joilla mahdollistettiin makasiinin ulkoinen ohjaus. Luotuun kirjastoon lisättiin vielä funktiot makasiinin ohjaamiseksi.

Lopputulokseksi saatiin kirjasto työkalutietojen käsittelyn mahdollistavista funktioista. Tähän samaan kirjastoon sisällytettiin myös funktiot työstökoneiden makasiinien ohjaukseen. Työstökoneiden logiikkaohjelmiin saatiin tehtyä tarvittavat muutokset makasiinin ohjausta varten sekä kasvatettiin käytettäviä työkalunumeroita alkuperäisestä 99:sta 250:een.

¹ Asiasanat: työstökoneet, automaatiojärjestelmät, rajapinnat, joustava tuotanto, esineiden internet

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Automation Engineering

Specialisation: Electrical Automation

Author: Arttu Kangasperko

Title of thesis: Developing the Tool Management of Machine Tools Towards Industry 4.0 Requirements

Supervisor: Niko Ristimäki

Year: 2022

Number of pages: 79

The thesis was made for an automation company JTA Connection based in Tampere. The company offers customized production and logistics automation solutions for numerous industries. The thesis was made in cooperation with ST-Koneistus based in Ylöjärvi. The company is Finland's largest manufacturer of hydraulic manifolds and components specializing in demanding special series. The research was performed for the machine tools of ST-Koneistus.

The objective of the thesis was to enable external tool data management with the control of a tool magazine for Tongtai SH-4000P machine tools. The aim regarding tool data was to enable the registration of tools together with geometry and operating data into the machine tools. The objective of the tool magazine control was to enable the control of the magazine with any external control system. The magazine control was mandatory for the tool handling with a robot.

The work was started by finding the tool data memory locations in the machine tools. A library was then created using C# .NET Framework and data management was enabled by adding functions using the Fanuc FOCAS -library. Then modifications were made to the logic controllers of the machine tools to enable external magazine control. Finally, the functions which the tool magazine can be controlled with were also added to the library.

All requirements were met, and as the result there was a library of functions needed for processing tool data and controlling the tool magazine. This library can be integrated into the control systems in the future. The control of the magazine was enabled with modifications made to the logic programs of the machine tools. The tool numbering of the machine tools was also expanded from 99 to 250.

¹ Keywords: machine tools, automation systems, interfaces, flexible production, internet of things

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	1
Thesis abstract	2
SISÄLTÖ	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkuuettelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	9
1 JOHDANTO	10
1.1 Työn tausta	10
1.2 Työn tavoite.....	10
1.3 Työn rakenne	11
1.4 Yritysesittelyt	11
2 TYÖSTÖKONEEN OHJELMOINTI.....	12
2.1 CNC	12
2.1.1 G-koodi	12
2.1.2 PLC:n rooli työstökoneessa	13
2.1.3 G-koodin komennot.....	15
2.1.4 Fanuc Custom Macro B	17
2.2 Fanuc PMC	17
2.2.1 Muistiosoitteet.....	18
2.2.2 PMC-parametrit.....	20
2.2.3 Fanuc PMC:n tikapuulogiikka.....	21
2.2.4 Prosessointijärjestys	23
2.2.5 Aliohjelmat	24
2.2.6 PMC:n perus- ja toiminnalliset operaatiot	25
3 FANUC FOCAS -KIRJASTO	26
3.1 Fanuc FOCAS -kirjaston ominaisuudet	26
3.2 Yhteystyypit.....	27
3.3 Kirjastotiedostot.....	28
3.4 Yhteyden luonti.....	29

4	TYÖKALUTIETOJEN KÄSITTELY	31
4.1	Alkuselvytys.....	31
4.2	Käsiteltävät työkalutiedot.....	31
4.3	Työkalutiedot työstökoneen muistissa	32
4.3.1	Työkalut työstökoneessa ja niiden sijainti	33
4.3.2	Työkalujen kompensointiarvot.....	35
4.3.3	Työkalujen leikkuuajat.....	37
5	TYÖSTÖKONEEN TYÖKALUMAKASIININ ULKOINEN OHJAUS	39
5.1	Automaattinen työkalunvaihto	39
5.2	Työkalunvaihtosekvenssi	40
5.3	Makasiinin vakio-ohjaus	41
5.4	Makasiinin ulkoisen ohjauksen toteutus	43
5.4.1	Rajapintaosoitteet	43
5.4.2	Sekvenssiohjelma	44
5.5	Muutos työkalunumeroiden käsittelyyn.....	47
6	RAJAPINTASOVELLUS.....	49
6.1	Projektin perustaminen.....	49
6.2	Työkalujen hallinta.....	49
6.3	Työkalujen kompensointiarvojen hallinta.....	51
6.4	Työkalujen käyttöaikojen hallinta.....	54
6.5	Makasiinin ohjaus.....	57
6.5.1	PMC-osoitteiden luku.....	57
6.5.2	PMC-osoitteiden kirjoitus	58
7	JOUSTAVA VALMISTUS	60
7.1	FMS, joustava valmistusjärjestelmä	60
7.2	FMS-järjestelmätyypit.....	61
7.3	FMS-asetelmatyypit.....	61
7.4	FMS-järjestelmän vahvuuksia	64
7.5	FMS-järjestelmän heikkouksia.....	64
7.6	FMS-järjestelmiä	64
7.6.1	Fastems MLS.....	65

7.6.2	Mazak PALLETECH	65
7.7	JTA FMF	66
7.8	Älykäs valmistus.....	67
7.8.1	OPC UA	68
7.8.2	umati	69
7.8.3	MTConnect	71
8	TULOKSET	73
9	POHDINTA JA YHTEENVETO.....	74
	LÄHTEET	76

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Työkaluhallinta CNC:llä.	33
Kuva 2. Työkalujen geometriatietojen hallinta.....	35
Kuva 3. Työkalujen geometriatiedot makromuuttujissa.....	36
Kuva 4. Työkalujen leikkuaikojen hallinta.....	37
Kuva 5. Työkalujen leikkuaajat järjestelmämuuttujissa.	38
Kuva 6. Työkalumakasiini ja automaattinen työkalunvaihtaja.	39
Kuva 7. Työkalumakasiini koneen sivusta.	40
Kuva 8. Automaattisen työkalunvaihdon CNC-makro.	46
Kuvio 1. Vaiheet kappaleen mallinnuksesta valmiiseen kappaleeseen.	13
Kuvio 2. CNC-koneen ohjausjärjestelmän rakenne.	14
Kuvio 3. Kirjaimien ja numeroiden yhdistelmät muodostuvat sanoiksi ja käskylohkoiksi. ...	15
Kuvio 4. PMC:n peruskonfiguraatio.	18
Kuvio 5. PMC-signaaliosoitteet.	19
Kuvio 6. PMC-osoitteen määrittely.....	19
Kuvio 7. Tikapuulogiikan ohjelmakierto.....	21
Kuvio 8. Fanuc-tikapuukaavio.....	22
Kuvio 9. Sekvenssiohjelman rakenne.	23
Kuvio 10. Esimerkki aliohjelmasta ja sen kutsusta.....	24
Kuvio 11. Ethernet-kommunikaatio.	27

Kuvio 12. Kommunikointiohjelman suoritusjärjestys.	29
Kuvio 13. Uuden valitun työkalun vertaus karalla olevaan työkaluun.....	34
Kuvio 14. Työkalun makasiinipaikan etsintä.	34
Kuvio 15. Työkaluvaihdon sekvenssi.	41
Kuvio 16. Makasiinin ohjaus ohjelmatasoilla.....	42
Kuvio 17. Makasiinin robottipaikan kääntö paikoituspaikaksi.	45
Kuvio 18. Ulkoisen ohjauksen sekvenssin rakenne.	47
Kuvio 19. Työkalupaikan luku työstökoneesta.	50
Kuvio 20. Työkalun kirjoitus työkalupaikkaan.....	51
Kuvio 21. Työkalun kompensointiarvojen luku.	52
Kuvio 22. Työkalun kompensointiarvojen kirjoitus.	53
Kuvio 23. Työkalun käyttöaikojen luku.	55
Kuvio 24. Työkalun käyttöaikojen kirjoitus.	56
Kuvio 25. PMC-osoitteiden lukuun luodut funktiot.....	58
Kuvio 26. PMC-osoitteiden kirjoitukseen luodut funktiot.	59
Kuvio 27. Joustavan valmistusjärjestelmän komponentteja.....	60
Kuvio 28. Viivatyypinen FMS-järjestelmä.....	61
Kuvio 29. Silmukkatyypinen FMS-järjestelmä.	62
Kuvio 30. Tikapuutyypinen FMS-järjestelmä.....	62
Kuvio 31. Avoimen kentän -tyypinen FMS-järjestelmä.....	63
Kuvio 32. Robottikeskeinen FMS-järjestelmä.	63

Kuvio 33. FMF-järjestelmä.	67
Kuvio 34. Järjestelmien välinen kommunikointi OPC UA:n avulla.	68
Kuvio 35. umati-järjestelmäpino.	70
Kuvio 36. MTConnect-kommunikointimalli.	71
Taulukko 1. Esimerkkejä G-koodin kirjainosoitteista.	16
Taulukko 2. Binääri- ja BCD-esityksen erot kymmenjärjestelmän luvuista.	20
Taulukko 3. Tikapuukaavion symbolit.	22
Taulukko 4. PMC operaatiot.	25
Taulukko 5. FOCAS-kirjaston ominaisuudet.	26
Taulukko 6. FOCAS-kirjaston 32-bittiset kirjastot.	28
Taulukko 7. FOCAS-kirjaston 64-bittiset kirjastot.	29
Taulukko 9. Työkalun käsiteltävät tiedot.	32
Taulukko 10. Työkalujen kompensointiarvojen järjestelmämuuttujat.	36
Taulukko 11. Makasiinin ohjauksen osoitteet.	44

Käytetyt termit ja lyhenteet

AGV	Automated Guided Vehicle eli automaattisesti ohjattu ajoneuvo, suomeksi vihivaunu. Automaattitrucki, joka siirtää tavaraa ennalta määrättyjä reittejä pitkin.
CAD	Computer Aided Desing eli tietokoneohjattu suunnittelu.
CAM	Computer Aided Manufacturing eli tietokoneohjattu valmistus.
CNC	Computer Numerical Control eli tietokoneistettu numeerinen ohjaus.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol eli hypertekstin siirtoprotokolla, jota selaimet ja WWW-palvelimet käyttävät tiedonsiirtoon.
PLC	Programmable logic controller eli ohjelmoitava logiikka. Ohjaa koneen toimintoja loogisen ohjelman avulla.
PMC	Programmable machine controller eli ohjelmoitava koneohjain. Fanuc CNC-ohjaimien käyttämä ohjelmoitava logiikkaohjain.
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition eli valvontaohjaus ja tiedonhankinta. Tietokoneohjelmistotyyppi, joka käsitetään valvomo-ohjelmistona.
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol eli lähetyksen ohjausprotokolla/internetprotokolla. Vastaa kahden laitteen välisestä tiedonsiirtoyhteydestä.
XML	Extensible Markup Language eli laajennettavissa oleva merkintäkieli, joka määrittää tiedon jäsennostavan.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

JTA Connection toimitti vuonna 2021 ST-Koneistus Oy:lle kahden vaakakaraisen työstökoneen palvelusolun. Solu on osa JTA Connectionin ja ST-Koneistuksen yhteistyössä toteuttamaa prototyyppiä nimeltään FMF (Flexible manufacturing factory), josta kerrotaan enemmän luvussa 7.7 JTA FMF. Tämä työ on jatkoa kyseiseen solukokonaisuuteen.

Solussa käsitellään nollapistekiinnittimiä, joihin työstettävät kappaleet kiinnitetään. Kiinnittimiä kuljetetaan soluun telineissä, joita siirrellään mobiilirobotilla. Kiinnittimet puretaan telineistä solun omaan välivarastoon, josta ne lastataan Fanuc M-710iC 70T -portaalirobotilla kahteen vaakakaraiseen Tongtai SH-4000P -työstökoneeseen. Valmistuneet kiinnittimet siirretään koneista vapaisiin telineihin tai varastoon odottamaan solusta poistoa.

Solusta on tarkoitus saada itsenäinen kokonaisuus, jolla voidaan työstää laajaa kirjoa kappaleita. Rajoite, johon tällä työllä etsitään ratkaisua, on työkalujen määrä työstökoneissa, sillä se rajoittuu koneen omaan 60-paikkaiseen työkalumakasiiniin. Työkalujen manuaalisesta vaihdosta työkalumakasiineihin sekä työkalutietojen syöttämisestä käsin työstökoneiden ohjaimiin halutaan päästä eroon. Työstökoneiden työkalukapasiteettia on laajennettava, jotta erilaisia kappaleita voidaan työstää ilman työkalujen manuaalista vaihtoa.

1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on mahdollistaa Tongtai SH-4000P -työstökoneiden työkalutietojen hallinta sekä näiden työkalumakasiinien ohjaus ulkoisella ohjausjärjestelmällä. Työstökoneet käyttävät Fanuc Series 0i-MODEL F -ohjainta, johon voidaan muodostaa yhteys Fanuc FOCAS -kirjastolla. Tässä työssä tätä kirjastoa käytetään työkalutietojen lukuun ja kirjoitukseen sekä työstökoneen PMC-rekisterien lukuun ja kirjoituksiin.

Työstökoneen alkuperäinen ohjauslogiikka ei mahdollista makasiinin ohjausta ulkoisella ohjausjärjestelmällä. Koneen PMC-ohjelmaan tehdään tarvittavat muutokset, joilla mahdollistetaan makasiinin ulkoinen ohjaus ilman, että häiritään koneen normaalia toimintaa.

Lisäksi työstökoneen PMC-ohjelma pystyy vakiona käsittelemään työkalunumeroita lukuun 99 asti vaikka CNC-ohjaimen työkaluhallinta mahdollistaa numeroinnin 250:een asti, joten tämäkin ominaisuus vaatii muutoksia työstökoneen logiikkaohjelmaan.

1.3 Työn rakenne

Teoriaosassa perehdytään työstökoneen ohjelmointiin ensin G-koodin kautta, jonka jälkeen tutustutaan Fanucin PMC:n toimintaan ja sen ohjelmointiin. Luvussa 3 käsitellään Fanuc FOCAS -kirjastoa, jolla tässä työssä toteutettiin kommunikointi työstökoneisiin. Teoriaosuuden jälkeen siirrytään työosuuteen, jossa ensimmäiseksi selvitetään käsiteltävät työkalutiedot ja näiden käsittely. Luvussa 5 käsitellään työstökoneen makasiinin ulkoisen ohjauksen toteutusta. Tämän jälkeen siirrytään rajapintasovelluksen toteutukseen, jossa käsitellään koneen työkaluhallintaan ja makasiinin ohjaukseen luodut funktiot. Luvussa 7 perehdytään vielä joustavaan valmistukseen ja uusimpiin työstökoneiden kommunikointiteknologioihin. Lopuksi käsitellään työn tuloksia ja pohditaan tehtyä työtä.

1.4 Yritysesittelyt

Toimeksiantajana toimii JTA Connection Oy. JTA Connection on Tampereella 1999 perustettu automaatiotalo (JTA Connection, i.a.). Yritys tarjoaa lukuisille teollisuustoimialoille räätälöityjä tuotanto- ja logistiikka-automaatiotratkaisuja, kuten robottisoluja, kuljettimia sekä kokonaisia tuotanto- ja kokoonpanolinjoja maailmanlaajuisesti. Lisäksi JTA tarjoaa suunnittelupalvelua tuotantoprosessien automatisoimiseksi sekä automaatiolaitteiden asennus- ja huoltotöitä. Yritys työllistää 125 henkilöä toteuttaen vuodessa 35 projektia, joista liikevaihtoa kertyy 17 miljoonaa.

Työ tehtiin yhteistyössä Ylöjärveläisen ST-Koneistus Oy:n kanssa, joka on Suomen suurin vaativiin erikoissarjoihin erikoistunut hydraulikkalohko- ja komponenttivalmistaja (ST-Koneistus Oy, i.a.-a). Vuonna 1970 perustetun yrityksen erikoisosaaminen on yksilöllisten hydraulikkakomponenttien suunnittelussa ja valmistuksessa sekä niihin liittyvissä kokoonpanotehtävissä. Yrityksen tuotanto muodostuu laajasta konekannasta, pitäen sisällään yli 30 monitoimityöstökeskusta, CNC-sorveja, robottisoluja, palettikontteja sekä FMS-järjestelmän (ST-Koneistus Oy, i.a.-b).

2 TYÖSTÖKONEEN OHJELMOINTI

2.1 CNC

Termi CNC tulee sanoista 'computer numerical control' eli suomeksi tietokoneistettu numeerinen ohjaus (Thomas Publishing Company, i.a.). CNC-työstö tarkoittaa yleensä materiaalia poistavaa tuotantoprosessia, jossa käytetään tietokoneistettua ohjausta ja työstökoneita poistamaan kerroksia työstettävästä kappaleaihiosta, kunnes saavutetaan valmis suunniteltu kappale. CNC-kone puolestaan tarkoittaa ohjelmoitavaa konetta, joka pystyy itsenäisesti suorittamaan CNC-työstön operaatioita.

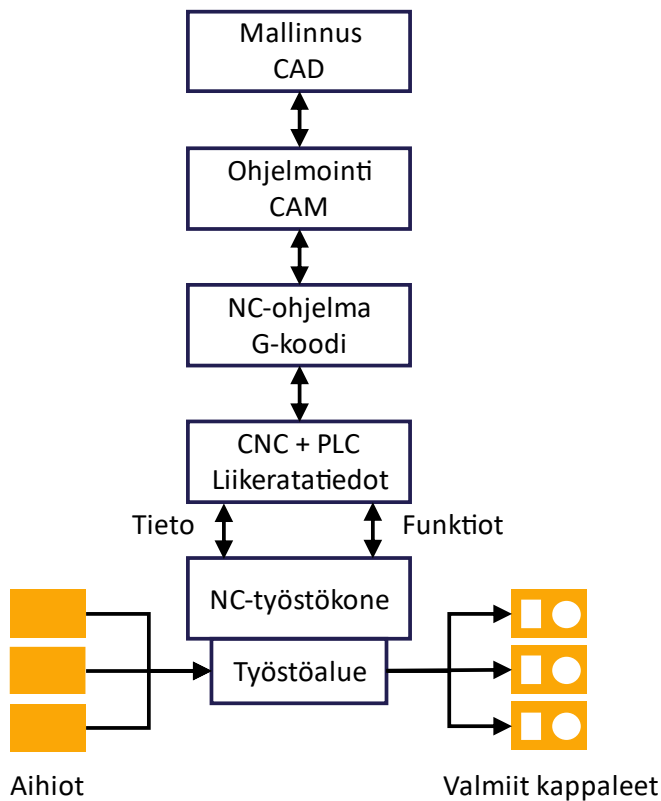
CNC-kone on riippuvainen digitaalisista ohjeista, jotka yleensä luodaan CAD- tai CAM-ohjelmistoilla (CNC Machines, i.a.). Nämä ohjelmistot tuottavat G-koodia, jota CNC-koneet osaavat suorittaa. Koneen ohjain tulkitsee koodia ja liikuttaa työstöön käytettävää työkalua tai työstettävää kappaletta monella akselilla leikatakseen halutun muodon kappaleeseen. Automatisoitu työstö on paljon nopeampi ja tarkempi verrattuna manuaalisiin työkalun ja kappaleen liikkeisiin vanhoissa vipu- ja rataskoneissa. Nykyaikaisiin CNC-koneisiin voidaan varastoida monia erilaisia työkaluja. Työstökoneen akselit ja työkalujen määrä, jotka kone voi automaattisesti vaihtaa työstön aikana, määräävät valmistettavan kappaleen monimutkaisuuden.

2.1.1 G-koodi

G-koodi tarkoittaa geometrista koodia, jota käytetään kertomaan työstökoneelle, mitä sen pitää tehdä ja miten (How To Mechatronics, i.a.). Koodin eri komennoilla kerrotaan koneelle muun muassa, minne liikkua, kuinka nopeasti ja millaista reittiä. Materiaalia poistavan koneen tapauksessa näillä komennoilla ohjataan leikkuutyökalua liikkumaan tiettyjä ratoja pitkin, samalla poistaen materiaalia, jotta kappaleesta saadaan suunnitelman mukainen. Samoin materiaalia lisäävän koneen tapauksessa komennot kertovat minne materiaalia lisätään.

G-koodia voidaan kirjoittaa suoraan CNC-koneen ohjaimeen tai sitä voidaan luoda tätä varten olevilla ohjelmilla, joita kutsutaan CAM-ohjelmiksi (Evans, 2016, s. 295). Näitä

ohjelmia käytetään yhdessä CAD-ohjelmien kanssa ja tästä käytetään nimitystä CAD/CAM. Työstettävät kappaleet suunnitellaan CAD-ohjelmilla ja näistä saadut geometriamallit viedään CAM-ohjelmaan, jossa määritellään leikkuutyökaludata ja työstöradat mallin piirteiden mukaan. Suurin hyöty CAD/CAM-yhdistelmällä on ajan säästö, sillä se on paljon tehokkaampi tapa kuin ohjelman käsin kirjoittaminen rivi riviltä.



Kuvio 1. Vaiheet kappaleen mallinnuksesta valmiiseen kappaleeseen (perustuu Kief ym., 2022, s. 29).

Kuviossa 1 on selvennetty lastuavan työstön valmistusprosessia. Prosessi alkaa kappaleen suunnittelulla ja siitä luodusta 3D-mallista. 3D-malli viedään CAM-ohjelmaan, jolla luodaan G-koodi CNC:lle. Valmis G-koodi siirretään CNC-ohjaimeen yhdessä työstettävien aihoiden kanssa. Työstön alettua CNC-ohjain suorittaa G-koodia ja ohjaa sen mukaan työstökoneetta yhdessä koneen oman ohjelmoitavan logiikan kanssa.

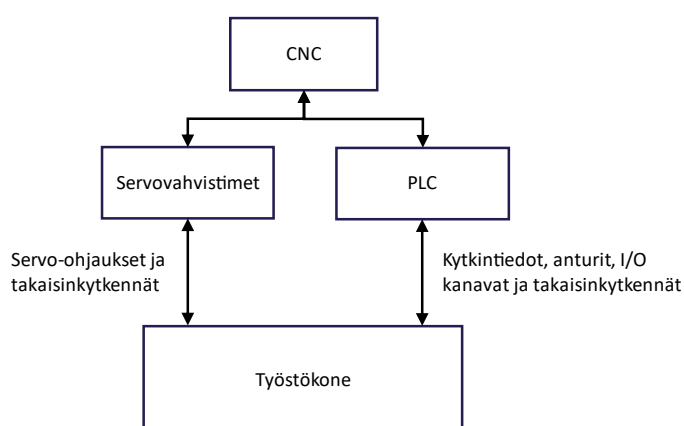
2.1.2 PLC:n rooli työstökoneessa

PLC:n olennaisin rooli työstökoneessa on ohjata ja valvoa kaikkia integrointi- ja lukitustointoja (Kief ym., 2022, s. 26–27). Jotkin funktiot, jotka suoritetaan aina samalla tavalla,

erimerkiksi työkaluvaihdot ja työkappaleiden vaihdot, käynnistetään CNC:ltä vain päälle/pois-signaalilla. Loppu prosessista suoritetaan automaattisesti PLC:n ohjatessa ja valvoessa jokaista askelta. Toiminnon valmistuessa ilman ongelmia antaa PLC luvan CNC:lle jatkaa NC-ohjelmaa.

Koneen ohjaustehtävät tallennetaan PLC:lle sen omana koodinaan ja näitä tehtäviä kutsutaan G-koodin funktioilla (Kief ym., 2022, s. 27). PLC voidaan integroida CNC-järjestelmään, jossa CNC:n prosessori suorittaa myös logiikkafunktioita, tai se voi olla erillinen yksikkö työstökoneessa. Erillisellä PLC:llä koneen logiikkaohjelma voidaan testata ja ottaa käyttöön ennen CNC-järjestelmän käyttöönottoa.

PLC:tä käytetään myös valvomaan työstöprosessia (Kief ym., 2022, s. 27). Työkalun pyörintänopeus tai hätäseis-signaali, esimerkiksi työkalun rikkoutuessa, voidaan havaita ohjaimella ja korjaavat toimenpiteet voidaan suorittaa PLC:n suoritustajan puitteissa. Hyvin dynaamisten koneiden tai prosessien reaktioaika ei ole välttämättä riittävä estämään vahinkoa koneelle tai työstettävälle kappaleelle, siksi useimmissa CNC-ohjaimissa on rajallinen määrä nopeita tulo- ja lähtökanavia kommunikoidaan suoraan NC-koneen kanssa.

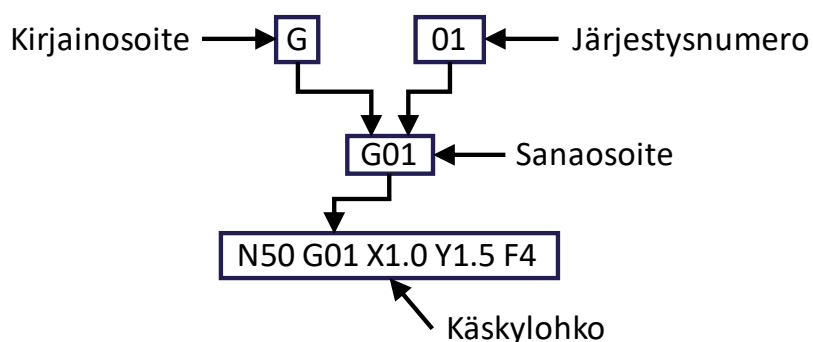


Kuvio 2. CNC-koneen ohjausjärjestelmän rakenne (perustuu Kief ym., 2022, s. 26).

Kuviossa 2 on esitetty CNC-koneen ohjausjärjestelmän rakenne. CNC-ohjain on kaiken keskiössä, se ohjaa koneen toimintaa G-koodin mukaan. Ohjain käskyttää servovahvistimia, jotka ohjaavat servojen liikkeitä. PLC on rajapinta CNC:n ja koneen muun toiminnan välillä, se suorittaa vähemmän kriittisiä toimintoja työstön kannalta, esimerkiksi työkalun vaihdot ja normaalien I/O-signaalien monitoroinnin.

2.1.3 G-koodin komennot

G-koodi koostuu kirjaimien ja numeroiden yhdistelmästä muodostuvista sanaosoitteista, jotka perustuvat ANSI/EIA RS-274-D- ja ISO 6983 -standardeihin (Daniel & Kandray, 2010, s. 120). Nämä osoitteet ovat komentoja, jotka kertovat CNC-ohjaimelle, mikä toiminto sen pitää suorittaa. Näitä sanoja järjestellään lohkoihin kuvaamaan yhtä kokonaista koneen käskyä ja näistä lohkoista rakennetaan työstöohjelma.



Kuvio 3. Kirjaimien ja numeroiden yhdistelmät muodostuvat sanoiksi ja käskylohkoiksi (perustuu Daniel & Kandray, 2010, s. 120).

Kuviossa 3 on esitetty, miten kirjainosoitteesta ja järjestysnumerosta on muodostettu sanaosoite. Sanaosoitteista muodostetaan käskylohko. Tämä kyseinen lohko ohjeistaa CNC-ohjainta suorittamaan lineaariliikkeen pisteeseen ($x = 1$, $y = 1.5$) nopeudella 4.

Taulukossa 1 on esitetty esimerkein kirjain- ja sanaosoitteita. Joillakin kirjainosoitteilla voi olla useita määrittelyitä, ja varsinainen määrittely riippuukin käytettävästä CNC-ohjaimesta ja koneen tyypistä, jota ohjataan (Daniel & Kandray, 2010, s. 121). Tarkat määrittelyt kirjain- ja sanaosoitteille tuleekin tarkistaa koneen manuaalista. Yleisimmät osoitteet on taulukossa vahvistettuna.

Sanaosoitteet voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, ulotteisiin ja ulottuvuudettomiin sanoihin (Daniel & Kandray, 2010, s. 121). Ulotteiset sanat määrittävät joko absoluuttisen tai inkrementaalisen koordinaatin työkalun keskipisteestä. Ulottuvuudettomat sanat tarjoavat komentoja ja muita parametreja, joita CNC-ohjain tarvitsee suorittaakseen annetun käskyn. Jotkin ulottuvuudettomat sanat ovat myös riippuvaisia ulotteisista sanoista suorittaakseen käskyn.

Taulukko 1. Esimerkkejä G-koodin kirjainosoitteista (perustuu Daniel & Kandray, 2010, s. 122).

Kirjain-osoite	Sanan tyyppi	Kuvaus
A	Ulotteinen sana	Määrittää X-akselin kulman
B	Ulotteinen sana	Määrittää Y-akselin kulman
C	Ulotteinen sana	Määrittää Z-akselin kulman
D	Ulotteinen sana	Määrittää akselin kulmayksikön
	Syöttöfunktio	Kolmannen akselin syöttöfunktio
	Työkalufunktio	Määrittää työkalun kompensointitiedon
E	Ulotteinen sana	Määrittää akselin kulmayksikön
	Syöttöfunktio	Toisen akselin syöttöfunktio
F	Syöttöfunktio	Pääakselin syöttöfunktio, määrää syöttösuhteen valmisteleville interpolointikoodeille
G	Valmisteleva funktio	Määrittää tiedot liittyen työkalun liikkeisiin
H	Osoittamaton	
I	Interpolointi parametri	Käytössä ympyrä interpolaatiossa määrittäen inkrementaalisen paikan kaaren keskipisteelle X suunnan alkupisteestä
	Interpolointi parametri	Kierteen etenemä suhteessa X akseliin
J	Interpolointi parametri	Käytössä ympyrä interpolaatiossa määrittäen inkrementaalisen paikan kaaren keskipisteelle Y suunnan alkupisteestä
	Interpolointi parametri	Kierteen etenemä suhteessa Y akseliin
K	Interpolointi parametri	Käytössä ympyrä interpolaatiossa määrittäen inkrementaalisen paikan kaaren keskipisteelle Z suunnan alkupisteestä
	Interpolointi parametri	Kierteen etenemä suhteessa Z akseliin
L	Osoittamaton	
M	Sekalainen funktio	Määrittää tärkeät koneen toiminnot, ei liity työkalun liikkeisiin
N	Järjestysnumero	Yksilöi käskylohkon ja määrää missä järjestyksessä ne suoritetaan
O	Järjestysnumero	Määrittää käskylohkosten suoritusjärjestyksen toisiokaralle
P	Ulotteinen sana	Määrittää kolmannen nopean liikkeen ulottuvuuden
	Ulotteinen sana	Määrittää tertiäärin liikkeen X-akselin suhteen
Q	Ulotteinen sana	Määrittää toisen nopean liikkeen ulottuvuuden
	Ulotteinen sana	Määrittää tertiäärin liikkeen Y-akselin suhteen
R	Ulotteinen sana	Määrittää ensimmäisen nopean liikkeen ulottuvuuden
	Ulotteinen sana	Määrittää tertiäärin liikkeen Z-akselin suhteen
	Ulotteinen sana	Määrittää kaaren säteen ympyrä interpolaatiossa
S	Karanopeusfunktio	Määrittää karan pyörimisnopeuden
T	Työkalufunktio	Määrittää työkalun valinnan koneissa, joissa on automaattinen työkalun vaihto
U	Ulotteinen sana	Määrittää toisioliikkeen ulottuvuuden X-akselin suhteen
V	Ulotteinen sana	Määrittää toisioliikkeen ulottuvuuden Y-akselin suhteen
W	Ulotteinen sana	Määrittää toisioliikkeen ulottuvuuden Z-akselin suhteen
X	Ulotteinen sana	Määrittää pääliikkeen ulottuvuuden X-akselin suhteen
Y	Ulotteinen sana	Määrittää pääliikkeen ulottuvuuden Y-akselin suhteen
Z	Ulotteinen sana	Määrittää pääliikkeen ulottuvuuden Z-akselin suhteen

2.1.4 Fanuc Custom Macro B

Muuttuja-aliohjelmat ovat aliohjelmia, joita voidaan parametrisoida muuttujilla eli parametreilla, näitä ohjelmia kutsutaan makroiksi (Vesamäki, 2014, s. 173). Muuttujalla tarkoitetaan jotakin merkkiä, osoitetta tai asiaa, jonka arvo voi muuttua. Muuttuja voi olla jokin mitta, lukumäärä tai jopa toiminnallinen kokonaisuus. Näitä makroja käytetään yleensä, kun tietyn tyyppinen toiminta toistuu ohjelmissa samantyyppisenä ja sen ohjelmointi tavallisella ohjelmointitavalla tuottaisi hankalia laskutoimituksia ja pidempiä työstöohjelmia. Makro-ohjelmille on varattu ohjelmanumerot 8000–8999 ja 9000–9999 (mts. 175).

Muuttujat voidaan jaotella paikallisiin-, yhteisiin- ja järjestelmämuuttujiin (Vesamäki, 2014, s. 175). Paikalliset muuttujat ovat #1–#33, näiden arvo säilyy vain siinä ohjelmassa, missä niiden arvo on määrätty (mts. 176). Mikäli hypätään seuraavaan sisäkkäiseen aliohjelmaan, ei näillä muuttujilla ole arvoa, ellei sitä ole erikseen määrätty. Palatessa takaisin edelliseen aliohjelmaan näiden arvot ovat samat kuin ennen aliohjelmaan siirtymistä. Nämä muuttujat nollautuvat ohjelman loppuessa.

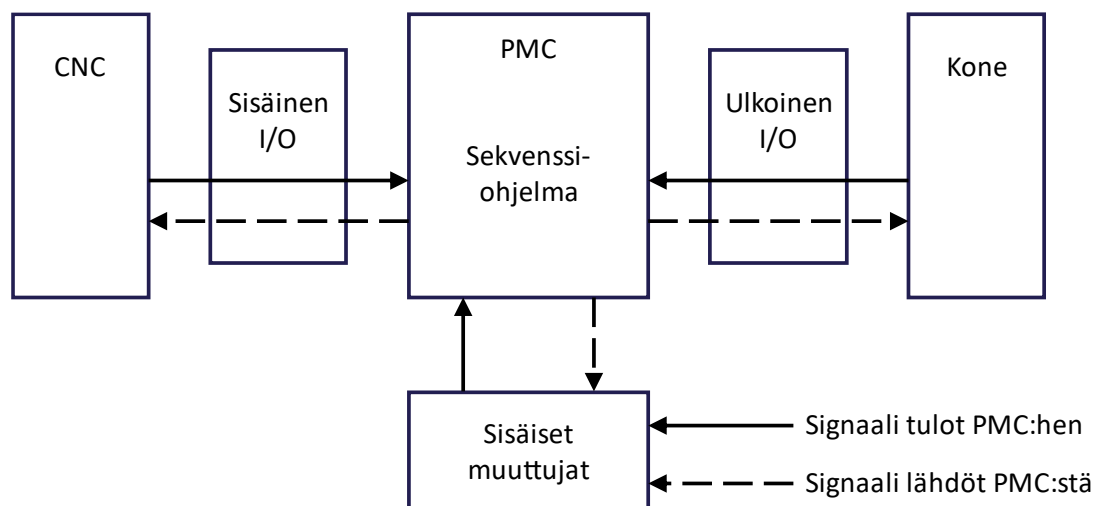
Yhteiset muuttujat jaetaan kahteen osaan, ensimmäisessä muuttujien arvot nollautuvat virtojen katketessa, näitä ovat muuttujat #100–#499, ja toisessa muuttujien arvot säilyvät, näitä ovat muuttujat #500–#999 (Vesamäki, 2014, s. 176). Yhteistä näille muuttujille on, että näiden muuttujien arvo säilyy sellaisenaan huolimatta siitä, mihin aliohjelmaan hypätään.

Järjestelmämuuttujat alkavat muuttujasta #1000, näillä voidaan lukea ja asettaa koneen tilatietoja, kuten koordinaattiarvoja, G-koodeja ja muita ohjelmakäskyjä (Vesamäki, 2014, s. 176). Tyypillisesti näitä muuttujia käytetään mitta-anturin ohjelmissa. Järjestelmämuuttujiin voidaan tallentaa myös työkalujen kompensointiarvoja (Groves, i.a., s. 6). Jotkin järjestelmämuuttujista ovat pelkästään luettavissa.

2.2 Fanuc PMC

PMC (Programmable Machine Control) on ohjelmoitava logiikkaohjain, joka on integroitu CNC-koneeseen suorittamaan sekvenssiohjauksia, kuten karan pyöritys tai työkalun vaihto (Fanuc, i.a., s. 1). Sekvenssiohjaus suorittaa ohjausaskleet peräkkäin ennalta määrätyn

sekvenssin tai logiikan mukaan. Ohjelmia, jotka suorittavat sekvenssiohjauksia työstökoneessa kutsutaan sekvenssiohjelmiksi. Pääosin nämä ohjelmat ohjelmoidaan Ladder-kielellä eli tikapuukaaviolla.



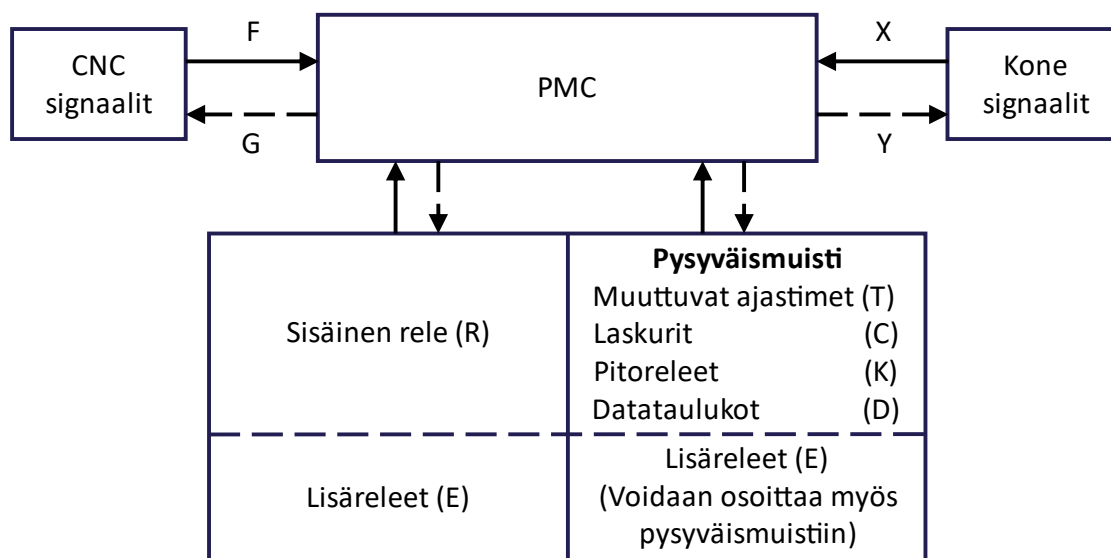
Kuvio 4. PMC:n peruskonfiguraatio (perustuu Fanuc, i.a., s. 1).

Kuviossa 4 on esitetty PMC:n peruskonfiguraatio. CNC käsittää CNC-ohjaimen, kone on työstökoneen toimilaitteet ja anturit, ja sisäiset muuttujat ovat PMC:n muuttujia. Kuviosta näkyy kuinka PMC:stä kulkee tietoa kumpaankin suuntaan niin CNC-ohjaimeen, koneeseen kuin sisäisiin muuttujiin. Sekvenssiohjelma lukee tulosignaaleja, suorittaa operaatioita ja kirjoittaa lähtöjä ennalta määrätyssä järjestyksessä.

PMC:n tulosignaalit sisältävät tuloja CNC:ltä, kuten M- ja T-funktiosignaalit, ja tuloja koneelta, kuten painikkeet syklin aloitukselle ja syötön pysäytykselle (Fanuc, i.a., s. 1). Lähtösignaalit PMC:ltä CNC:lle sisältävät muun muassa syklin aloituskäskyn ja syötön pysäytyskäskyn ja lähtöjä koneelle, kuten työkalumakasiinin ohjaus ja karan pysäytys.

2.2.1 Muistiosoitteet

PMC-muistiosoitteet kuvaavat koneen ja CNC:n kanssa vaihdettavien I/O-signaalien sijain-
teja, sisäisien releiden signaaleja sekä muistipaikkoja pysyväismuistissa (Fanuc, i.a., s. 2).



Kuvio 5. PMC-signaaliosoitteet (perustuu Fanuc, i.a., s. 2).

Kuviossa 5 on esitetty PMC-osoitteiden lajittelu. F- ja G-osoitteet ovat CNC:n ja PMC:n välisiä signaaleita, joista F-osoitteet ovat tuloja PMC:lle ja G-osoitteet lähtöjä CNC:lle. X- ja Y-osoitteet ovat fyysisiä tuloja ja lähtöjä PMC:ltä koneelle, näistä X-osoitteet ovat tuloja PMC:lle ja Y-osoitteet lähtöjä koneelle. Alimmassa laatikossa on lajiteltu PMC:n sisäiset muuttujat, nämä voidaan jakaa haihtuviin ja pysyviin muistiosoitteisiin. Haihtuvat muistiosoitteet kadottavat tilansa PMC:n sammuesssa. Pysyvät osoitteet muistavat tilansa uudelleenkäynnistyksen jälkeen. Lisäreleet voidaan määrittää joko haihtuviksi tai pysyviksi.

X127.7 ← Bitti (0-7)



Osoite (kirjain ja desimaalinumero)

Kuvio 6. PMC-osoitteen määrittely (perustuu Fanuc, i.a., s. 2).

Kuviossa 6 on näytetty, miten PMC-osoite määritetään sekvenssiohjelmassa. Osoite koostuu kirjaimesta, joka määrää osoitteen tyyppin, ja numerosta sen perässä, joka määrää osoitteen. Kuvion 6 mukaista osoitetta voidaan käyttää bittitietona eli 0 tai 1, mutta osoite voidaan määrittää myös tavuna, jolloin käsitellään lukua. Tällöin piste ja bittinumero jätetään pois.

2.2.2 PMC-parametrit

Termi PMC-parametri viittaa ajastimeen, laskuriin, pitoreleeseen ja datataulukkoon (Fanuc, i.a., s. 119). Nämä parametrit on tallennettu pysyväismuistiin, niiden tilat eivät katoa PMC:n sammussa. Jokaisella datataulukolla voi olla mielivaltainen koko, kunhan ne mahtuvat datataulukon muistialueeseen. 1-, 2- ja 4-tavuisia binääri- tai BCD-tietoja voidaan käyttää jokaiselle taululle erikseen (mts. 115).

BCD (Binary-coded decimal) eli binäärikoodattu desimaali on kymmenjärjestelmän lukujen esitystapa, jossa luvun jokainen yksittäinen numero esitetään neljällä bitillä (Sinha, 2010, s. 76). Neljällä bitillä voidaan maksimissaan saavuttaa luku 15, mutta koska suurin yksittäinen numero on 9, ei binääriesitys 1010 eli luku kymmenen ja siitä ylöspäin kuulu BCD-koodaukseen. Binääritulkinnassa binääriluku on todellinen luku, mutta tällainen tulkinta BCD-numerosta ei ole numero, jota BCD-koodaus edustaa.

Taulukko 2. Binääri- ja BCD-esityksen erot kymmenjärjestelmän luvuista (perustuu Abraham, 2016).

Kymmenjärjestelmän numero	Binäärinen esitys	Binäärikoodattu desimaali (BCD)
0	0000	0000 0000
1	0001	0000 0001
2	0010	0000 0010
3	0011	0000 0011
4	0100	0000 0100
5	0101	0000 0101
6	0110	0000 0110
7	0111	0000 0111
8	1000	0000 1000
9	1001	0000 1001
10	1010	0001 0000
11	1011	0001 0001
12	1100	0001 0010
13	1101	0001 0011
14	1110	0001 0100
15	1111	0001 0101

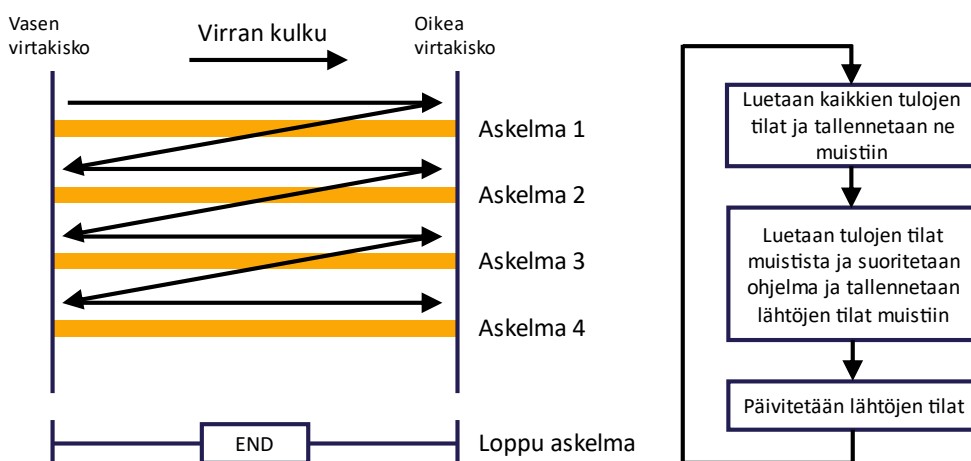
Taulukossa 2 on esimerkkejä BCD- ja binääriesitystapojen eroista. Taulukosta näkyy kuinka BCD-koodauksessa jokainen neljän bitin sarja vastaa yhtä numeroa kymmenjärjestelmän luvusta, binääritulkinta muodostuu puolestaan bittien toisista potensseista.

2.2.3 Fanuc PMC:n tikapuulogiikka

Tikapuulogiikka (LAD tai Ladder) on hyvin yleisesti käytetty PLC:n ohjelmointikieli, joka perustuu tikapuukaavioihin (Bolton, 2009, s. 113). Tikaskaavio rakentuu kahdesta pystyviivasta esittäen virtakiskoja ja näitä yhdistävistä vaakaviivoista eli virtapiireistä eli tikkaiden askelmista.

Tikapuukaaviot perustuvat seuraaviin sopimuksiin (Bolton, 2009, s. 113):

- Pystysuorat viivat kuvaavat virtakiskoja, joiden väliin piirit yhdistetään. Virta kulkee vasemmalta oikealle askelmaa pitkin.
- Jokainen askelma määrittää yhden operaation ohjausprosessissa.
- Kaaviota luetaan vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas. Ylin askelma luetaan vasemmalta oikealle, minkä jälkeen seuraava askelma luetaan samalla tavalla ja tämä toistetaan jokaiselle askelmalle. Ohjelmakierroksi kutsutaan jokaisen askelen läpikäyntiä.
- Jokaisen askelman pitää alkaa ainakin yhdellä tulolla ja sen pitää päättyä ainakin yhteen lähtöön.
- Sähköiset laitteet kuvataan niiden normaaleissa tiloissa. Esimerkiksi normaalisti avoin kytkin kuvataan avoimena, kunnes jokin sulkee sen.
- Tietty laite voi esiintyä useammassa kuin yhdessä askeleessa.
- Tulot ja lähdöt yksilöidään niiden osoitteiden mukaan.



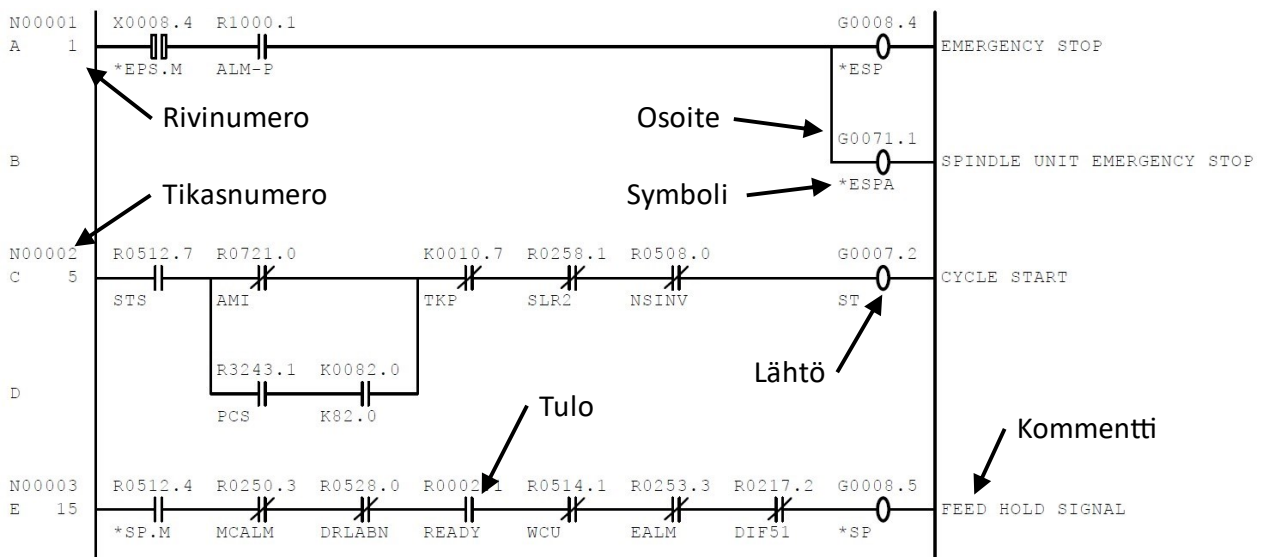
Kuvio 7. Tikapuulogiikan ohjelmakierto (perustuu Bolton, 2009, s. 113).

Kuvio 7 esittää logiikan ohjelmakiertoa. Kuviossa on esitetty tikapuukaavion rakenne ja miten sen suoritus etenee. Kuviossa näkyy, miten jokainen askel luetaan ensin vasemmalta oikealle, minkä jälkeen seuraava askel luetaan. Ohjelmakierto alkaa tulojen tilojen luvulla ja niiden tallennuksella muistiin, tämän jälkeen suoritetaan logiikkaohjelma, jossa määrätään lähtöjen tilat tulojen ja logiikan perusteella, lopuksi lähtöjen tilat päivitetään.

Taulukko 3. Tikapuukaavion symbolit (perustuu Fanuc i.a., s. 6).

Releet (koskettimet)		Kelat	
Symboli	Toiminto	Symboli	Toiminto
- -	Normaalisti avoin kosketin	-O-	Kela
- / -	Normaalisti suljettu kosketin	-oO-	Käännetty kela
		-(S)-	Pidon aktivointi
		-(R)-	Pidon resetointi

Taulukossa 3 on esitetty tikapuukaavion symbolit. Näistä koskettimet voivat olla tuloja ja kelat lähtöjä. Tuloja voidaan lukea suoraan tai käänteisenä, samoin lähtöjä voidaan kirjoittaa suoraan tai käänteisenä. Lähtöjä voidaan kirjoittaa myös pitopiirinä, joita ohjataan set- ja reset-käskyillä. Taulukon symbolit suorittavat 1-bitin operaatioita ja niitä kutsutaankin perusoperaatioksi (Fanuc, i.a., s. 5). Näiden lisäksi on olemassa toiminnallisia käskyjä, jotka mahdollistavat monimutkaiset tavu-, sana- ja tuplasanaoperaatiot.



Kuvio 8. Fanuc-tikapuukaavio (perustuu Fanuc, i.a., s. 5).

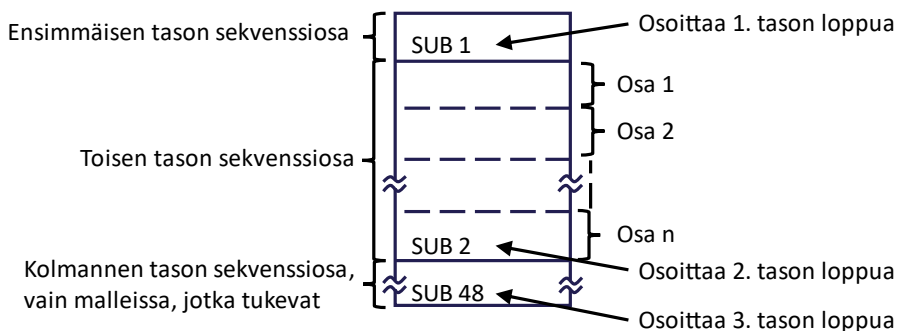
Fanuc PMC käyttää pääasiassa tikapuulogiikkaa (Fanuc, i.a., s. 5). Kuviossa 8 on esimerkki Fanucin tikapuulogiikasta. Kuviossa näkyy logiikan rakenne, jossa ohjauspiirit on rakennettu kahden pystysuoran viivan väliin. Ohjauspiirit koostuvat koskettimista ja

lähdöistä. Koskettimien sijoittelulla voidaan toteuttaa erilaisia lähtöjen ohjauksia. Tikapuu-logiikassa käytetyille osoitteille voidaan määrätä symboliset nimet. Osoitteille voidaan antaa myös kommentti, askeleen toiminta voidaan kommentoida asettamalla lähdössä käytetylle osoitteelle kommentti.

2.2.4 Prosessointijärjestys

Sekvenssiohjelma koostuu kahdesta toimintaosasta, nopeasta osasta eli ensimmäisestä tasosta (1st level), joka suoritetaan muutaman millisekunnin välein, ja normaalista osasta eli toisesta tasosta (2nd level) (Fanuc i.a., s. 16). Mikäli käytetty ohjainmalli sallii kolmannen osan, lisätään myös kolmas taso (3rd level).

Ensimmäisen tason sekvenssiosa suoritetaan jokaisella suorituskierrolla, jonka aika on joko 1, 2, 4, tai 8 millisekuntia, tämä voidaan määrätä CNC:n parametrilla (Fanuc, i.a., s. 16). Mikäli ensimmäisen tason suoritus kestää kauan, kasvaa kokonaissuoritus aika toisen tason suoritus mukaan luettuna. Tästä syystä ensimmäisen tason suoritus tulisi olla mahdollisimman nopea. Toinen taso suoritetaan tietyn ajan välein, joka on suorituskierroksen aika kertaa tason osioiden määrä. Kolmas osa suoritetaan PMC:n ollessa toimettomana.



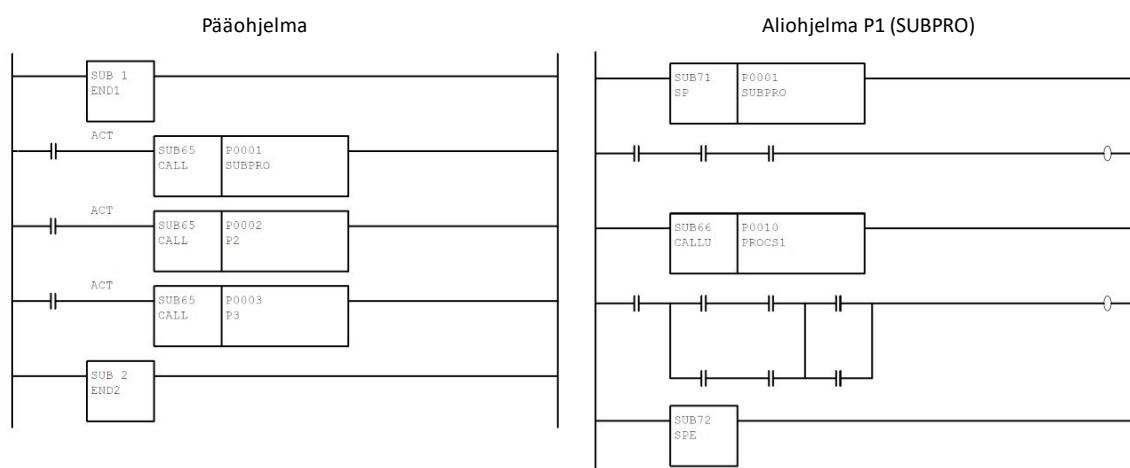
Kuvio 9. Sekvenssiohjelman rakenne (perustuu Fanuc, i.a., s.16).

Kuviossa 9 on esitetty sekvenssiohjelma rakenne. Ensimmäinen taso on yksi kokonaisuus, mutta toinen taso täytyy jakaa useaan, jotta ensimmäisen tason ohjelma voidaan suorittaa tarpeeksi usein (Fanuc, i.a., s. 16). Toisen tason osat suoritetaan järjestyksessä aina yksi osa kerrallaan ensimmäisen tason suorituksen jälkeen. Kaikkien toisen tason osien suorituksen jälkeen alkaa tason suoritus uudestaan ensimmäisestä osasta. Kolmas taso

suoritetaan toisen tason viimeisen osan suorituksen valmistuttua ja ennen ensimmäisen tason suorituksen alkua.

2.2.5 Aliohjelmat

Ensimmäisen, toisen ja kolmannen tason ohjelmien lisäksi voidaan luoda aliohjelmiä saamaan tapaan kuin pääohjelmatkin (Fanuc, i.a., s. 26). Pääohjelma on aina aktiivinen, mutta aliohjelmat ovat aktiivisia vain, kun niitä kutsutaan toisesta ohjelmasta (mts. 25). Aliohjelmaa voidaan kutsua myös toisesta aliohjelmasta. Aliohjelmassa määritetään aliohjelman nimi ja sekvenssiohjelma, joka suoritetaan ohjelmaa kutsuttaessa.



Kuvio 10. Esimerkki aliohjelmasta ja sen kutsusta (perustuu Fanuc, i.a., s. 24).

Kuviossa 10 on esitetty aliohjelman rakenne ja sen kutsu pääohjelmasta (Fanuc, i.a., s. 24). Ohjelmien osoitteet määritetään P-kirjaimella ja numerolla, tälle osoitteelle voidaan osoittaa myös symboli ja kommentti. Aliohjelma alkaa SP-lipulla ja loppuu SPE-lippuun ja näiden väliin luodaan sekvenssiohjelma. Kuviossa näkyvä aliohjelma on nimetty symbolilla SUBPRO ja sitä kutsutaan pääohjelmasta. Aliohjelmia voidaan kutsua ehdollisesti tai ilman, ehdollinen ohjelma suoritetaan vain ehdon täytyttyessä ja ilman ehdon määrittelyä ohjelmaa kutsutaan jatkuvasti. Kuviosta näkyy myös, miten aliohjelmassa voidaan kutsua toista aliohjelmaa.

2.2.6 PMC:n perus- ja toiminnalliset operaatiot

Sekvenssiohjelman suunnittelu edellyttää tikapuukaavion piirtämistä (Fanuc, i.a., s. 232). Tikapuukaavio voidaan piirtää käyttäen relekosketinsymboleita tai symboleita, jotka kuvaavat toiminnallisia ohjeita. Perusohjeet ovat yleisimmin käytettyjä ohjelman suunnittelussa, näitä on 24 erilaista sisältäen ja-, tai-käskyjä, näistä kaikki suorittavat yhden bitin operaatioita. Toiminnalliset ohjeet on tarkoitettu helpottamaan koneen operaatioita, jotka olisivat muuten vaikeita toteuttaa perusoperaatioilla.

Taulukko 4. PMC operaatiot (perustuu Fanuc, i.a., s. 232–575).

Operaation tyyppi	Kuvaus
Perusoperaatiot (Basic instructions)	Yksinkertaisimmat operaatiot, jotka käsittelevät 1-bitin tietoa. Näitä ovat esimerkiksi koskettimet ja releet.
Ajastimet (Timer)	Aikaperusteiset operaatiot, esimerkiksi veto- ja päästöhidastukset
Laskurit (Counter)	Laskevat operaatiot, laskureilla voidaan laskea ylös tai alaspäin
Tiedonsiirto (Data transfer)	Tietojen siirto rekisteriosoitteiden välillä, esimerkiksi luvun siirto osoitteesta toiseen
Datataulujen käsittelyt (Table data)	Datataulujen luku ja kirjoitus, voidaan myös etsiä tietoa tauluista
Vertailut (Comparison)	Muistiosoitteiden arvojen vertailut, vertailuja voidaan tehdä osoitteiden välillä tai osoitteen arvoa voidaan verrata kiinteään arvoon
Bittioperaatiot (Bit operation)	Yhden bitin muutosoperaatiot, esimerkiksi bitin nousevan tai laskevan reunan tunnistus tai bittisiirrot datatauluissa
Koodausmuunnokset (Code conversion)	Tietotyyppien koodaus, esimerkiksi luvun kääntö binäärisestä BCD-koodatuksi arvoksi
Matemaattiset operaatiot (Operation instruction)	Datataulujen arvojen laskuoperaatiot, esimerkiksi summaus tai erotus
CNC-funktiot (Instructions related to CNC functions)	Tiedon välitys PMC:n ja CNC-ohjaimen välillä, esimerkiksi viestin näyttäminen CNC:n näytöllä
Ohjelman ohjaukset (Program control)	PMC-ohjelman sisäisen suorituksen ohjaus, esimerkiksi aliohjelman kutsu tai ohjelmassa hyppääminen tiettyyn kohtaan
Pyörittäjäohjaus (Rotation control)	Pyörittäjien ohjaus, esimerkiksi kääntöpöydän tai työkaluvaihtajan ohjaus

Taulukossa 4 on esitelty sekvenssiohjelmoinnissa käytettäviä operaatioita. Osa operaatioista ei toimi joillakin PMC:n ohjaimilla, nämä eivät aiheuta virhettä, mutta eivät toteuta myöskään operaatiota (Fanuc, i.a., s. 576).

3 FANUC FOCAS -KIRJASTO

3.1 Fanuc FOCAS -kirjaston ominaisuudet

Fanuc FOCAS -kirjasto (Fanuc Open CNC API Specifications) mahdollistaa räätälöityjen sovellusten luonnin Fanuc FOCAS -yhteensopiville ohjaimille, jotka on liitetty tietokoneeseen, joko Ethernet- tai HSSB (High Speed Serial Bus) -liitynnällä (Inventcom, 2021). Kirjasto mahdollistaa tiedonsiirron tietokoneen ja CNC:n/PMC:n välillä (Inventcom, 2018-a).

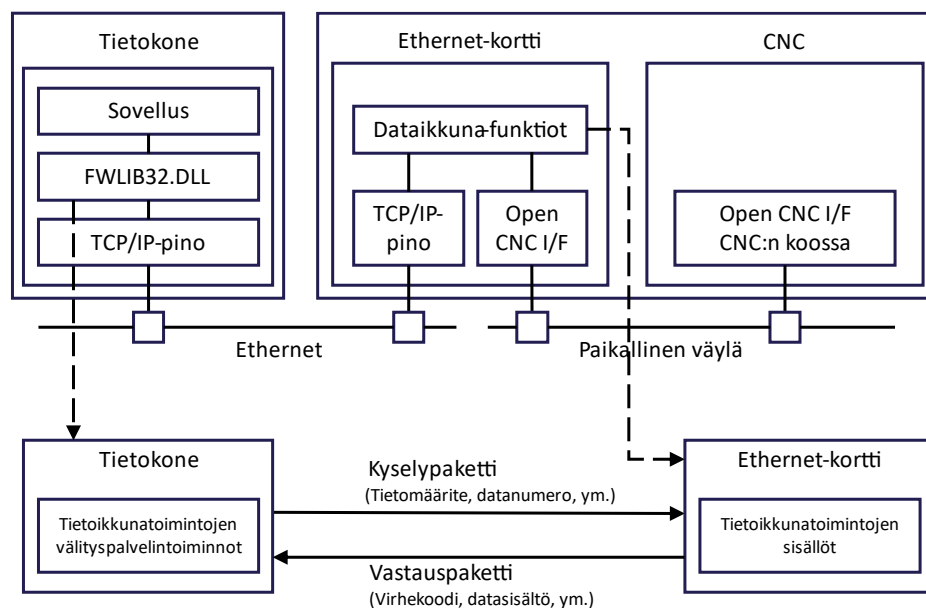
Taulukko 5. FOCAS-kirjaston ominaisuudet (perustuu Inventcom, 2018-a).

Ominaisuus	Lisätietoja
CNC-ohjattujen akseleiden tietojen luku ja kirjoitus	Akselin absoluuttinen paikka, suhteellinen paikka, koneen paikka, etäisyys määränpäähän, todellinen syöttönopeus
CNC-ohjelmaan liittyvät operaatiot	Ohjelman lähetys ja lataus, validointi, etsintä ja poisto. CNC ohjelmahakemiston luku ja DNC-operaatio tietokoneelta.
CNC-tiedostojen luku ja kirjoitus	Työkalun korjaintiedot, työkappaleen referenssipisteen korjaintiedot, parametrit, asetukset, makromuuttujat ja kuularuuvien kompensointiarvot
Työkalujen käyttöaikojen hallinta tietojen luku ja kirjoitus	
CNC:n historia tietojen luku	Operaatio- ja hälytyshistoria
Servojen ja karan tietojen luku	
Data Serverin, DNC1, DNC2 ja OSI-Ethernet -tietojen luku ja kirjoitus	Vain HSSB-versio
Aallonmuotodiagnostiikka tietojen luku ja kirjoitus	
PUNCH PRESS CNC -tietojen luku ja kirjoitus	
LASER CNC -tietojen luku ja kirjoitus	
Servojen oppimistietojen luku ja kirjoitus	Vain HSSB-versio
Muiden tietojen luku ja kirjoitus	Jatkuvat tilatiedot, diagnostiikkatiedot, A/D muunnostiedot, hälytystiedot ja käyttäjäviestit
PMC-tietojen luku ja kirjoitus	G, F, Y, X, A, R, T, C ja D osoitteet, laajennettu varmuuskopioimuisti
PMC PROFIBUS-DP-tietojen luku ja kirjoitus	

Taulukossa 5 on lueteltuna FOCAS-kirjaston pääominaisuudet. Suurin osa funktioista liittyy CNC-dataan, mutta kirjasto sisältää funktioita myös PMC:n tietojen käsittelyyn. Taulukosta myös näkee, että tietyt ominaisuudet toimivat vain HSSB-kommunikaatiolla, kuten DNC.

3.2 Yhteystyytit

Ethernet-yhteys perustuu pistokekommunikointiin eli TCP/IP-kommunikaatioon Fanucin Ethernet-kortin tai nopean Ethernet-kortin kautta (Inventcom, 2018-b). Series 16i/18i/21i-MODEL B- ja Series 30i/31i/32i-MODEL A -ohjaimien kanssa Ethernet-kommunikointi on mahdollista Embedded Ethernet function -ominaisuuden avulla.



Kuvio 11. Ethernet-kommunikaatio (perustuu Inventcom, 2018-b).

Kuviossa 11 on esitetty FOCAS-kirjaston Ethernet-kommunikaatio. Data kulkee tietokoneen ja CNC:n välillä TCP/IP-kommunikaatiolla FOCAS-kirjaston määrittelemällä tavalla. Sovelluksen kysyessä esimerkiksi muuttujan arvoa lähettää kirjasto kyselypaketin, joka saapuu CNC:n Ethernet-korttiin. Kortti pyytää vastauksen CNC:ltä Open CNC -rajapinnalla. CNC:n palauttama data lähetetään takaisin kyselyn tehneelle tietokoneelle vastauspaketissa.

HSSB-yhteys on vakaampi vaihtoehto Ethernet-kommunikaatiolle, mutta se myös vaatii sitä tukevan laitteiston (Rekers, 2019, s. 73). Suurin osa kirjaston funktioista toimii sellaisenaan, oli käytössä Ethernet tai HSSB, mutta osasta funktioista on omat versionsa kullekin yhteystyyppille (Inventcom, 2019). Osa funktioista toimii vain HSSB-yhteydellä, kuten taulukosta 6 voidaan huomata.

3.3 Kirjastotiedostot

FOCAS-kirjasto koostuu useasta DLL (Dynamic-link library) -tiedostosta (Fanuc, 2017). Näistä kirjastoista on omat versionsa 32- ja 64-bittisille Windows-käyttöjärjestelmille. Linux-kirjastot löytyvät myös 32- ja 64-bittisille käyttöjärjestelmille, tiedostot ovat .so-päätteellä ja näitä on vain yksi Windowsin moneen DLL-tiedostoon verrattuna. Myös 32-bittiselle ARM-suorittimelle löytyy oma SO-kirjastonsa.

Taulukko 6. FOCAS-kirjaston 32-bittiset kirjastot (perustuu Fanuc, 2017).

DLL	Kuvaus
FOCAS32	Kirjasto datanvaihdon funktioista CNC/PMC ja HSSB ja Ethernetin välillä. Vaadittu kirjasto suorituksen aikana Ethernet- ja HSSB-järjestelmille.
FOCASE1	TCP/IP-kommunikaatio, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana. Tämä kirjasto on saatavilla FOCAS2/Ethernet-kommunikaatiolle NCGuideProlle.
FOCAS30i	Kirjasto FS30i/31i/32i/35i/0i-F- ja PMi-A-ohjaimille, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS150	Kirjasto FS150-B-ohjaimelle, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS15i	Kirjasto FS150i-ohjaimelle, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS160	Kirjasto FS160/180-B/C-, FS210-B- ja FS160i/180i/210i-ohjaimille, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS16W	Kirjasto FS160i/180i-W-ohjaimille, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS0i	Kirjasto FS0i-A-ohjaimelle, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS0iB	Kirjasto FS0i-B-ohjaimelle, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS0iD	Kirjasto FS0i-D-ohjaimelle, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCASPM	Kirjasto Power Mate-H- ja Power Mate-D -ohjaimille, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCASPMI	Kirjasto Power Mate i-H- ja Power Mate i-D -ohjaimille, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCASNCG	Kirjasto FOCAS2/HSSB-kommunikaatiolle FS31i/32i/35i NCGuidePro -ohjaimille, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS0DN	Kirjasto FOCAS2/HSSB-kommunikaatio FS0i-D NCGuidePro -ohjaimelle, FOCAS32 kutsuu suorituksen aikana.

Taulukossa 6 on lueteltu kirjaston Windows 32 -bittisen käyttöjärjestelmän DLL-kirjastotiedostot. Kuvauksessa on kerrottu, mihin ohjaimeen tai ominaisuuteen kyseinen tiedosto liittyy. FOCAS32.DLL-tiedosto on funktiokirjasto tiedonsiirtoon laitteiden välillä, tämä kirjasto kutsuu tarvittavaa kirjastoa ohjelman suorituksen aikana. FOCASE32.DLL-tiedosto on pakollinen TCP/IP-kommunikaatioon liittyvä kirjasto. Loput tiedostot ovat kirjastoja liittyen tiettyyn tai tiettyihin ohjaimiin. Kuten taulukosta 7 voidaan huomata, tukee 32-bittinen kirjasto huomattavasti suurempaa joukkoa CNC-ohjaimia.

Taulukko 7. FOCAS-kirjaston 64-bittiset kirjastot (perustuu Fanuc, 2017).

DLL	Kuvaus
FOCAS64	Kirjasto datanvaihdon funktioista CNC/PMC ja HSSB ja Ethernetin välillä. Vaadittu kirjasto suorituksen aikana Ethernet ja HSSB järjestelmille.
FOCASE64	TCP/IP-kommunikaatio, FOCAS64 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS30i64	Kirjasto FS30i/31i/32i/35i/0i-F ja PMi-A -ohjaimille, FOCAS64 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS0iD64	Kirjasto FS0i-D-ohjaimelle, FOCAS64 kutsuu suorituksen aikana.
FOCASNCG64	Kirjasto FOCAS2/HSSB-kommunikaatiolle FS31i-A/B NCGuidePro -ohjaimille, FOCAS64 kutsuu suorituksen aikana.
FOCAS0DN64	Kirjasto FOCAS2/HSSB-kommunikaatio FS0i-D NCGuidePro -ohjaimelle, FOCAS64 kutsuu suorituksen aikana.

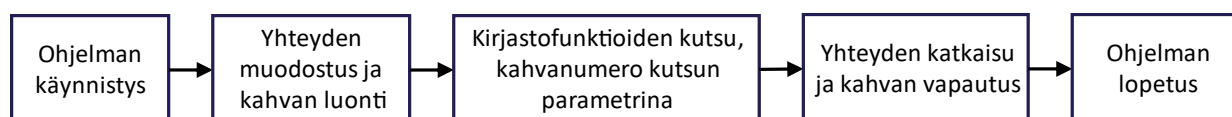
Taulukossa 7 on lueteltu taulukon 6 tavoin kirjaston Windows 64 -bittisen käyttöjärjestelmän DLL-kirjastotiedostot. Kuvauksessa on kerrottu, mihin ohjaimeen tai ominaisuuteen kyseinen tiedosto liittyy. FOCAS64.DLL-tiedosto on funktiokirjasto tiedonsiirtoon laitteiden välillä, tämä kirjasto kutsuu tarvittavaa kirjastoa ohjelman suorituksen aikana.

FOCASE64.DLL-tiedosto on pakollinen TCP/IP-kommunikaatioon liittyvä kirjasto. Loput tiedostot ovat kirjastoja liittyen tiettyihin ohjaimiin.

3.4 Yhteyden luonti

Muodostettaessa yhteyttä CNC-ohjaimeen FOCAS-kirjasto luo kahvan, joka määrittää yhteyden oikeaan ohjaimeen (Inventcom, 2018-c). Kahva luodaan Ethernet- ja HSSB-yhteystyypeille, mutta eri funktioilla. Luotu kahva täytyy säilyttää koko sovelluksen suorituksen ajan, koska sitä käytetään kirjaston muissa funktiokutsuissa. Kahvalla määritetään mihin ohjaimeen funktio suoritetaan. Kahva täytyy myös vapauttaa ennen ohjelman lopettamista.

Samaa kahvaa ei voida käyttää useassa säikeessä, sillä yhteyden muodostanut säie omistaa kahvan (Inventcom, 2018-c). Toinen säie ei voi käyttää toisen säikeen luomaa kahvaa, vaikka sen luonut säie jakaisikin sen. Yksi säie voi omistaa kuitenkin useamman kahvan. Mikäli samalla IP-osoitteella luodaan useampi kahva, luo kirjasto kuitenkin vain yhden TCP/IP-yhteyden, ja mikäli toinen kahva tuhotaan, tuhoutuu myös toinen samalla.



Kuvio 12. Kommunikointiohjelman suoritusjärjestys (perustuu Inventcom, 2018-c).

Kuviossa 12 on esitetty FOCAS-kirjaston käyttöä ohjelman suoritusjärjestyksessä. CNC-ohjaimeen muodostetaan yhteys, minkä jälkeen luodaan kahva yksilöimään muodostettu yhteys. Kahvan luonnin jälkeen kirjaston funktioita voidaan kutsua käyttäen saatua kahvaa parametrina. Ennen ohjelman lopetusta yhteys CNC-ohjaimeen katkaistaan ja kahva vapautetaan.

4 TYÖKALUTIETOJEN KÄSITTELY

4.1 Alkuseelvitys

Työ aloitettiin työkalutietojen käsittelyyn perehtymisellä. Fanuc FOCAS -kirjastosta löytyy valmiita funktioita työkaluihin liittyen, sisältäen työkalujen ja niiden käyttöaikojen hallinnan. Nämä funktiot vaativat kuitenkin toimiakseen Fanucin ohjaimeen monipuolisemman työkaluhallinnan mahdollistavat lisäoptiot. Näin ollen selvitys alkoikin, mikäli tarvittavien työkalutietojen hallinta olisi mahdollista myös ilman näitä optioita.

Ennen varsinaista aloitusta tarkistettiin, että työstökoneen PMC-ohjelmaan päästään käsiiksi. Työstökoneen näytöltä kyseistä ohjelmaa on mahdollista monitoroida, mutta piti varmistaa, ettei ohjelmaa ole lukittu. Mikäli ohjelma olisi ollut lukittu koneen valmistajan puolesta, ei tätä työtä olisi voitu toteuttaa. Ohjelma kuitenkin osoittautui avoimeksi ja sen sai kin ladattua muistitikulle ja avattua FANUC Ladder-III -ohjelmassa. Kyseinen ohjelma on Fanuc-ohjaimien PMC-ohjelmien muokkaukseen tarkoitettu sovellus. PMC-ohjelmaa on mahdollista muokata myös CNC-ohjaimen näytöltä, mutta Ladder-III -ohjelmalla se on huomattavasti tehokkaampaa.

4.2 Käsiteltävät työkalutiedot

Asiakasta haastatteleamalla saatiin selville työkalutiedot, joita pitäisi pystyä käsittelemään. Tärkeimpänä oli työkalun numero ja paikka koneessa. Tämä oli myös kaikista oleellisin tieto automaattista työkalun vaihtoa silmällä pitäen, sillä työkalu täytyy pystyä paikallistamaan, mikäli se halutaan poistaa koneesta. Myös työkalunumero täytyy pystyä kirjoittamaan oikeaan paikkaan makasiinissa, mikäli työkalu lisätään koneeseen. Työkalu voi sijaita karalla tai työkalumakasiinissa, joka sisältää 60 työkalupaikkaa.

Seuraavaksi tärkeimmät tiedot olivat työkalujen geometriatiedot. Työhön liittyvä CNC-ohjain, Fanuc Series 0i-MODEL F, käsittelee neljää erilaista työkalun geometriatietoa. Nämä voidaan jakaa kahteen luokkaan pituuden ja säteen määrääviin ja nämä edelleen kahteen eli geometriaan ja kulumaan. Näillä arvoilla kerrotaan työstökoneelle, missä työkalun leikkaava pinta sijaitsee suhteessa karan nollapisteeseen. Asiakkaalla on käytössään Zoller

Venturion 450 -mittalaite, jolla työkaluluille saadaan määritettyä nämä tiedot, vakiona nämä täytyy kuitenkin syöttää käsin CNC-ohjaimeen.

Viimeisenä tietona oli työkalun käyttöaika. CNC-ohjain kirjaa jo vakiona edellisen työkalun kara-ajan, kokonaistyöstöajan ja edellisen työstöpäivämäärän, nämä kirjataan jokaiselle työkalunumerolle erikseen. Näitä tietoja lasketaan työstön ollessa käynnissä kullakin työkalulla.

Taulukko 8. Työkalun käsiteltävät tiedot.

Työkalun ominaisuus	Kuvaus
Numero	Yksilöi työkalut
Paikkatieto	Kertoo missä työkalu sijaitsee koneessa
Pituuden geometriatieto	Työkalun pituus
Pituuden kulumatieto	Työkalun pituuden kuluman mitta
Säteen geometriatieto	Työkalun säde
Säteen kulumatieto	Työkalun säteen kuluman mitta
Edellinen leikkuuaika	Työkalun edellinen leikkuuaika
Kokonaisleikkuuaika	Työkalun kokonaisleikkuuaika
Edellinen leikkuupäivä	Edellinen leikkuupäivämäärä

Taulukossa 8 on lueteltu jokainen työkalutieto, jota tässä työssä käsitellään. Nämä voidaan jakaa kolmeen ryhmään: perus-, geometria- ja leikkuuaikatietoihin. Näillä tiedoilla työkalujen automaattinen vaihto voitaisiin toteuttaa, sillä perus- ja geometriatietojen muokaus riittää työkalujen manuaalisen vaihdon yhteydessä.

4.3 Työkalutiedot työstökoneen muistissa

Tarvittavien työkalutietojen selvittyä jäljelle jäikin enää tietojen muistipaikkojen selvittäminen työstökoneen muistista. Selvitys alkoi ensimmäiseksi työkalujen sijaintitietojen löytämisellä työstökoneen muistista. Työkalun vaihto kuuluu PMC:n tehtäviin, joten loogisin paikka olikin aloittaa tietojen etsiminen sen sisäisistä muuttujista. Numeeriset tiedot tallennetaan logiikalla D-osoitteisiin eli datataulukoihin. Näitä osoitteita pystyy monitoroimaan myös CNC-ohjaimen näytöltä, mutta varmempi tapa oli aloittaa logiikkaohjelman tutkimisella ja sen avulla selvittää, mihin tiedot tallennetaan.

4.3.1 Työkalut työstökoneessa ja niiden sijainti

Työstökoneelle ei tallenneta suinkaan kaikkia mahdollisia työkaluja, vaan ainoastaan ne, jotka sijaitsevat koneessa. Koneessa olevia työkaluja voidaan hallita CNC:n käyttöpaneelista löytyvästä valikosta, josta voidaan kirjoittaa työkalu oikeaan sijaintiin koneessa. Työkalut yksilöidään pelkällä numerolla.

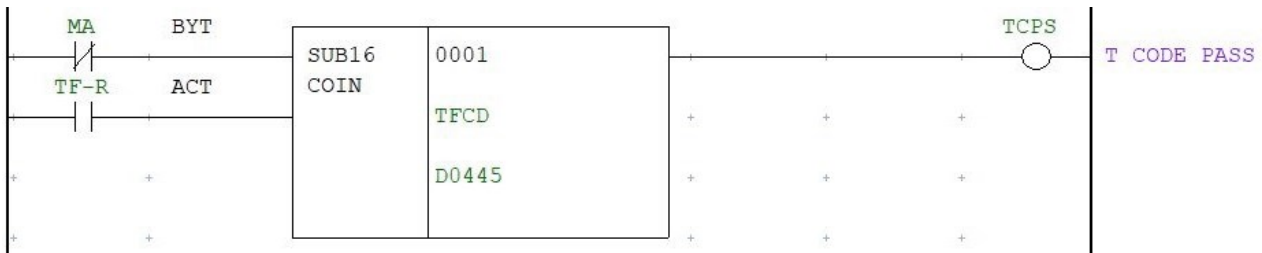
TOOL TABLE							
SP : 11		STBY: 1		POT : 36			
						01/03	
001	70	011	85	021	18	031	77
002	3	012	58	022	43	032	44
003	7	013	74	023	9	033	15
004	26	014	86	024	78	034	16
005	49	015	39	025	73	035	60
006	30	016	10	026	71	036	1
007	46	017	29	027	45	037	72
008	76	018	50	028	24	038	2
009	20	019	31	029	79	039	75
010	27	020	65	030	37	040	0

Kuva 1. Työkaluhallinta CNC:llä.

Kuvassa 1 on työhön liittyvän työstökoneen työkaluhallinta. Kyseisessä ikkunassa voidaan kirjoittaa työkalun numero joko karalle (SP) tai makasiinin paikkaan (taulukko). Taulukossa kentät on numeroitu vastaamaan paikkoja makasiinissa, ja makasiinista löytyy vastaavat numerot. Mikäli työkalunumeroksi kirjoitetaan nolla, tarkoittaa se tyhjää työkalupaikkaa makasiinissa tai tyhjää karaa koneessa, nollaa isompi luku puolestaan tarkoittaa paikkaan osoitettua työkalua.

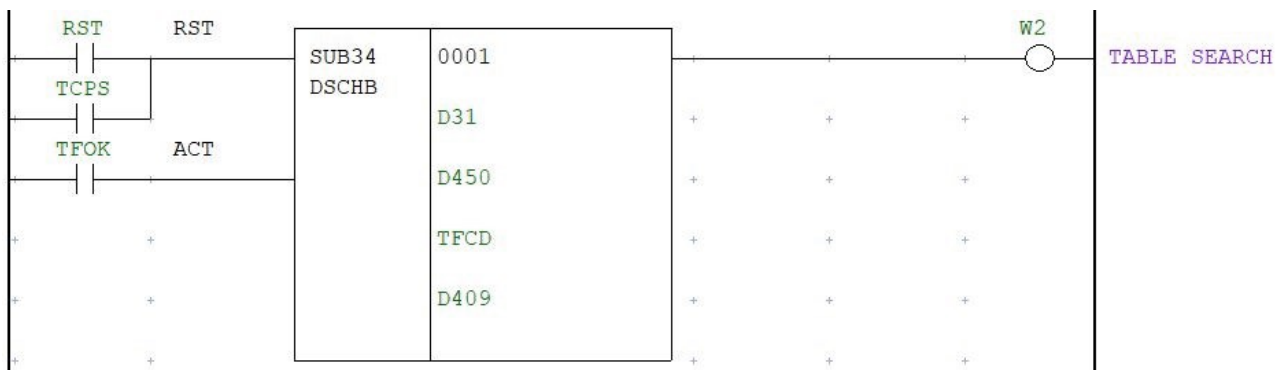
Uutta työkalua vaihdettaessa kutsutaan G-koodissa ensimmäiseksi T-funktiota ja sen yhteydessä vaihdettavan työkalun numeroa, tämä rekisteröi uuden vaihdettavan työkalun ja samalla paikoittaa työkalumakasiinin oikeaan asentoon. T-funktion jälkeen kutsutaan M06-funktiota, joka vaihtaa uuden työkalun karalle. Nämä tiedot välitetään CNC-ohjaimelta PMC:lle F-osoitteissa, joista F7.3 on tieto työkalun valinnasta, ja F26 on tieto halutusta työkalusta. T-funktiota kutsuttaessa PMC-ohjelmassa etsitään halutun työkalun sijainti ja sen

löydyttyä makasiini käännetään oikeaan asentoon. Näitä kyseisiä muuttujia seuraamalla löytyi lopulta oikea kohta koodista, jossa haluttu työkalu etsitään datataulukosta.



Kuvio 13. Uuden valitun työkalun vertaus karalla olevaan työkaluun.

T-funktiokutsun jälkeen uutta valittua työkalunumeroa verrataan karan työkaluun, ja mikäli numerot vastaavat, ei työkalua tarvitse vaihtaa. Kuviossa 13 on esitetty työkalunumeron vertausta karan työkalupaikkaan. COIN-operaatio on yksi PMC:n vertailuoperaatioista, joka vertaa kahta lukua keskenään, ja palauttaa tiedon vastaavuudesta. TFCD-symbolilla varustettu osoite sisältää valitun työkalunumeron, ja D0445-osoitteessa on karalla olevan työkalun numero. ACT-signaalin ollessa aktiivinen vertaava operaatio kahta lukua keskenään, ja mikäli luvut vastaavat muuttuu TCPS-symbolin arvo yhdeksi.



Kuvio 14. Työkalun makasiinipaikan etsintä.

Mikäli haluttua työkalua ei löytynyt karalta kuviossa 13 esitetyllä tavalla, jatketaan työkalun etsintää makasiinista kuvion 14 esittämällä tavalla. DSCHB-operaatio on yksi PMC:n data-tiluoperaatio, joka etsii annettua numeroarvoa annetusta datataulualueesta. D31-symboli kertoo makasiinin paikkojen määrän eli datataulujen määrän, D450 kertoo etsittävän data-tilualueen ensimmäisen taulun, TFCD kertoo etsittävän työkalun numeron ja D409 on osoite, johon tallennetaan löydetyn työkalun paikka eli monennestako taulusta vastaava numero löytyi. ACT-signaalin ollessa aktiivinen suorittaa operaatio etsinnän datatauluista,

ja mikäli työkalu löytyi, kirjoitetaan sen paikka D409-symbolille. Muussa tapauksessa W2-symboli saa arvon 1 tarkoittaen, ettei kyseistä työkalua löydy koneesta.

Kuvioiden 13 ja 14 mukaisien operaatioiden avulla työkalujen muistipaikat löytyivät. Karalla olevan työkalun numero löytyi D0445-symbolin osoittamasta muistiosoitteesta, tämän osoitteen arvon ollessa nolla tarkoittaa se tyhjää karaa, muussa tapauksessa karalla on osoitteen arvon mukainen työkalu. Makasiinissa olevat työkalut puolestaan löytyivät D450-osoitteesta ylöspäin. D450-osoite ei vielä sisällä työkalunumeroa, vaan vasta sitä seuraavat 60 osoitetta, sillä DSCHB-operaatio palauttaa löydetyn muistipaikan indeksin haun ensimmäisestä osoitteesta, ja tämä indeksointi alkaa nollasta. Näin ollen työkalupaikat alkavat vasta seuraavasta osoitteesta, jolloin D451-osoite vastaa indeksiltään paikkaa yksi makasiinissa. Myös näissä osoitteissa osoitteen arvo nolla tarkoittaa tyhjää makasiinipaikkaa ja sitä suuremmat paikkaan osoitettua työkalua.

4.3.2 Työkalujen kompensointiarvot

Työkalupaikkojen osoitteiden löydyttyä alkoi työkalujen geometriakompensointiarvojen tallennuspaikkojen selvitys. Nämä eivät liity PMC-ohjelmaan, sillä näillä on merkitystä vain liikekomennoissa, siksi etsintä alkoi Fanuc Custom Macro B -muuttujista.

NO.	⟨LENGTH⟩		⟨RADIUS⟩	
	GEOM	WEAR	GEOM	WEAR
001	93.6060	0.0000	39.9450	0.0000
002	116.6320	0.0000	0.0000	0.0000
003	203.2000	0.0000	0.0000	0.0000
004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
007	143.4970	0.0000	7.9980	0.0000
008	216.0000	0.0000	10.0000	0.0000
009	182.4490	0.1000	0.2550	0.0000
010	139.6360	-0.2000	-0.1000	0.0000
011	130.4000	0.0000	0.3000	0.0000
012	192.4500	0.0000	0.0000	0.0000
013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
015	127.8130	0.0000	5.0000	0.0000
016	154.5930	0.0000	0.0000	0.0000

Kuva 2. Työkalujen geometriatietojen hallinta.

Taulukossa 8 esiteltyjä kompensointitietoja käsitellään kuvan 2 mukaisella taulukolla CNC-ohjaimessa. Mittatiedot annetaan suoraan millimetreinä, joten oli syytä olettaa, että ne tallennetaan myös samassa muodossa ohjaimen muistiin.

CONV. MACRO			
NO.	DATA	NO.	DATA
02200	0.0000	02212	192.4500
02201	93.6060	02213	0.0000
02202	116.6320	02214	0.0000
02203	203.2000	02215	127.8130
02204	0.0000	02216	154.5930
02205	0.0000	02217	0.0000
02206	0.0000	02218	196.0990
02207	143.4970	02219	0.0000
02208	216.0000	02220	205.3380
02209	182.4490	02221	0.0000
02210	139.6360	02222	0.0000
02211	130.4000	02223	0.0000

Kuva 3. Työkalujen geometriatiedot makromuuttujissa.

CNC-ohjaimen makromuuttujien arvoja pystyy myös tarkastelemaan PMC-osoitteiden ta-
paan suoraan ohjaimen näytöltä, kuten kuvassa 3. Hetken muuttujien läpikäynnin jälkeen
löytyi oikeat muuttujat työkalun pituuden kompensointitiedoille. Nämä muuttujat ylsivät vain
200 työkaluun, vaikka ohjain mahdollistaa 250 työkalunumeroa, ja niin myös kuvan 2 mu-
kainen taulukko.

Taulukko 9. Työkalujen kompensointiarvojen järjestelmämuuttujat (perustuu Groves, i.a.,
s. 7).

Järjestelmämuuttujat työkalun kompensointiin				
Kompensaatio numero	Työkalun pituuden kompensointi		Säteen kompensointi	
	Geometrinen	Kuluma	Geometrinen	Kuluma
1	#11001(#2201)	#10001(#2001)	#13001	#12001
:	:	:	:	:
200	#11200(#2400)	#10200(#2200)	#13200	#12200
:	:	:	:	:
999	#11999	#10999	#13999	#12999

Pienen etsiskelyn jälkeen löytyi manuaali, josta löytyi taulukon 9 mukainen taulukko, jossa
on esitetty muuttujat työkalujen kompensointiarvoille. Tämän taulukon avulla puuttuvat
muuttujat löytyivätkin. Työkalun pituuden kompensointiarvot 1–200 löytyivät kahdesta paik-
kaa, muuttujista #2001–#2400 ja #10001–#11999, mutta loput sijaitsevat samassa

alueessa muiden kanssa. Näin ollen kaikki työkalujen kompensointiarvot löytyivät järjestelmämuuttujista #10001–#13999, nämä muuttujat käsittävät jo kompensointiarvot 999 työkalulle, mutta kyseisillä työstökoneilla näistä tullaan käyttämään vain 250 ensimmäistä.

4.3.3 Työkalujen leikkuuajat

Viimeisiksi löydettäviksi muuttujiksi jäi työkalujen leikkuuaikojen muistipaikat. Tässä vaiheessa työstökoneen PMC-ohjelmaa oli käyty melko kattavasti läpi eikä mitään leikkuuajoihin vastaavaa ollut tullut vastaan, oli siis syytä olettaa näidenkin tietojen löytyvän CNC-ohjaimen järjestelmämuuttujista.

NO.	TOOL	T	CUT TIME	TOTAL TIME	CUT DATE	
1	1	⚡	0H 0M 27S	14H 30M 1S	03/02 20:45	
2	2	⚡	0H 0M 16S	1H 2M 16S	01/14 10:49	
3	3	---	0H 2M 47S	2H 15M 44S	01/27 17:20	
4	4	⚡	0H 0M 26S	0H 7M 49S	05/23 11:57	
5	5	---	0H 1M 5S	0H 5M 36S	05/23 11:58	
6	6	---	0H 6M 28S	0H 31M 0S	05/23 12:05	
7	7	---	0H 0M 21S	0H 58M 55S	12/27 11:26	
8	8	---	0H 0M 0S	0H 0M 0S		
9	9	---	0H 0M 5S	9H 8M 58S	02/28 11:11	
10	10	---	0H 1M 41S	3H 31M 39S	01/27 17:33	
11	11	---	0H 0M 10S	8H 31M 42S	03/02 21:16	
12	12	---	0H 0M 7S	0H 8M 19S	05/23 11:36	
13	13	---	0H 0M 7S	0H 4M 51S	05/23 11:37	
14	14	---	0H 0M 0S	0H 0M 33S	05/23 10:58	
15	15	---	0H 1M 45S	2H 7M 35S	01/14 10:47	
TOOL NUMBER<T-CODE>						

Kuva 4. Työkalujen leikkuuaikojen hallinta.

Työkalujen leikkuuaikoja pystyy hallitsemaan CNC-ohjaimelta kuvan 4 mukaisella taulukolla. Leikkuuajat esitetään taulukossa sekunneista tunteihin, mutta CNC:n järjestelmämuuttuja voi sisältää vain numeron. Tästä syystä oli keksittävä, missä muodossa tieto on muuttujassa. Loogisin oli ajatella aika sekunneissa, siksi oikeaa muuttujaa etsittäessä taulukon esittämät ajat muutettiin sekunneiksi.

Olettama ajan muodosta osuikin oikeaan ja oikeat muuttujat löytyivät edelliselle leikkuuajalle ja kokonaisleikkuuajalle, jäljelle jäi silti vielä edellinen leikkuuajankohta. Kyseinen

tieto näkyy kuvan 4 taulukossa muodossa 'kuukausi/päivä tunti:minuutti', joten mietittäväksi jäi, miten kyseinen tieto tallennetaan järjestelmämuuttujaan. Ensimmäinen idea oli, että muotoilusta poistetaan välimerkit, jolloin ajankohta "03/02 20:45" muuttui luvuksi 3022045. Tämäkin oletamus osoittautui oikeaksi, sillä kyseisellä luvulla löytyikin oikea muuttuja.

CONV. MACRO			
NO.	DATA	NO.	DATA
23240	0.0000	23252	16.0000
23241	0.0000	23253	167.0000
23242	0.0000	23254	26.0000
23243	0.0000	23255	65.0000
23244	0.0000	23256	388.0000
23245	0.0000	23257	21.0000
23246	0.0000	23258	0.0000
23247	0.0000	23259	5.0000
23248	0.0000	23260	101.0000
23249	0.0000	23261	10.0000
23250	0.0000	23262	7.0000
23251	27.0000	23263	7.0000

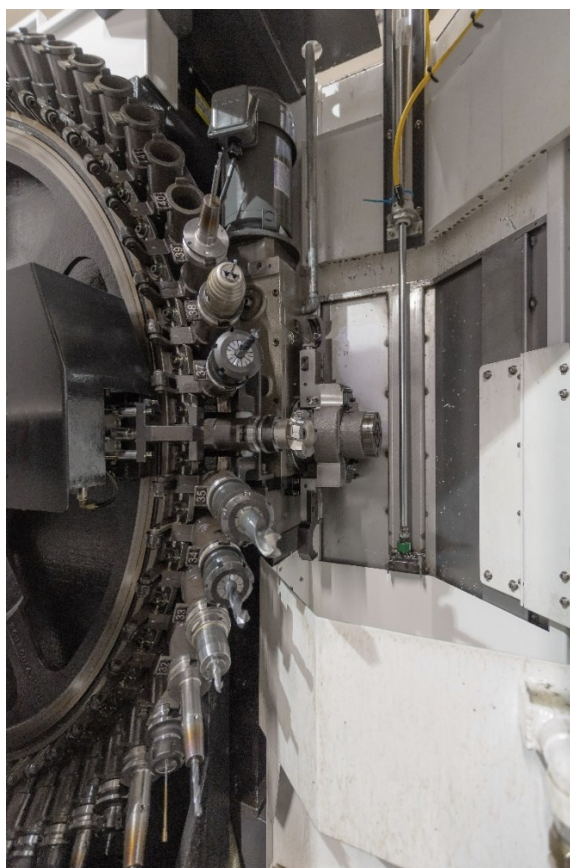
Kuva 5. Työkalujen leikkuuajat järjestelmämuuttujissa.

Kuvassa 5 on esitetty ensimmäiset muuttujat edellisille leikkuiden kestoille. Edelliset leikkuuajat löytyivät järjestelmämuuttujista #23251–#23500. Kokonaisleikkuuajat löytyivät puolestaan järjestelmämuuttujista #23501–#23750. Edelliset leikkuuajankohdat löytyivät hiukan eri alueelta, järjestelmämuuttujista #26751–#27000.

5 TYÖSTÖKONEEN TYÖKALUMAKASIININ ULKOINEN OHJAUS

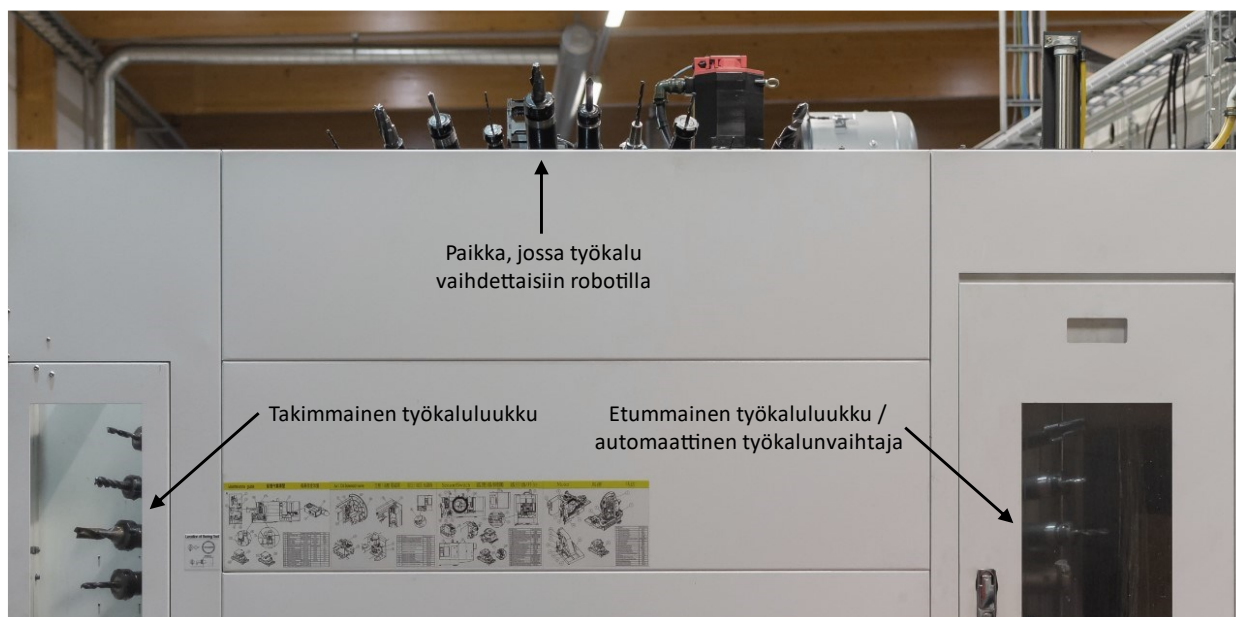
5.1 Automaattinen työkalunvaihto

Työkalutietojen käsittelyn jälkeen perehdyttiin työkalumakasiinin ohjaukseen. Työhön liittyvissä Tongtai SH-4000P -työstökoneissa on pyörivä työkalumakasiini, joka paikoitetaan oikeaan asentoon servon avulla. Makasiinin paikoitus on täysin PMC-ohjelman tehtävä, joten siksi piti aloittaakin logiikkaohjelman tutkiminen. Ensimmäiseksi piti selvittää, miten makasiinin ohjaus oli toteutettu, jotta muutoksien suunnittelu ulkoisen ohjauksen mahdollistamiseksi oli mahdollista.



Kuva 6. Työkalumakasiini ja automaattinen työkalunvaihtaja.

Työkalut varastoidaan työstökoneessa kuvan 6 mukaiseen pyörivään makasiiniin, jossa on 60 paikkaa. Työkalut kiinnittyvät makasiiniin painamalla ne niille tarkoitettuihin telineisiin, ne irtoavat vetämällä. Valittu työkalu käännetään sivuun, kuten kuvassa 6, jotta automaattinen työkalunvaihtaja voi vaihtaa työkalun karalle. Tämä paikka on myös se, jonka mukaan makasiini paikoitetaan.



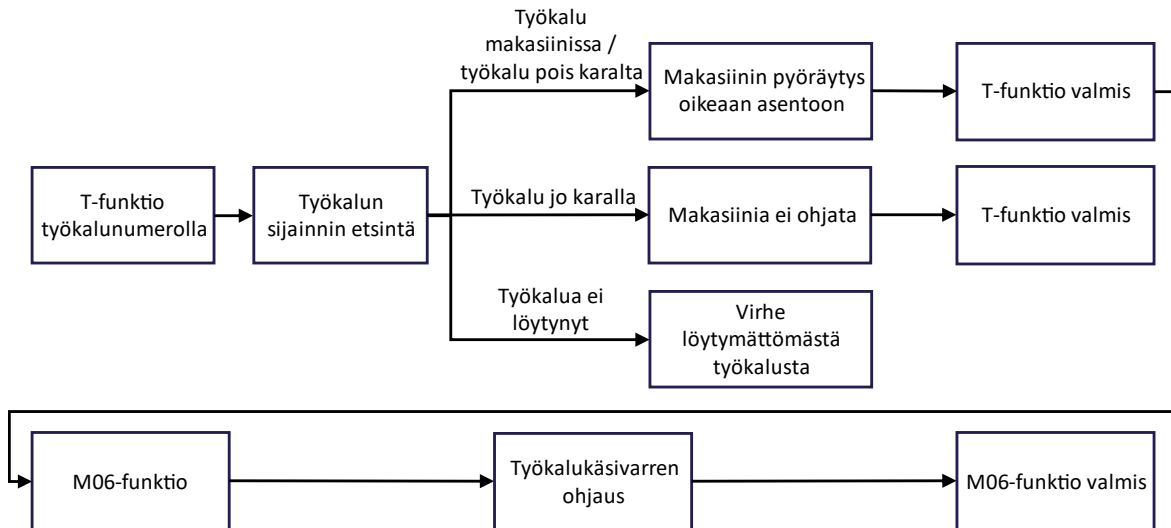
Kuva 7. Työkalumakasiini koneen sivusta.

Kuvassa 7 näkyy makasiinin luukut, joista työkaluja voidaan käsitellä käsin. Takimmainen luukku on tarkoitettu työkalun manuaaliseen poistoon tai lisäykseen. Luukkujen vieressä on myös painikkeet, joilla makasiinia voidaan pyörittää käsin. Kuvassa on myös merkittynä paikka koneen yläosassa, jossa työkalu vaihdettaisiin robotilla. Suunnitelmana olisi sijoittaa työkalurobotti kulkemaan työstökoneiden päällä, jolloin yhdellä robotilla saataisiin palveltua kahta konetta.

5.2 Työkalunvaihtosekvenssi

Työkalunvaihto alkaa kutsumalla T-funktiota CNC:n G-koodissa ja sen kanssa haluttua työkalunumeroa. Kyseinen koodi aloittaa työkalun makasiinipaikan etsimisen PMC-ohjelmassa. Mikäli haluttu työkalu löytyy makasiinista, pyöryttää PMC makasiinia niin, että haluttu työkalu on karan kohdalla valmiina sen vaihtoon.

Työkalukutsun valmistuttua voidaan työstöohjelmassa kutsua M06-funktiota, joka käynnistää työkalunvaihdon. Automaattisen työkaluvaihtajan käsivarsi pyöryttää kiinni yhtä aikaa makasiinin työkaluun ja karalla olevaan työkaluun, jonka jälkeen työkalut vedetään irti. Irrotuksen jälkeen käsivarsi pyöryttää uudelleen siirtäen karalla olleen työkalun makasiinin ja makasiinissa olleen karalle.



Kuvio 15. Työkaluvaihdon sekvenssi.

Kuviossa 15 on selvennetty työkaluvaihtosekvenssiä. T-funktiolla on kolme mahdollista lopputulosta, työkalu löytyy makasiinista tai työkalu halutaan tyhjään makasiinipaikkaan, työkalu on jo karalla eikä sitä tarvitse vaihtaa tai haluttua työkalua ei ole rekisteröity työstökoneeseen. M06-funktio on yksinkertaisempi sillä se vain vaihtaa T-funktiolla valitun työkalun. Kyseisen sekvenssin ja T- ja M-funktioiden avulla oli helppoa selvittää ohjelman rakenne ja sen toiminta.

5.3 Makasiinin vakio-ohjaus

Työkaluvaihtosekvenssin selvittyä alkoi PMC-ohjelman tutkiminen, pääpaino keskittyi makasiinin ohjaukseen, sillä varsinaisella työkaluvaihdolla ei ollut merkitystä makasiininohjaukseen tehtävään muutokseen. Selvityksessä selvisi, että vakio-ohjaus koostuu kolmesta ohjelmasta, yhdestä pääohjelmasta ja kahdesta aliohjelmasta.

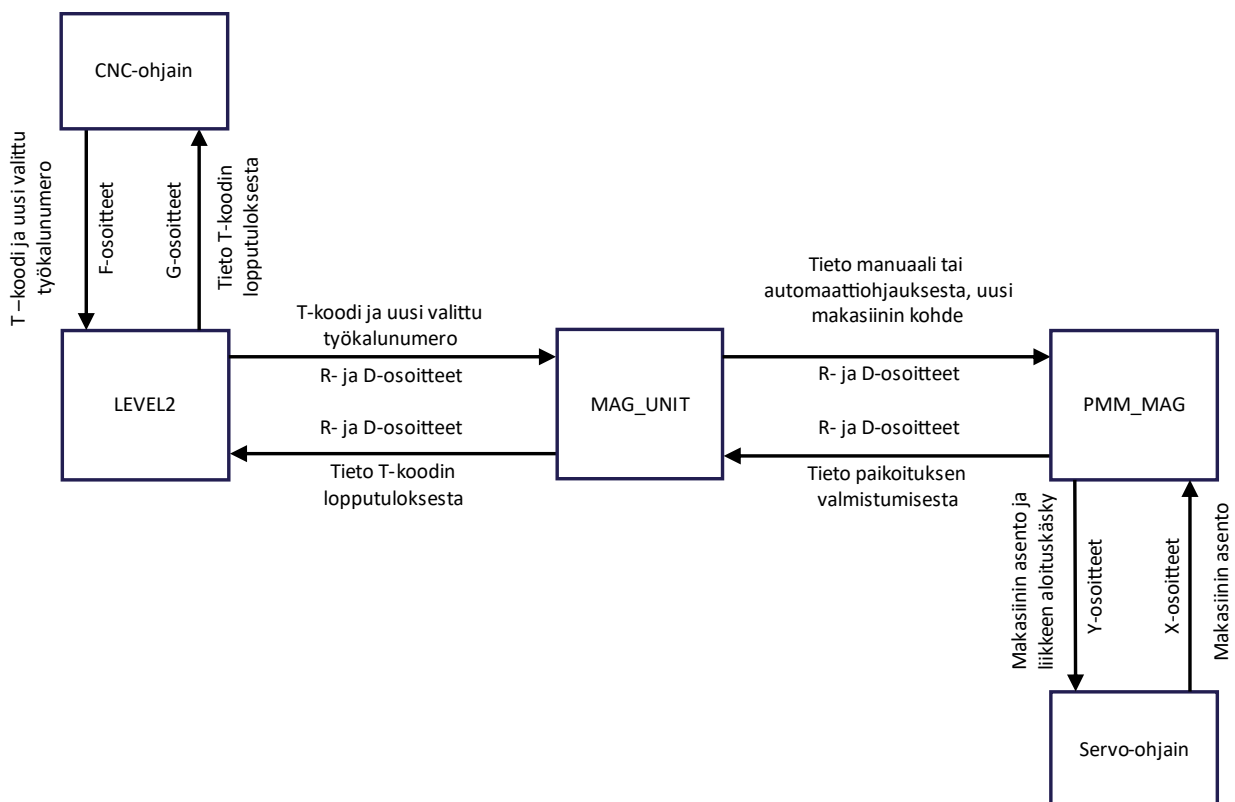
Ohjaus alkaa pääohjelmasta LEVEL2, joka on sekvenssiohjelman normaali toimintaosa, tässä ohjelmassa luetaan CNC-ohjaimelta saapuvat signaalit eli T-koodi ja uusi haluttu työkalunumero, nämä tiedot siirretään PMC:n sisäisiin muuttujiin, joiden mukaan makasiinia käsitellään. Tässä ohjelmassa myös palautetaan PMC:ltä T-koodin tila takaisin CNC-ohjaimelle.

Ensimmäinen aliohjelma, nimeltään MAG_UNIT, pitää sisällään työkalun sijaintitiedon käsittelyn eli sen etsimisen ja myös päivittämisen. Tässä ohjelmassa suoritetaan T-koodin

käsittelysekvenssi, ensimmäiseksi etsitään työkalun sijainti ja sen mukaan päätetään, täytyykö makasiinia ohjata. Sekvenssin lopuksi, jos makasiinia on ohjattu, päivitetään työkalunvaihtopaikassa olevan työkalun numero. Tämä ohjelma siis käsittelee makasiinille uuden kohteen ja paikoituksen käynnistystiedon.

MAG_UNIT-ohjelmassa suoritetaan myös makasiinin manuaaliohjaus, sillä makasiinin ohjaus on mahdollista myös käsin koneen takapuolelta löytyvien painikkeiden avulla. Makasiinin manuaaliohjaus on mahdollista myös työstöohjelman käydessä. Sen ainoa vaikutus koneen toimintaan on, että kone jää odottamaan työkalunvaihtoa, kunnes manuaaliohjaus lopetetaan.

Toisessa aliohjelmassa, nimeltään PMM_MAG, suoritetaan varsinainen makasiinin ohjaus. Tämä ohjelma saa ohjauskäskyt MAG_UNIT-ohjelmalta makasiinin automaatti- tai manuaaliohjaukselle. Tämä ohjelma kirjoittaa makasiinin servo-ohjaimelle uuden paikkatiedon ja aloittaa paikoituksen. Makasiinin paikoitus tapahtuu kirjoittamalla servo-ohjaimelle työkalun vaihtopisteeseen haluttu makasiinin paikkanumero. Ohjelmassa valvotaan myös paikoituksen valmistuminen.



Kuvio 16. Makasiinin ohjaus ohjelmatasoilla.

Kuviossa 16 on selvennetty makasiinin ohjauksen vaiheita. LEVEL2-ohjelma toimii rajapintana CNC-ohjaimen ja sekvenssiohjelman välillä, F-osoitteiden tieto kirjoitetaan R- ja D-osoitteisiin ja puolestaan R- ja D-osoitteiden tiedot kirjoitetaan G-osoitteisiin. PMM_MAG-aliohjelma toimii rajapintana sekvenssiohjelman ja servo-ohjaimen välillä, missä R- ja D-osoitteiden tiedot kirjoitetaan Y-osoitteisiin ja puolestaan X-osoitteiden tiedot kirjoitetaan R- ja D-osoitteisiin.

5.4 Makasiinin ulkoisen ohjauksen toteutus

Makasiinin ohjauksen toiminnan ja ohjelman rakenteen selvittyä alkoi ulkoisen ohjauksen suunnittelu. Ulkoisen ohjauksen rajapinnaksi valikoitui PMC:n sisäiset muuttujat R- ja D-osoitteet, koska näiden kirjoitus ja lukeminen on mahdollista FOCAS-kirjastolla ja näin ollen sähköisiä kytkentöjä koneeseen ei tarvita. Kyseinen tapa mahdollisti myös kaiken työkaluhallintaan liittyvän käsittelyn yhden sovelluksen kautta.

Ulkoista ohjausta varten luotiin oma aliohjelma, joka toimii rajapintana ulkoisen ohjauksen signaalien ja sekvenssiohjelman sisäisten ohjausmuuttujien välillä. Lähtökohta oli, että osoitteet, joita käsitellään ulkoisesti, on esitelty vain kyseisessä aliohjelmassa. Tämän johdosta piti esitellä erikseen sisäiset muuttujat, joita käytetään muissa ohjelmissa. Tämä tapa mahdollisti muuttujien lajittelun omiin alueisiinsa, jolloin ohjelmaa luodessa oli helppo etsiä vapaa muistiosoite.

5.4.1 Rajapintaosoitteet

Ohjaukseen käytetyt muuttujat jaettiin omiin tulo- ja lähtöosoitteisiin. Kummassakin ryhmässä käytetään sekä R- että D-osoitteita. R-osoitteet ovat pelkkiä päällä/pois-tietoja, kuten makasiinin varaus ulkoiselle ohjaukselle ja paikoituksen aloitus. D-osoitteissa siirretään numeerisia tietoja, kuten makasiinin haluttu orientaatio tai sen nykyinen paikoitustieto.

Taulukko 10. Makasiinin ohjauksen osoitteet.

Tulot		Lähdöt	
R2100.0	Varaa makasiini ulkoiselle ohjaukselle	R2120.0	Makasiinin ulkoinen ohjaus aktiivinen
R2100.1	Vapauta makasiinin ulkoinen ohjaus	R2120.1	Makasiinin kohde asetettu
R2100.2	Aktivoi uusi makasiinin kohde	R2120.2	Makasiini paikoittaa
R2100.3	Aloita makasiinin paikoitus	R2120.3	Makasiinin paikoitus valmis
D2100	Makasiinin uusi positio	D2120	Makasiinin nykyinen positio

Taulukossa 10 on lueteltu ohjaukseen käytetyt osoitteet. Tuloilla aktivoidaan tai vapautetaan makasiinin ohjaus, asetetaan uusi makasiinin asento sekä käynnistetään paikoitus. Lähdöillä kerrotaan, mikäli makasiinin ohjaus on mahdollista, mikäli makasiini on liikkeessä tai paikoitus on valmis sekä makasiinin nykyinen asento.

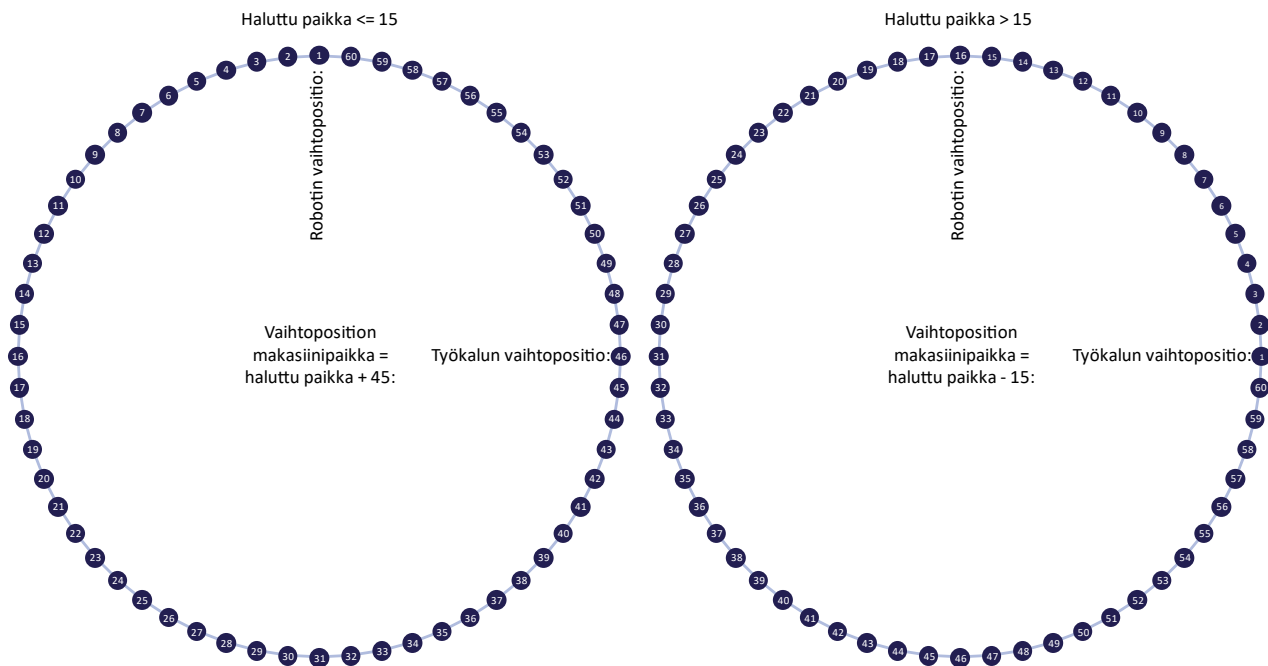
5.4.2 Sekvenssiohjelma

Aliohjelman suunnittelu alkoi ohjausluvan aktivoinnilla, sillä työstökoneelle täytyi pystyä kertomaan makasiinin olevan ulkoisessa ohjauksessa ja näin estämään työstökoneen ohjaus. Työstökone salli makasiinin manuaalisen ohjauksen työstön aikana, joten luvan hankkiminen toteutettiin samalla tavalla kuin manuaaliohjauksessa. Tämä toteutettiin kuitenkin pienellä muutoksella, sillä makasiini pyörii manuaalisesti paljon hitaammin kuin automaatilla, siksi makasiinin ohjaukselle täytyi kertoa sen toimivan automaatilla ulkoisen ohjauksen kanssa. Saman luvan aktivoiduttua, kuin manuaaliohjauksen kanssa, ilmaistaan ulkoisen ohjauksen olevan mahdollinen lähtöosoitteella.

Seuraavaksi täytyi suunnitella makasiinin kohdeasennon asetus. Kohde tarkoittaa tässä sitä makasiinipaikkaa, joka päättyy paikoituksen jälkeen työkalunvaihtopisteeseen. Paikkatiedon asetus onnistui kirjoittamalla PMM_MAG-ohjelman käyttämään osoitteeseen ulkoisen ohjauksen kertoma paikka. Kyseisen osoitteen arvo täytyy kuitenkin tallentaa ennen ohjauksen alkua talteen, jotta se voidaan palauttaa alkuperäiseen ohjauksen palatessa työstökoneelle, näin vältetään virheeltä, sillä kyseistä osoitetta verrataan myöhemmin automaattiohjauksessa.

Lopuksi täytyi suunnitella makasiinin paikoituksen aloitus. Se onnistui kirjoittamalla sama osoite aktiiviseksi kuin automaattikäytössäkin. Tätä ennen piti kuitenkin varmistaa ulkoisen ohjauksen olevan mahdollinen.

Tässä vaiheessa makasiinin paikoitus oli mahdollista ulkoisesti, mutta paikoitus oli mahdollista vain työkalunvaihtopaikan mukaan, vaikka työkalujen robottivaihtoa makasiiniin suunniteltiin koneen yläpuolelta. Ulkoisen ohjauksen selkiyttämiseksi piti ohjelmaan tehdä laskenta siitä, mikä paikka täytyy paikoittaa työkalunvaihtopisteeseen, jotta haluttu paikka päätyy työstökoneen yläosaan.



Kuvio 17. Makasiinin robottipaikan kääntö paikoituspaikaksi.

Kuviossa 17 on selvennetty makasiinin ohjauksen numerointia. Mikäli haluttu paikka on 15 tai alle, täytyy paikkaan lisätä 45 ja tällä summalla voidaan paikoittaa makasiini. Esimerkiksi, jos haluttu paikka on 1, siihen lisätään 45 ja tästä saadaan paikaksi 46. Tällä arvolla paikoitettaessa makasiinin paikka 1 päätyy työstökoneen yläosaan. Puolestaan halutun paikan ollessa yli 15 vähennetään paikasta 15 ja näin saadaan makasiini paikoitettua oikein.

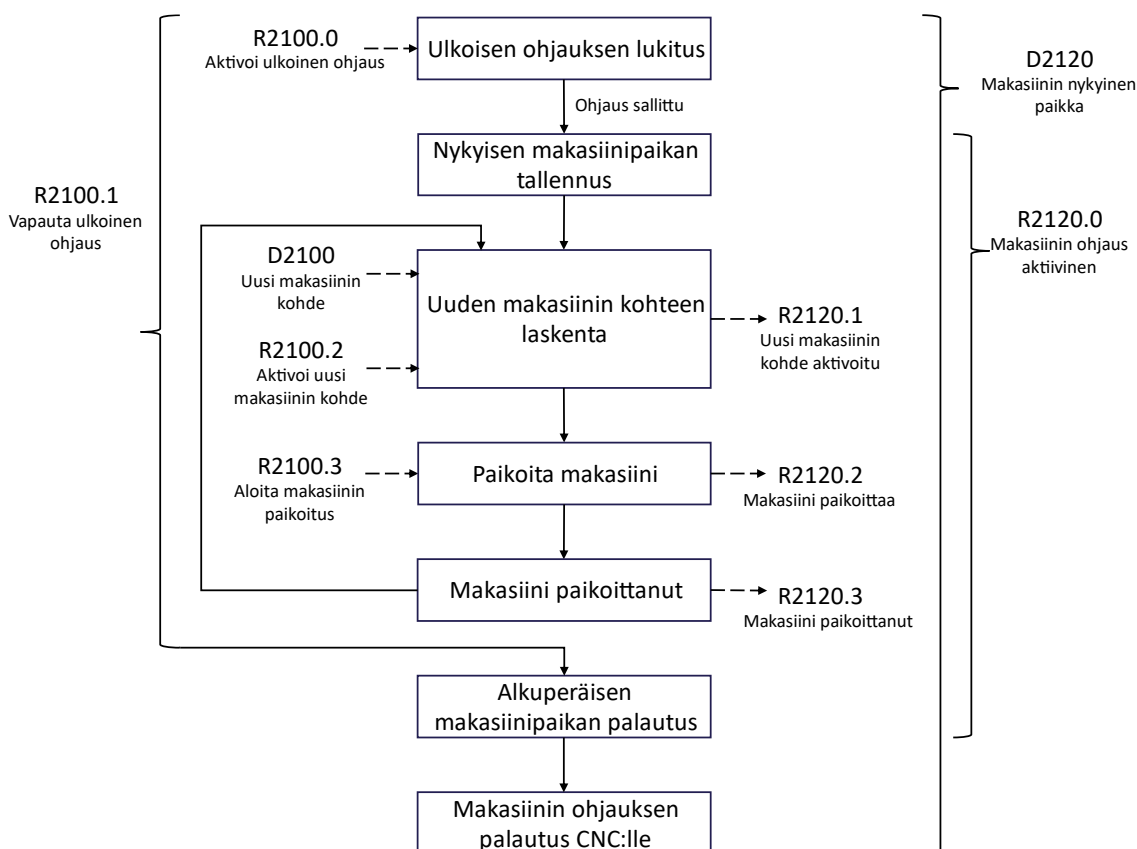
Makasiinin servolta saadaan tieto mikä makasiinin työkalupaikka on työkalunvaihtopisteessä. Nykyinen makasiinipaikka työstökoneen yläosassa saadaan selville laskemalla se työkaluvaihtopisteen makasiinipaikasta. Mikäli työkalunvaihtopisteessä oleva makasiinipaikka on 45 tai alle, lisätään siihen 15. Puolestaan paikan ollessa yli 45 vähennetään siitä 45.

Lopuksi testeissä selvisi yksi ongelmatilanne: CNC-ohjaimen aloitettua työkalunvaihdon aliohjelman, mutta M06-käskyä ei ole vielä kutsuttu CNC:ltä. Mikäli tässä kohtaa aktivoitiin ulkoinen ohjaus, meni se lävitse, mutta CNC-ohjelma jatkoi suoritustaan ja antoi virheen kutsuessaan M06-käskyn PMC:ltä. Tähän täytyi löytää ratkaisu, joka osoittautui olevan työkaluvaihdon väliverhon ohjaussignaali, joka on aikaisin signaali ennen M06-signaalia. Mikäli väliverhon signaali tulee aktiiviseksi, lukitaan ulkoisen ohjauksen aktivointi ja M06-käskyn valmistuttua vapautetaan lukitus.

```
000009002 (AUTO TOOL CHANGE) ;  
#149=#4003 ;  
IF[#1006 EQ 1] GOTO 10 ;  
G80 G40 M09 ;  
M42 ;  
G91 G30 Z0. M19 X0. Y0. ;  
N10 M06 ;  
G#149 ;  
M99 ;  
%
```

Kuva 8. Automaattisen työkalunvaihdon CNC-makro.

Kuvassa 8 on työstökoneen vakiotyökalunvaihtomakron G-koodi. Tästä makrosta käytetään hyväksi M42-kutsua, jolla nostetaan työkalumakasiinin ja työstötilan välinen verho. Verhon noston jälkeen kara ajetaan työkalunvaihtopisteeseen, tämä kyseinen liike voi kestää hetken riippuen karan paikasta työkalunvaihdon alettua. Mikäli makasiini varattiin paikoituksen aikana ulkoiselle ohjaukselle, syntyi koneessa virhe paikoituksen valmistuttua ja ohjelman kutsuessa M06-käskyä. Tarkasteltaessa verhon ohjausta voidaan ulkoinen ohjaus lukita työkalunvaihdon ajaksi ja näin estää virhetilanne.



Kuvio 18. Ulkoisen ohjauksen sekvenssin rakenne.

Kuviossa 18 on esitetty ulkoisen ohjauksen sekvenssiä lohkokaaaviolla. Kuvion vasemmanpuoleiset muistiosoitteet ovat ohjauksen tuloja ja oikeanpuoleiset puolestaan lähtöjä. Aaltosulut kuvaavat, missä vaiheissa kukin lähtöosoite on aktiivinen ja missä vaiheessa tulosignaali voidaan aktivoida. Ulkoinen ohjaus alkaa makasiinin varaamisella, jonka jälkeen tallennetaan makasiinin alkuperäinen paikkaohjaus. Ulkoisen ohjausluvan tultua voidaan makasiinille osoittaa uusi asento. Osoituksen jälkeen makasiini voidaan paikoittaa haluttuun asentoon. Paikoituksen valmistuttua voidaan makasiini paikoittaa uudelleen tai ohjaus palauttaa takaisin työstökoneelle.

5.5 Muutos työkalunumeroiden käsittelyyn

Työkalumakasiinin ohjauksen ratkettua oli vielä yksi ongelma. Työstökone mahdollisti vakiona työkalunumerot 1–60, tämä kuitenkin oli liian vähän sillä makasiinin laajennuksesta robotilla ei olisi hyötyä, mikäli työkalunumeroita voisi rekisteröidä vain makasiinin paikkojen verran. CNC-ohjaimen asetuksista löytyi kuitenkin asetus, jolla numeroinnin pystyi laajentamaan välille 1–250, tämä määrä riittikin jo asiakkaalle.

Uutta numerointia testatessa kuitenkin kävi nopeasti ilmi, että työstökoneen työkaluhallintaan ei pystynyt syöttämään isompaa numeroa kuin 99. Kyseinen ongelma oli kuitenkin kierrettävissä luodulla työkalujen hallintasovelluksella, jolla työkalunumeron syöttäminen onnistui numeroon 250 asti. Seuraavaksi huomattiin, ettei numeron 99 ylittävä työkalunumero näkynyt oikein kuvan 1 taulukossa. Tämä johtui numeron kirjaamistavasta PMC:n osoitteisiin, nimittäin numerointi tapahtui BCD-koodauksella, joka kykenee esittämään 8-bitin osoitteella maksimissaan luvun 99. CNC-ohjaimen asetuksista löytyi myös asetus koodauksen vaihtoon, jossa vaihtoehtoina oli BCD- ja binäärikoodaus. Vaihdettaessa binääriseen koodaukseen näkyi 99 ylittävät luvut oikein, tämä kuitenkin aiheutti sen, etteivät vanhat numeroinnit pitäneet enää paikkaansa vaan ne täytyi korjata, eli syöttää työkalumerot uudestaan.

Muutoksien jälkeen kaikki näytti olevan kunnossa, joten seuraavaksi testattiin, mikäli työkalunvaihto toimisi uudella numeroinnilla. Testatessa huomattiin, että työkalut, joiden numero oli 99 tai alle, vaihtuivat ja kaikki toimi kuten ennenkin, mutta numeron 99 ylittyessä antoi CNC virheen virheellisestä työkalunumerosta. Virheen selvitys alkoikin PMC-ohjelmasta, sillä siellä työkalun käsittely tapahtuu. MAG_UNIT-ohjelmasta löytyi kohta, jossa tarkistettiin, mikäli annettu työkalunumero oli 99 tai alle. Työkalunumeron ylittyessä syntyi tarkistuksesta häiriö.

Ennen tarkistuksen muuttamista piti selvittää mihin muutos vaikuttaisi. Selvityksen jälkeen selvisikin, että vaikka CNC-ohjaimen asetuksista työkalunumerointi vaihdettiin binääriseksi, käsitteli PMC työkalunumeroita BCD-koodauksella. Tämä tarkoitti sitä, etteivät yli numeron 99 olevat työkalunumerot toimineet oikein, sillä 8-bitin BCD-koodaus pystyy vain kahden numeron toistoon, eli kumpikin numero vie 4-bittiä. Tämä oli korjattavissa korvaamalla työkalunumeroiden käsittelyn BCD-binäärimuutokset datan siirroilla, eli sen sijaan, että numeron koodaus käännettiin muistiosoitteen BCD-koodauksesta binäärikoodattuun, siirrettiin numero sellaisenaan toiseen osoitteeseen. Näillä muutoksilla ja työkalunumeron tarkistuksen kasvattamisella numeroon 250 työkalunvaihto alkoi toimimaan ja tällä kertaa työkalunvaihto onnistui myös työkalulle, jonka numero oli 250.

6 RAJAPINTASOVELLUS

6.1 Projektin perustaminen

Työkalutietojen käsittelemiseksi täytyi luoda vielä rajapinta työstökoneen ja ulkoisen järjestelmän välille. Työn tekovaiheessa ei ollut vielä tiedossa, millä järjestelmällä varsinainen ohjaus tultaisiin toteuttamaan, minkä takia rajapinnasta päädyttiin tekemään kirjasto, joka voidaan ottaa myöhemmin käyttöön ohjauksen selvittyä. Ohjelma ei siis tässä vaiheessa keskustelee muun kuin työstökoneen kanssa. Rajapinta koneeseen luotiin Fanuc FOCAS -kirjastolla, joka mahdollisti tiedonsiirron koneen ja rajapintasovelluksen välillä.

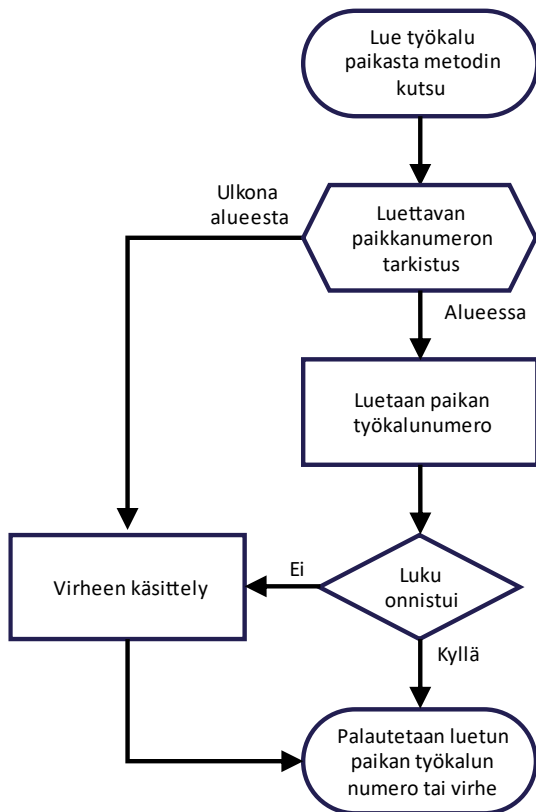
Sovellus kehitettiin Windows Forms -sovelluskehityksen avulla, tämä mahdollisti suunniteltujen funktioiden helpon testauksen hyvin yksinkertaisen käyttöliittymän avulla. Tästä syystä ohjelmointikieleksi valikoitui C#, tästä kielestä oli myös itsellä eniten kokemusta. Työssä luodut funktiot kerättiin oman luokan alle, jolloin tehdyn rajapinnan siirtäminen olisi helppoa muihin sovelluskehysiin. Työn olisi voinut tehdä myös konsolikäyttöliittymällä, mutta testaus olisi ollut hankalampaa.

Työ aloitettiin luomalla uusi Windows Forms -projekti. FOCAS-kirjaston käyttöönottamiseksi luotuun projektiin täytyi siihen sisällyttää tarvittavat tiedostot FOCAS-kirjaston paketista. Tarvittavat kirjastotiedostot valittiin taulukon 6 avulla, näistä käyttöön valikoitui `focas32.dll` ja `focase1.dll`. Näiden lisäksi tarvittiin vielä otsikkotiedosto, jossa kerrotaan mistä ja missä muodossa käytetyt kirjastofunktiot löytyvät. C#-ohjelmointikielelle kyseinen tiedosto löytyi nimellä `focas32.cs`. Kyseinen konfiguraatio vaati ohjelman kääntämisen ja sen suorittamisen 32-bittisenä. Tällä ei ollut kuitenkaan merkitystä muuhun ohjelmointiin. 32-bittinen kirjasto tukee myös suurempaa määrää CNC-ohjaimia.

6.2 Työkalujen hallinta

Sovelluksen suunnittelu alkoi työkalutietojen lukemisesta. Kuten kohdassa 4.3.1 todettiin, löytyivät koneessa olevien työkalujen numerot PMC:n muistiosoitteista. Tämän takia FOCAS-kirjaston dokumentaatiosta piti etsiä oikea funktio, jolla voidaan lukea osoitteiden arvoja PMC:ltä. Löydetty funktio on nimeltään `PMC_RDPMC RNG`, jolla voidaan lukea

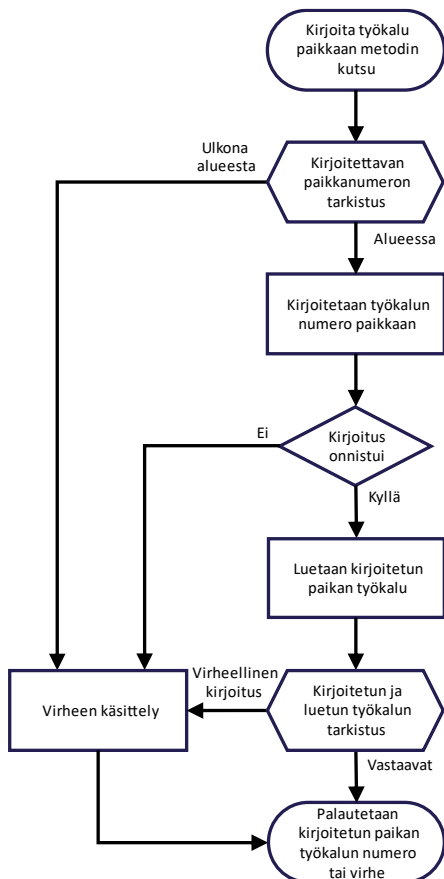
määrätty osoitealue PMC:ltä. Osoitealueesta on hyötyä, sillä samalla funktiolla on mahdollista lukea pelkästään yhden työkalupaikan työkalunumero tai kerralla kaikkien 60:n paikan työkalujen numerot.



Kuvio 19. Työkalupaikan luku työstökoneesta.

Kuviossa 19 on esitetty yhden työkalupaikan lukuun toteutetun funktion suoritus. Funktion aluksi tarkistetaan luettavan työkalupaikan oikeellisuus, eli paikka on joko nollan eli karapaikan ja 60:n välissä. Mikäli annettu työkalupaikka on ulkona sallitusta alueesta, käsitellään virhe ja palautetaan virhekoodi. Työkalupaikan ollessa sallituissa rajoissa luetaan paikan työkalunumero PMC_RDPMCRNG-funktiolla, joka palauttaa tiedon myös lukemisen onnistumisesta. Funktion onnistuessa palautetaan paikan työkalunumero, muussa tapauksessa käsitellään virhe ja palautetaan virhekoodi.

Työkalun kirjoittamiseksi piti FOCAS-kirjaston dokumentaatiosta etsiä funktio, jolla PMC-osoitteen kirjoitus onnistui. Tähän löytyi funktio nimeltään PMC_WRPMCRNG, myös tämä funktio mahdollistaa usean osoitteen yhtäaikaista kirjoitusta.



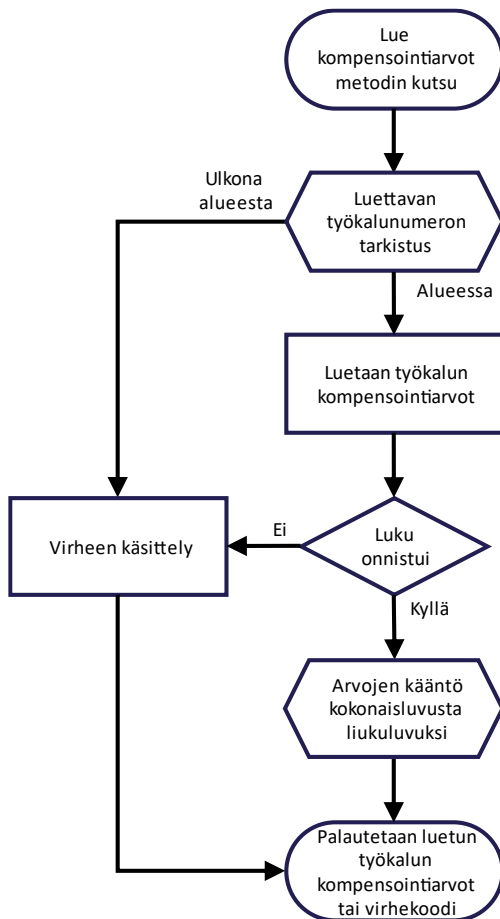
Kuvio 20. Työkalun kirjoitus työkalupaikkaan.

Kuviossa 20 on esitetty työkalun kirjoittamiseen luodun funktion suoritus. Suoritus on hyvin samankaltainen kuin lukufunktionkin, eli ensin tarkistetaan kirjoitettavan paikan oikeellisuus, jonka jälkeen työkalupaikkaan kirjoitetaan työkalunumero. Onnistuneen kirjoituksen jälkeen kirjoitettu paikka luetaan, jotta voidaan varmistua oikean työkalunumeron siirrosta. Luetun työkalun vastatessa kirjoitettua palautetaan kirjoitetun työkalun numero ja tieto onnistuneesta kirjoituksesta, muussa tapauksessa funktio palauttaa virhekoodin.

6.3 Työkalujen kompensointiarvojen hallinta

Työkalujen osoituksen onnistuttua oli seuraavaksi vuorossa työkalujen kompensointiarvojen käsittely. Kohdassa 4.3.2 todettiin kompensointiarvojen löytyvän työstökoneen makroista, joten nyt FOCAS-kirjaston dokumentaatiosta piti etsiä funktio, jolla makrojen luku onnistuu. Makrojen lukemisen sijaan dokumentaatiosta löytyi funktio nimeltään CNC_RDTOFSR, jolla voidaan lukea kompensointiarvoja suoraan työkalunumeron avulla. Tätä funktiota käytettäessä ei etsittyjä muistipaikkoja tarvittu, sillä funktio osaa lukea oikeat

arvot pelkän työkalunumeron avulla. Funktio mahdollistaa työkalun tietyn kompensointiarvon lukemisen tai kaikkien kerralla. Myös tällä voidaan lukea vain yhden tai useamman työkalun kompensointiarvot kerralla.

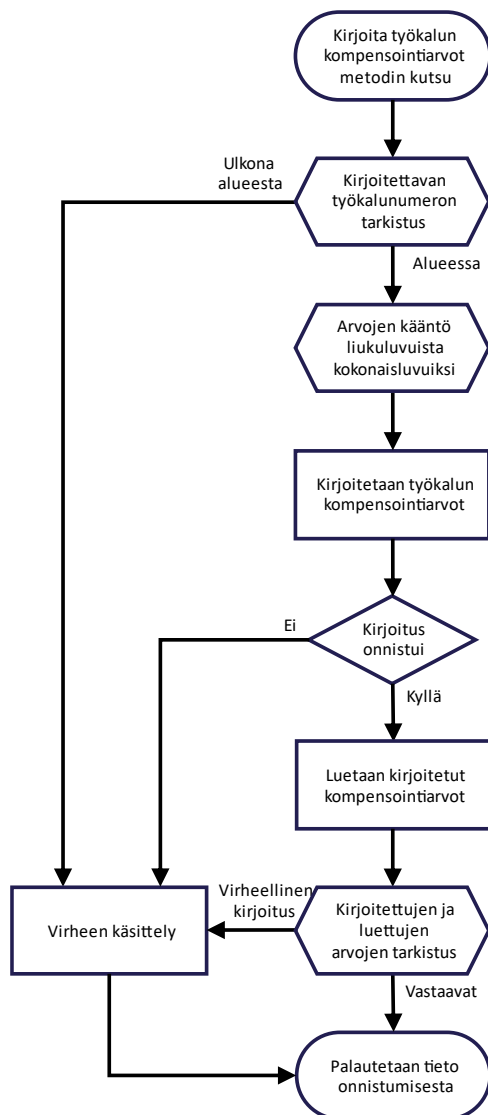


Kuvio 21. Työkalun kompensointiarvojen luku.

Kuviossa 21 on esitetty työkalun kompensointiarvojen lukuun suunnitellun funktion suoritus. Funktion aluksi tarkistetaan, että työkalunumero on sallituissa rajoissa, tässä tapauksessa 1–250. Työkalunumeron ollessa sallittu luetaan kompensointiarvot kyseiselle työkalulle. Onnistuneen lukemisen jälkeen täytyy luetut arvot kääntää kokonaisluvusta liukuluvuiksi. Funktio palauttaa arvot aina tietyssä muodossa, joten liukuluvuksi kääntäminen onnistui sijoittamalla desimaalierotin oikeaan väliin. Kaikkien vaiheiden onnistuttua palauttaa funktio luetut kompensointiarvot, muussa tapauksessa palauttaa se virhekoodin.

Työkalujen kompensointiarvojen kirjoitukseen löytyi dokumentaatiosta funktio nimeltään CNC_WRTOFSR. Myös tämä funktio osaa kirjoittaa arvot oikealle työkalulle

työkalunumeron perusteella. Tällä funktiolla on mahdollista kirjoittaa vain yhden työkalun arvot kerrallaan.



Kuvio 22. Työkalun kompensointiarvojen kirjoitus.

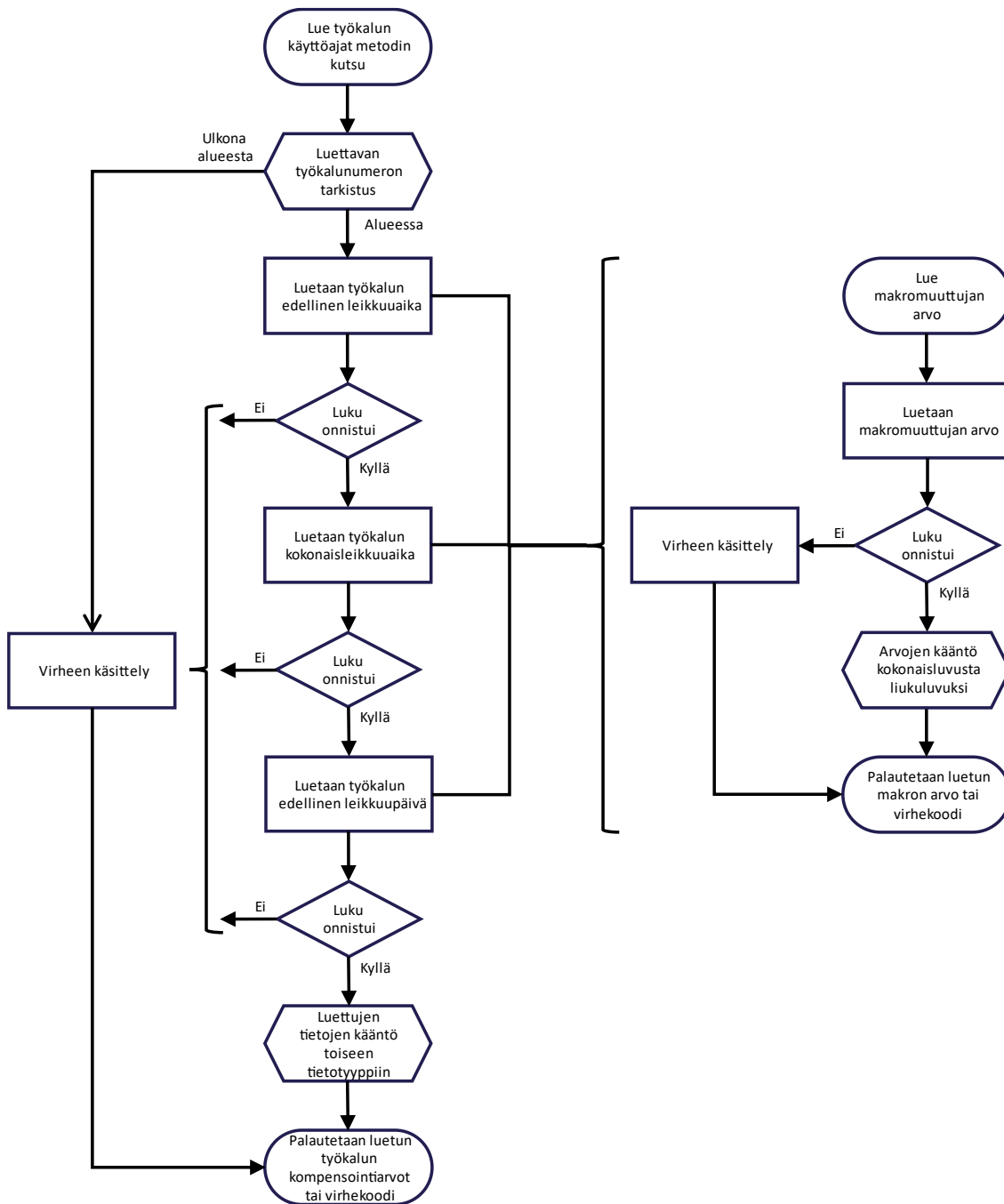
Kuviossa 22 on esitetty työkalujen kompensointiarvojen kirjoitukseen luodun funktion suoritus. Funktion aluksi tarkistetaan työkalunumeron olevan sallituissa rajoissa. Sallitun työkalun ollessa kyseessä täytyy kompensointiarvot kääntää liukuluvuista kokonaisluvuiksi, sillä käytetty funktio käsittelee vain kokonaislukuja lukemiseen käytetyn funktion tavoin. Kyseinen muunnos onnistui poistamalla desimaalierotin luvusta. Arvojen käsittelyn jälkeen voidaan arvot kirjoittaa CNC-ohjaimeen. Onnistuneen kirjoituksen jälkeen kirjoitetut arvot luetaan CNC-ohjaimesta, jotta voidaan varmistua tietojen oikeellisuudesta. Kirjoitettujen ja

luettujen arvojen vastatessa toisiaan palauttaa luotu funktio tiedon onnistumisesta, muussa tapauksessa se palauttaa virhekoodin.

6.4 Työkalujen käyttöaikojen hallinta

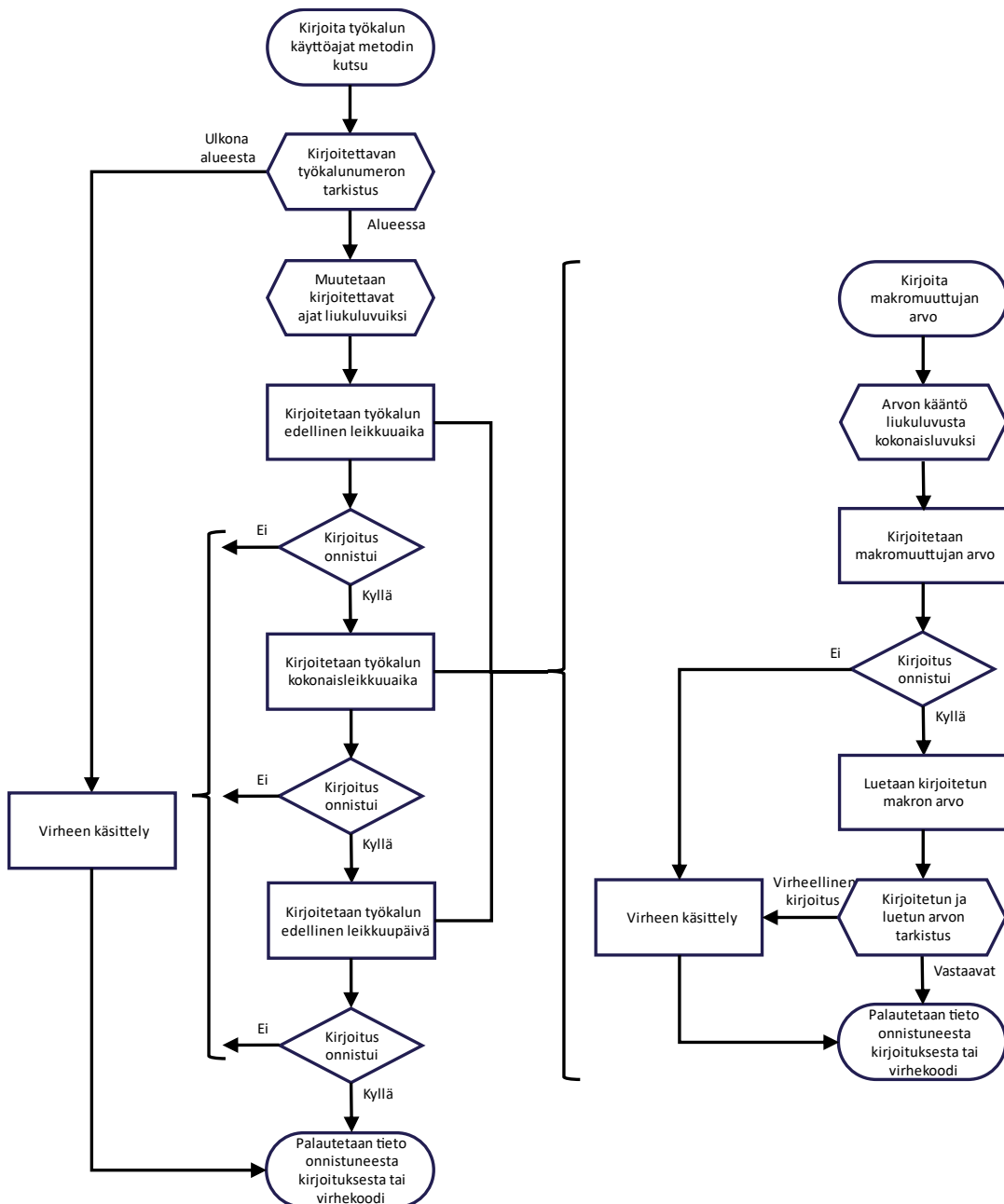
Työkalutiedoista viimeiseksi käsiteltäväksi jäi käyttöaikojen hallinta. Kuten kohdassa 4.3.3 todettiin, löytyivät työkalujen käyttöajat CNC-ohjaimen makromuuttujista. Näiden lukuun ei FOCAS-kirjastosta löytynyt funktiota, jolla olisi voinut lukea kerralla kaikki käyttöajat työkalulle kuten kompensointiarvoille löytyi. Kirjastosta kuitenkin löytyi funktio nimeltään CNC_RDPMACRO, jolla on mahdollista lukea kerralla yhden tai useamman makromuuttujan arvo. Kyseistä funktiota oli mahdollista käyttää, sillä kohdassa 4.3.3 löydettiin kullekin arvolle omat muuttujat, joten funktiolla voidaan lukea kyseiset muuttujat erikseen.

Kuviossa 23 on esitetty työkalun käyttöaikojen lukemiseen luodun funktion suoritus. Funktion aluksi luettavan työkalun numero tarkistetaan, jolla varmistetaan luvun tapahtuvan oikealta alueelta. Työkalunumeron ollessa sallittu luetaan makron arvo, johon on tallennettu työkalun edellinen leikkuaika. Luku tapahtuu erillisellä funktiolla, joka tehtiin geneeriseksi, jotta kaikkia makroja voidaan lukea samalla tavalla. Kyseisessä funktiossa makro luetaan CNC-ohjaimelta ja onnistuneen luvun jälkeen luettu kokonaisluku muutetaan liukuluvuksi. Näiden vaiheiden jälkeen funktio palauttaa tiedon onnistumisesta. Onnistuneen leikkuajan lukemisen jälkeen luetaan työkalun kokonaisleikkuaika, joka luetaan samalla tavalla kuin edellinen leikkuaika. Myös tämän luvun onnistuttua luetaan työkalun edellinen leikkuaikajankohda, samalla tavalla kuin edellisetkin. Lukujen onnistuttua muodostetaan luetuista tiedoista aikaperusteiset tietotyypit, jotta tietojen käsittely myöhemmin on helpompaa. Kaikkien vaiheiden onnistuttua palauttaa funktio tietotyyppin työkalun käyttöajoista.



Kuvio 23. Työkalun käyttöaikojen luku.

Viimeiseksi jäljelle jäi työkalujen käyttöaikojen kirjoitus työstökoneelle. Tähän ei löytynyt myöskään valmista funktiota FOCAS-kirjastosta, vaan kirjastosta löytyi funktio nimeltään CNC_WRPMACRO, jolla on mahdollista kirjoittaa yksittäisiä makroja. Tietojen kirjoitus tapahtuukin samaan tapaan kuin niiden lukukin, jokainen arvo kirjoitetaan erikseen CNC-ohjaimelle.



Kuvio 24. Työkalun käyttöaikojen kirjoitus.

Kuviossa 24 on esitetty työkalun käyttöaikojen kirjoitukseen luodun funktion suoritus. Funktion aluksi tarkistetaan, että kirjoitettavan työkalun numero on sallittu, onnistuneen tarkistuksen jälkeen työkalun käyttöajat muutetaan liukuluvuiksi. Tietotyyppimuunnoksen jälkeen työkalun edellinen käyttöajankohta kirjoitetaan työstökoneelle, makron kirjoitukseen luodun funktion avulla. Kyseinen funktio luotiin geneeriseksi, jotta kaikkia makromuuttujia voidaan kirjoittaa samalla funktiolla. Tämän funktion alussa kirjoitettava arvo muutetaan liukuluvusta kokonaisluvuksi. Muunnoksen jälkeen arvo kirjoitetaan CNC-ohjaimelle ja tämän onnistuttua luetaan kirjoitetun makromuuttujan arvo. Lukemisen

onnistuttua verrataan kirjoitettua ja luettua arvoa keskenään, jotta varmistutaan oikean tiedon siirrosta. Kyseisien toimintojen valmistuttua makron kirjoitusfunktio palauttaa tiedon onnistumisesta tai virheestä. Onnistuneen työkalun edellisen leikkuuajan kirjoituksen jälkeen kirjoitetaan työstökoneelle työkalun kokonaisleikkuuaika, samalla tavalla kuten edellinen leikkuuaika. Tämänkin kirjoituksen onnistuttua kirjoitetaan vielä työkalun edellinen leikkuuajankohta työstökoneelle kuten edellisetkin. Näiden vaiheiden jälkeen palauttaa funktio tiedon onnistuneesta kirjoituksesta tai koodin mahdollisesta virheestä.

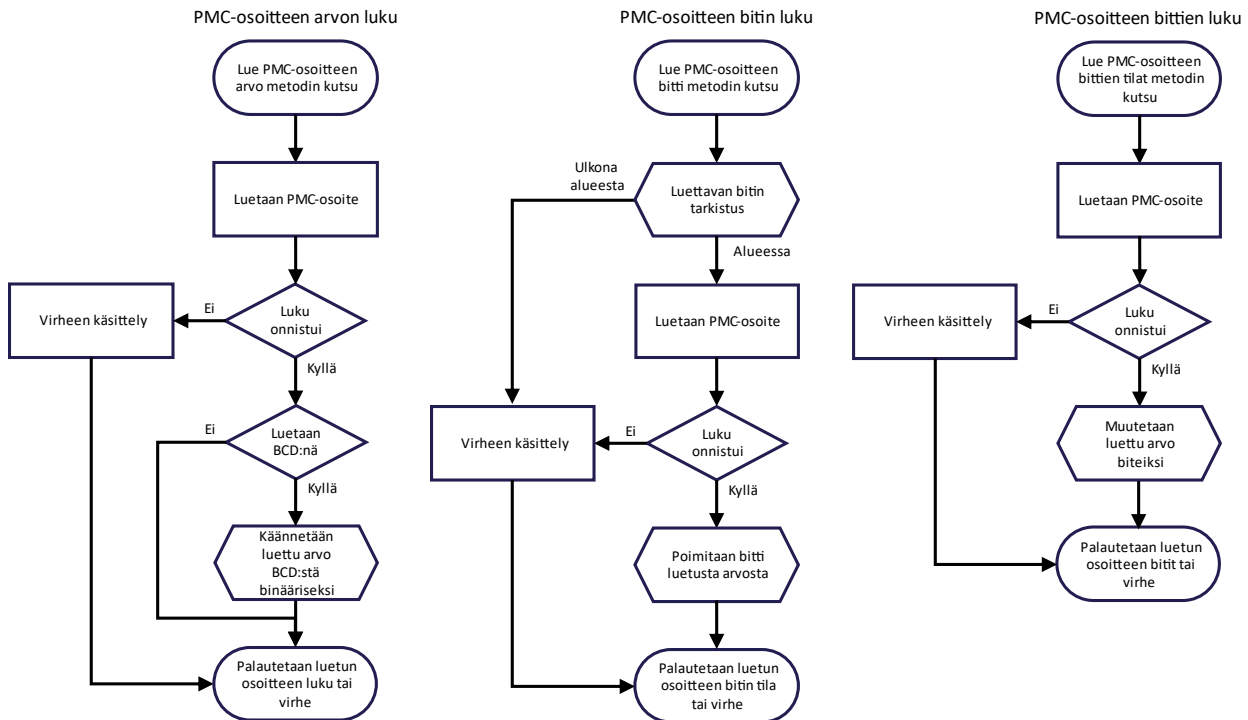
6.5 Makasiinin ohjaus

Viimeiseksi tehtäväksi rajapintasovelluksen osalta jäi makasiinin ohjaus. Ohjauksen rajapinnaksi työstökoneella muodostui PMC-osoitteet, näitä olivat R- ja D-osoitteet, kuten taulukossa 10 on lueteltu. Näitä osoitteita varten piti FOCAS-kirjastosta etsiä funktiot, joilla oli mahdollista lukea ja kirjoittaa PMC-osoitteita. Lukemiseen löytyi funktio nimeltään `PMC_RDPMCRNG`, jolla voi lukea yhden tai useamman osoitteen arvon kerralla. Kirjoittamiseen löytyi funktio nimeltään `PMC_WRPMCRNG`. Kyseiset funktiot käsittelevät osoitteita koko 8-bitin leveydeltä, joten yksittäisen bitin kirjoitus aiheutti vähän haasteita, näitä on kuitenkin käsitelty hiukan myöhempänä.

Makasiinia ohjataan rajapintasovelluksella lukemalla taulukossa 10 esiteltyjä lähtöosoitteita ja kirjoittamalla tulo-osoitteita. Osoitteiden jako mahdollisti osoitealueiden käytön aina yhteen suuntaan, jolloin ei tarvitse huomioida toisen osapuolen muuttavan osoitteiden tilaa. Eli työstökoneeseen luotu aliohjelma kuuntelee taulukon 10 tulo-osoitteita, joita kirjoitetaan ulkoisesta rajapintasovelluksesta, ja aliohjelma kertoo omasta tilastaan lähtöosoitteilla, joita rajapintasovellus kuuntelee.

6.5.1 PMC-osoitteiden luku

Osoitteiden lukua varten täytyi luoda kolme erilaista funktiota, joiden toiminta riippuu luetavan tiedon tyyppistä. Osoitteen lukuun käytetty funktio palauttaa aina osoitteen sisältämän tiedon kokonaislukuna, tästä syystä piti luoda useampi funktio, sillä palautettu luku täytyi käsitellä eritavoin riippuen halutusta tiedosta. Funktiot luotiin yksittäisen bitin lukuun, osoitteen kokonaisluvun lukuun tai osoitteen bittien lukuun.

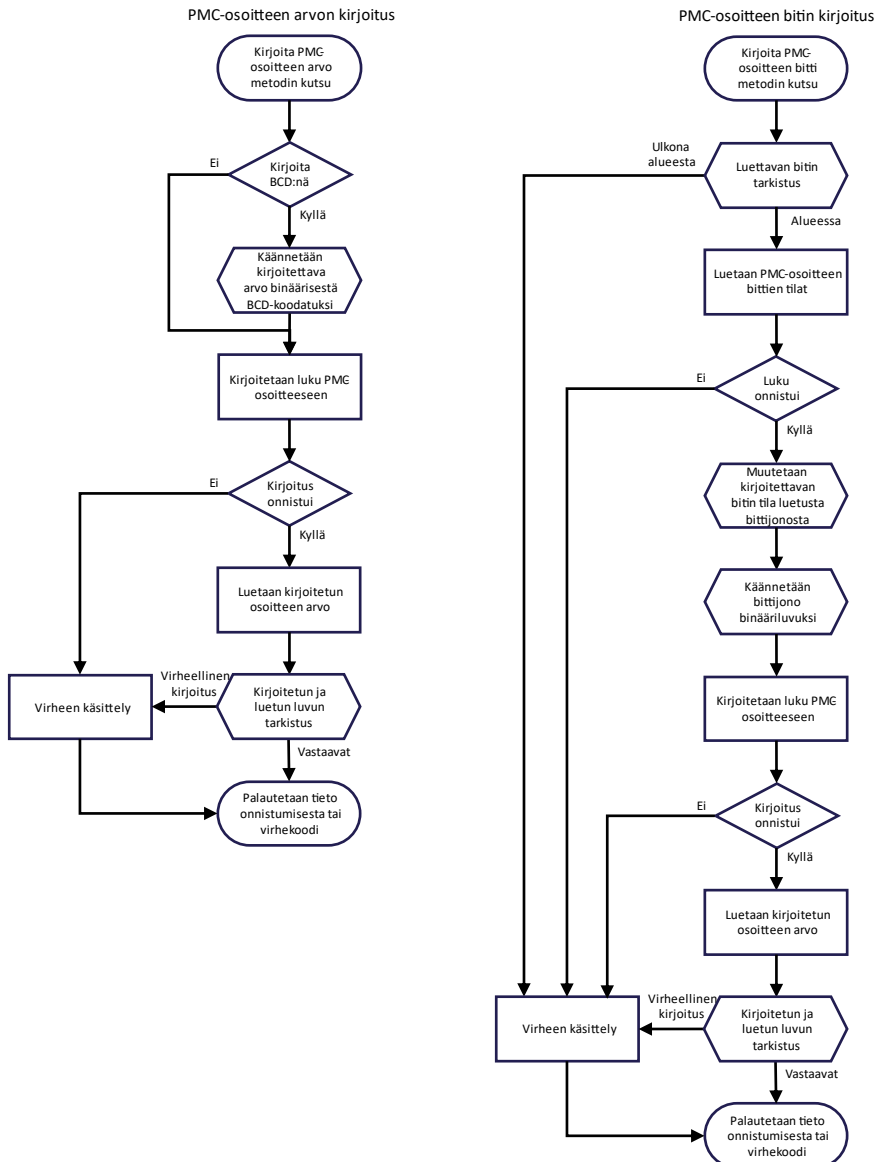


Kuvio 25. PMC-osoitteiden lukuun luodut funktiot.

Kuviossa 25 on esitelty PMC-osoitteiden lukuun luodut funktiot. Erot funktioiden välillä on luetun tiedon käsittelyssä. Osoitteen arvon lukemiseen luotu funktio on kaikista yksinkertaisin. Luettaessa binäärikoodattua osoitetta voidaan FOCAS-kirjaston palauttama luku poimia sellaisenaan, mutta BCD-koodattu luku täytyy muuttaa binääriseksi. Luettaessa yhden bitin tilaa osoitteesta muutetaan FOCAS-kirjaston funktion palauttama luku bittijonoksi, josta poimitaan haluttu bitti, ja palautetaan tieto totuusarvomuuuttujana. Kaikkien bittien luku tapahtuu samaan tapaan kuin yksittäistä bittiä luettaessa, mutta funktio palauttaa koko bittijonon yhden sijasta.

6.5.2 PMC-osoitteiden kirjoitus

PMC-osoitteiden kirjoitukseen käytetty funktio kirjoittaa osoitteeseen aina luvun, joten myös osoitteiden kirjoitusta varten luotiin kaksi erilaista funktiota. Toinen funktio tehtiin PMC-osoitteen arvon kirjoittamiseen ja toinen yksittäisen bitin kirjoittamiseen osoitteesta. Nämä funktiot eroavat kirjoitettavan luvun käsittelyssä.



Kuvio 26. PMC-osoitteiden kirjoitukseen luodut funktiot.

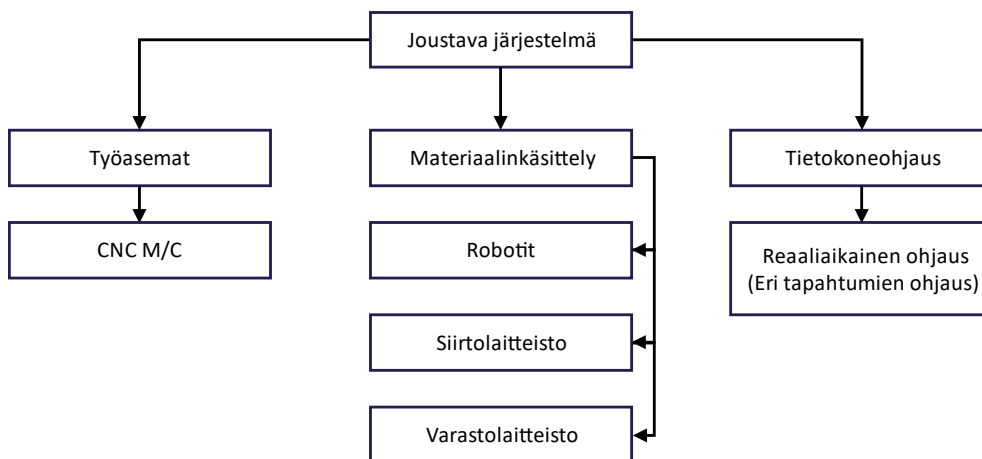
Kuviossa 26 on esitetty PMC-osoitteiden kirjoitukseen luodut funktiot. Osoitteen luvun kirjoitukseen luotu funktio kirjoittaa annetun luvun, joko sellaisenaan tai BCD-koodattuna PMC-osoitteeseen. Onnistuneen kirjoituksen jälkeen varmistetaan luvun oikea kirjoitus lukemalla osoite ja vertaamalla arvoja keskenään. Yksittäistä bittiä kirjoittaessa luetaan kirjoitettavan osoitteen bittien tilat. Tämä täytyy tehdä, jotta vain yhden bitin tilan muuttaminen on mahdollista, sillä kirjoitukseen käytetty funktio kirjoittaa luvun osoitteeseen ja näin muuttaa kaikkia osoitteen bittejä. Luetuista biteistä muutetaan kirjoitettavan bitin tila halutuksi. Bitin tilan vaihdon jälkeen bittijono muutetaan luvuksi, joka kirjoitetaan PMC-osoitteeseen. Kirjoituksen jälkeen osoite luetaan ja luettua bittijonoa verrataan kirjoitettuun.

7 JOUSTAVA VALMISTUS

7.1 FMS, joustava valmistusjärjestelmä

FMS (flexible manufacturing system) -järjestelmä on ryhmä koneita, jotka on liitetty toisiinsa automaattisella materiaalinkäsittelyllä, varastojärjestelmällä ja keskitetyllä tietokoneohjauksella (Shivanand ym., 2006, s. 2). FMS-järjestelmää kutsutaan joustavaksi, sillä se pystyy käsittelemään erilaisia kappaleita yhtä aikaa tuotantosoluissa, lisäksi valmistusmääriä voidaan muuttaa tarpeen mukaan. Yksi järjestelmän tavoitteista on saavuttaa pien-sarjavalmistuksen joustavuus, kuitenkin säilyttäen suuren volyymin massatuotannon tehokkuus (Shrivastava ym., 2013, s. 254).

FMS-järjestelmän joustavuus voidaan jakaa tyypillisesti kahteen kategoriaan, konejoustavuuteen ja jakelujoustavuuteen (Monroe 2017). Konejoustavuus viittaa järjestelmän kykyyn valmistaa uuden tyyppisiä tuotteita ja sen mahdollisuuksiin muuttaa toimintojen suoritusjärjestystä. Jakelujoustavuus viittaa järjestelmän kykyyn käyttää kahta tai useampaa konetta suorittamaan saman tehtävän, sekä sen kykyyn käsitellä suuren luokan muutoksia, kuten merkittävän kasvun volyyymissä ja/tai kapasiteetissa.



Kuvio 27. Joustavan valmistusjärjestelmän komponentteja (perustuu Shenchong, 2021).

Kuviossa 27 on esitetty, mistä osa-alueista joustava valmistusjärjestelmä koostuu. Työasemat voivat olla erilaisia koneita tai työpisteitä, joissa materiaalia käsitellään, esimerkiksi työstökoneita. Materiaalinkäsittely kattaa materiaalin siirron ja sen varastoinnin, siirto voi

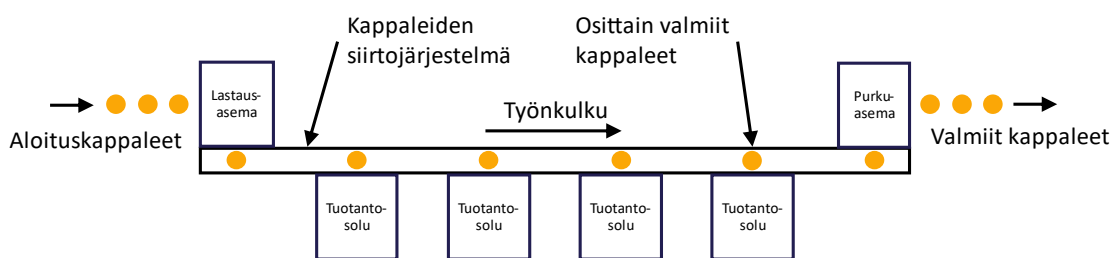
tapautua varaston oman hissien tai ulkoisten automaattitrukkien avulla. Näitä kaikkia toimintoja ohjaa keskitetty tietokoneohjaus, josta prosessia voidaan ohjata, valvoa ja muokata.

7.2 FMS-järjestelmätyyppit

Erilaisia FMS-järjestelmätyppejä ovat jatkuva, satunnainen, omistettu, suunniteltu ja modulaarinen FMS (Aravind, 2019). Jatkuvatyyppinen järjestelmä valmistaa yhden tyyppin tuotantoerän kerallaan, jonka jälkeen suunnitellaan ja valmistellaan seuraavan tyyppisen tuotantoerän valmistus. Satunnaistyyppinen järjestelmä valmistaa satunnaisen tyyppisiä kappaleita, milloin vain. Omistettu järjestelmä valmistaa jatkuvasti pitkiä aikoja samaa, mutta rajoitetun yhdistelmän kappaleiden erätyyppejä. Suunniteltu järjestelmä valmistaa saman lajitelman tuotteita koko sen elinajan. Modulaarinen järjestelmä pitkälle kehitetyllä FMS-isännällä sallii käyttäjän laajentaa FMS-ominaisuuksiaan vaiheittain mihin tahansa neljästä edellisestä FMS-typistä.

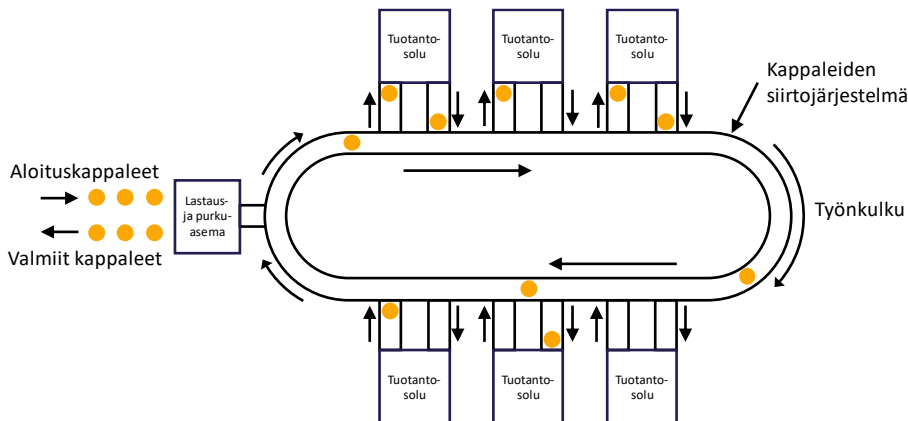
7.3 FMS-asetelmatyyppit

FMS-järjestelmät voidaan jakaa erilaisiin asetelmatyyppeihin materiaaliavirran mukaan, näitä ovat jatkuva- tai viivatyypit, silmukkatyyppi, tikaputyyppi, avoimen kentän tyyppi ja robottikeskeinen tyyppi (Aravind, 2019).



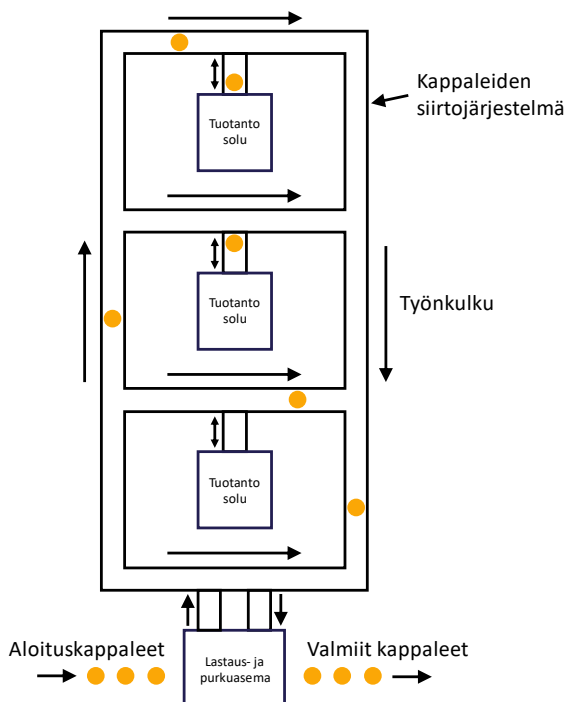
Kuvio 28. Viivatyypinen FMS-järjestelmä (perustuu Aravind, 2019).

Kuvion 28 tyyppisessä järjestelmässä koneet ja käsittelyjärjestelmä on järjestetty riviin (Aravind, 2019). Kyseinen asetelma sopii parhaiten järjestelmään, jossa työstettävä kappale etenee työasemasta toiseen tarkasti määritetyllä tavalla ilman materiaalin takaisinvirtausta. Lastaus- ja purkuasemat voidaan sijoittaa järjestelmän päihin.



Kuvio 29. Silmukkatyyppinen FMS-järjestelmä (perustuu Aravind, 2019).

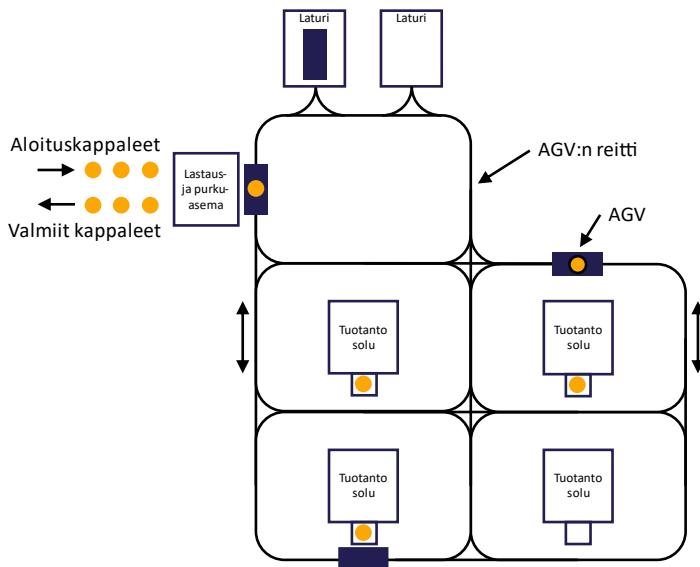
Kuvion 29 mukaisessa silmukka-asetelmassa valmistettavat kappaleet liikkuvat silmukassa yhteen suuntaan mahdollisuudella pysähtyä ja siirtyä johonkin työstöasemaan (Aravind, 2019). Lataus- ja purkuasemat sijoitetaan yleensä silmukan yhteen pätyyn.



Kuvio 30. Tikapuu-tyyppinen FMS-järjestelmä (perustuu Aravind, 2019).

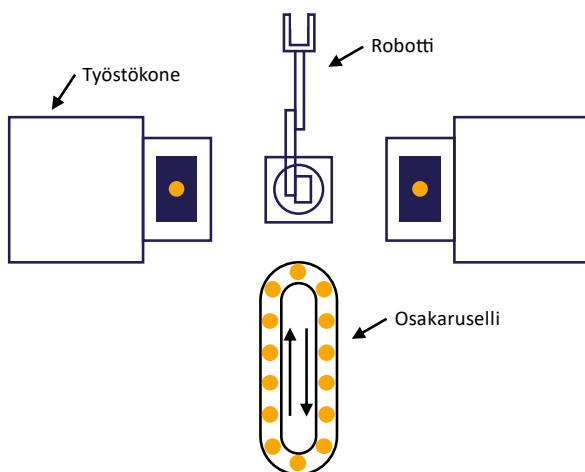
Kuvion 30 mukainen tikapuuasetelma koostuu koneita ympäröivästä silmukasta ja välissä olevista haaroista, joissa työstökoneet sijaitsevat (BrainKart, i.a.). Haarat lisäävät mahdollisia reittejä koneelta toiselle ja poistavat toissijaisen käsittelyjärjestelmän tarpeen. Tämä myös vähentää kappaleiden keskimääräistä kulkumatkaa ja minimoi ruuhkia

käsittelyjärjestelmässä. Lastaus- ja purkuasemat sijoitetaan tyypillisesti silmukan samaan pätyyn (Aravind, 2019).



Kuvio 31. Avoimen kentän -tyyppinen FMS-järjestelmä (perustuu Aravind, 2019).

Kuvion 31 mukainen avoimen kentän -tyyppinen asetelma koostuu monista silmukoista ja tikapuista, mutta voi sisältää myös haaroja (BrainKart, i.a.). Tällainen järjestelmä sopii yleensä suuren osaperheen käsittelyyn. Erilaisten konetyyppien määrä voi olla rajoitettu ja osat reititetään eri työasemille riippuen siitä, mikä vapautuu ensimmäisenä. Osien siirto asemien välillä voi tapahtua AGV-vaunuilla eli automaattitruckeilla (Aravind, 2019).



Kuvio 32. Robottikeskeinen FMS-järjestelmä (perustuu Aravind, 2019).

Kuvion 32 mukainen robottikeskeinen asetelma on suhteellisen uuden tyyppinen joustava-järjestelmä, jossa käytetään yhtä tai useampaa robottia materiaalin hallintaan (Aravind,

2019). Teollisuusrobotit varustetaan tarttujilla, jotka tekevät niistä hyvin soveltuvia pyöri-
vien osien käsittelyyn (BrainKart, i.a.). Robottikeskeisiä järjestelmiä käytetään usein sylin-
terimäisien tai levymäisien osien käsittelyyn.

7.4 FMS-järjestelmän vahvuuksia

Suurin FMS-järjestelmän eduista on valmistusresurssien hallinnan joustavuus, kuten val-
mistusaika sekä investointien hallinta uusien tuotteiden tutkimuksessa ja kehittämisessä
(Shenchong, 2021). Järjestelmän etuja ovat myös nopeammat ja alhaisemmat yksikkötuot-
tantokustannukset, parempi työntekijöiden tuottavuus ja koneiden tehokkuus. Tehokkaim-
pien tuotteiden valmistusaika on kolmasosa edellisestä ja samalla tuotteiden valmistuk-
seen tarvittavien työntekijöiden määrä pienenee viidennekseen. FMS-järjestelmässä suu-
rin osa töistä tehdään automatisoiduilla koneilla ja roboteilla, joten manuaalista työtä tai ih-
misen väliintuloa tarvitaan vähän, mikä johtaa pienempiin käyttökustannuksiin (Akrani,
2021).

7.5 FMS-järjestelmän heikkouksia

Yksi FMS-järjestelmän haittapuolista on sen käyttöönottovaihe, sillä se vaatii aikaa, tekno-
logiaa ja rahaa järjestelmän rakentamiseen (Shenchong, 2021). Järjestelmän rakennus-
kustannusten lisäksi on investoitava paremmin yhteensopiviin osajärjestelmiin ja muuhun
kertyvään materiaaliin. Vaikka käyttäjämäärä pienenee järjestelmän myötä, tarvitaan jo-
kaista vikatilannetta varten osaavampia operaattoreita (Khan ym., 2020, s. 4125). FMS-
järjestelmät ovat pääosin saatavilla vain isoimmille yrityksille, joilla on varaa järjestelmän
investointiin ja huoltoon (CPV Manufacturing, i.a.).

7.6 FMS-järjestelmiä

Seuraavassa esitellään ST-koneistuksen olemassa olevia FMS-järjestelmätyyppejä, joita
ovat Fastems MLS ja Mazak PALLETECH. Näistä Fastemsin kokonaisuus on vanhempi,
mutta sama periaate on käytössä edelleen Fastemsin uusissakin järjestelmissä. Mazak
PALLETECH -järjestelmä on toimintaperiaatteeltaan hyvin samankaltainen kuin Fastemsin

järjestelmä, mutta se on rakennettu täysin Mazakin omien laitteiden ympärille, työstökoneita ja materiaalinhallintaa myöten.

Kumpikin järjestelmä on tyypiltään modulaarinen, viiva-asetelman mukainen järjestelmä, jossa työstökoneet on liitetty järjestelmän oman automaattivaraston kylkeen. Kummassakin järjestelmässä työstettävät kappaleet kiinnitetään käsin torneihin varastoon kytketyillä latausasemilla. Latauksen jälkeen tornit lähetetään varastoon, josta järjestelmä siirtää ne työstökoneisiin, kun soveltuva kone vapautuu. Työstetty torni siirretään varastoon, josta käyttäjä tilaa sen käsittelyasemaan, jossa valmiit kappaleet irrotetaan ja uudet kiinnitetään.

7.6.1 Fastems MLS

Fastemsin MLS (Multi Level System) -järjestelmä koostuu pitkästä 2–4-kerroksisesta korkeavarastosta, johon kaikki muut laitteet liitetään (Fastems, 2019). Tavaraliikenne hallitaan varaston omalla hissillä, jonka avulla varastoon voidaan varastoida työstökonepaletteja tai materiaalityökaluja. Varastoon voidaan liittää 1–10 työstökoneita varaston kummallekin puolen yli 60:ltä työstökonevalmistajalta. Työstökonepalettien käsittely tapahtuu varastoon liitettyillä käsittelyasemilla, joissa kappaleet vaihdetaan paletteihin. Koko järjestelmää hallitaan Fastemsin kehittämällä ohjaussovelluksella nimeltään MMS (Manufacturing Management Software). Järjestelmään voidaan integroida myös automaattinen työkaluhallinta, jolla työstökoneiden työkalut voidaan vaihtaa robotin avulla.

7.6.2 Mazak PALLETECH

Mazak PALLETECH -järjestelmä rakentuu 1–3-kerroksisen palettivaraston sivulle, siihen kytketään kaikki muut laitteet (Mazak, i.a.). Fastems MLS -järjestelmästä poiketen järjestelmän tavarahissi käsittelee vakiona pelkästään työstökonepaletteja, joten materiaalin varastointi ei ole mahdollista. Järjestelmä tukee maksimissaan 16 Mazakin omaa työstökoneita, työstökoneet voidaan sijoittaa Fastems MLS -järjestelmästä poiketen vain varaston toiselle sivulle. Paletteja järjestelmässä voi olla 6–240 ja näitä voidaan käsitellä jopa kahdeksalla käsittelyasemalla. Järjestelmään voidaan integroida myös raaka-ainevarasto sekä automaattinen työkaluhallinta, jossa järjestelmään lisätään oma varasto työkaluille sekä siirtorobotti.

7.7 JTA FMF

JTA Flexible Manufacturing Factory, suomeksi joustava valmistustehdas, on JTA Connectionin uusi konsepti. Idean takana on laajentaa joustavan valmistusjärjestelmän konsepti koko tehtaan pinta-alalle. Tämä tarkoittaa käytännössä yllä mainittujen valmistusjärjestelmien pilkkomista pienemmiksi kokonaisuuksiksi. Ajatuksena on automatisoida koko valmistusketju aina aihokappaleen sahauksesta valmiiseen asiakkaalle toimitettavaan kappaleeseen asti.

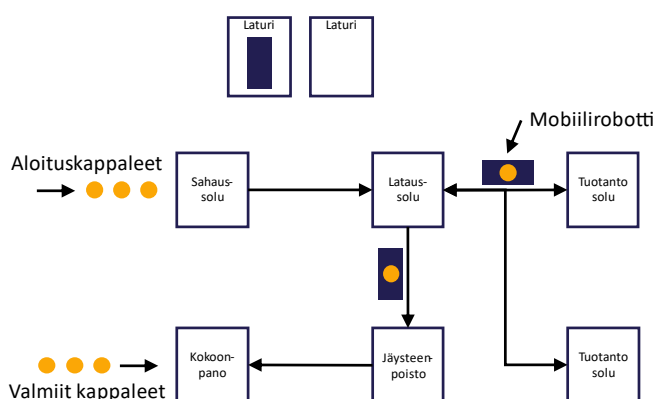
FMF-järjestelmällä pyritään ottamaan parhaimmat puolet tavanomaisista FMS-järjestelmistä ja samalla ratkoa perinteisten FMS-järjestelmien eräitä ominaisuuksia ja ongelmia tietyissä tapauksissa. Yllä käsitelty järjestelmät ovat erittäin tehokkaita kokonaisuuksia, mutta kyseisten järjestelmien yksi ongelmista on niiden laiteasettelu. Järjestelmät ovat tavallaan kompakteja, mutta samalla vaativat tietyn muotoisen tilan niiden pystyttämiseen. Näiden järjestelmien hankinta voi olla erittäin haastavaa vanhoihin tiloihin, ja vaikka järjestelmän pystytys onnistuisi, ei tila välttämättä riittäisi enää järjestelmän laajentamiseen. FMF-järjestelmän ratkaisuna olisikin pienemmät solukokonaisuudet, jolloin voidaan puhua yhden tai kahden työstökoneen palvelusta yhdellä robotilla. Tällaisille kokonaisuuksille on huomattavasti helpompaa löytää lattiatilaa jo olemassa olevista tiloista. FMS-järjestelmille on myös tavanomaista niiden korkeat alkuinvestoinnit, sillä järjestelmät ovat jo hankittaessa paljon tilaa vieviä kokonaisuuksia. FMF-järjestelmää voidaan puolestaan rakentaa joustavasti vaihteittain, mikä pienentää huomattavasti alkuinvestointeja.

Fastemsin ja Mazakin järjestelmät käsittelevät pääasiassa kokonaisia työstökonepaletteja tai -torneja. FMF-järjestelmän ideana on siirtää pienempiä kiinnitinratkaisuja, jolloin suuria torneja ei tarvitse valmistaa useita. Pienemmät kiinnittimet voidaan kiinnittää koneiden omiin torneihin tai paletteihin, jolloin saavutetaan säästöjä materiaaleissa ja käsittelylaitteistoissa. Lisäksi perinteisissä FMS-järjestelmissä työstettävät kappaleet vaihdetaan pääosin käsin koneiden paletteihin/torneihin järjestelmien omissa käsittelyasemissa. FMF-järjestelmä pystyisi tarjoamaan erillisen automaattisen lataussolun, jossa kappaleiden vaihdot kiinnittimiin voitaisiin suorittaa roboteilla.

Yllä käsitelty FMS-järjestelmät keskittyvät pääosin työstökoneiden palveluun, mutta FMF-järjestelmään olisi mahdollista liittää myös muita solukokonaisuuksia aihokappaleiden

sahauksesta valmiiden kokoonpanoon. Tällaisen järjestelmän laajennusmahdollisuudet ovat lähes rajattomat, sillä kokonaisuus ei rajoitu pelkästään yhteen valmistusjärjestelmään. Järjestelmän älykkään ohjauksen ansiosta järjestelmässä voidaan suorittaa monia toimintoja yhtä aikaa, lisäksi uusien ominaisuuksien lisäys olemassa olevaan järjestelmään on mahdollista.

Kappaleiden siirto järjestelmän solujen välillä tapahtuisi trukeilla ja/tai mobiilirobotiikan avulla. Mobiilirobotiikka mahdollistaa järjestelmän täysin itsenäisen toiminnan, kunhan raakamateriaalia riittää. Hallintajärjestelmän avulla voitaisiin luoda valmistettaville kappaleille valmistusreittejä sekä määritellä tarvittavat parametrisoinnit. Järjestelmä hallitsisi kappaleiden valmistuksen luotujen työjonojen perusteella.



Kuvio 33. FMF-järjestelmä.

Kuviossa 33 on esitetty hyvin yksinkertaisesti FMF-järjestelmän rakennetta. Kuten kuviosta näkyy, on järjestelmän rakenne avoimen kentän -tyyppinen. Solut voidaan sijoittaa mihin tahansa tehtaassa, ja nämä solut voivat olla hyvin muiden järjestelmään kuulumattomien solujen seassa. Mobiilirobotit eivät vaadi AGV-vaunujen tapaisia kiinteitä reittejä, vaan ne osaavat itse etsiä lyhimmän reitin määränpäähän, mutta vapaa kulkureitti näille on silti järjestettävä.

7.8 Älykäs valmistus

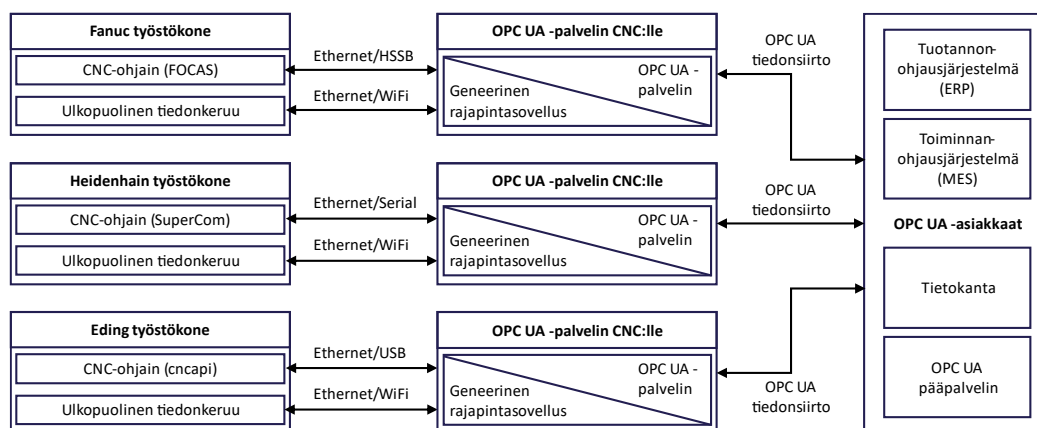
Teollisuus 4.0 eli neljättä teollista vallankumousta pidetään uutena teollisuuden vaiheena, jossa valmistusprosessien integrointi ja tuotteiden liitettävyys voivat auttaa yrityksiä saavuttamaan korkeamman teollisuuden suorituskyvyn (Dalenogare ym., 2018). Teollisuus

4.0 tähtää älykkäiden tehtaiden luontiin, joissa tuotantoteknologiaa päivitetään ja muunnetaan kyberfyysisillä järjestelmillä (CPS), esineiden internetillä (IoT) ja pilvipalveluilla (Zhong ym., 2017). Esineiden internet mahdollistaa tyypillisten tuotantoresurssien muuntamisen älykkäiksi valmistusobjekteiksi (SMO), jotka pystyvät havaitsemaan, yhdistämään ja olemaan vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja näin toteuttamaan valmistuslogiikoita automaattisesti ja mukautuvasti. Näiden kaikkien laitteiden välinen kommunikointi vaatii standardoituja rajapintoja, joiden avulla tuotantosektorin kaikki osat voivat käsitellä yhteistä kieltä (Ortiz, 2020).

7.8.1 OPC UA

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) on alustariippumaton palvelukeskeinen arkkitehtuuri, jolla tietoa voidaan siirtää turvallisesti eri laitteiden välillä (OPC Foundation, i.a.-a). Arkkitehtuuri mahdollistaa hyvän laajennettavuuden, sillä se tarjoaa mahdollisuuden uusien ominaisuuksien lisäämiseen vaikuttamatta olemassa oleviin sovelluksiin. OPC UA mahdollistaa myös monimutkaisen tiedon käsittelyn kattavan tiedon mallinnuksen avulla.

Nykyinen CNC-ohjainmarkkinan monimuotoisuus sekä joidenkin ohjaimien tukemattomuus kolmansien osapuolien sovelluksiin tekee koneiden suorasta kommunikoinnista erittäin vaikeaa (Martins ym., 2021). Toisaalta viimeaikaiset laitteet tarjoavat viestintäprotokollan, jotkin laitteet tarjoavat jopa sovelluskehitystyökalut, ohjelmointirajapinnan tai yksikertaisesti kuvauksen mahdollisista viesteistä, joilla tietoa voidaan siirtää.



Kuvio 34. Järjestelmien välinen kommunikointi OPC UA:n avulla (perustuu Martins ym., 2021).

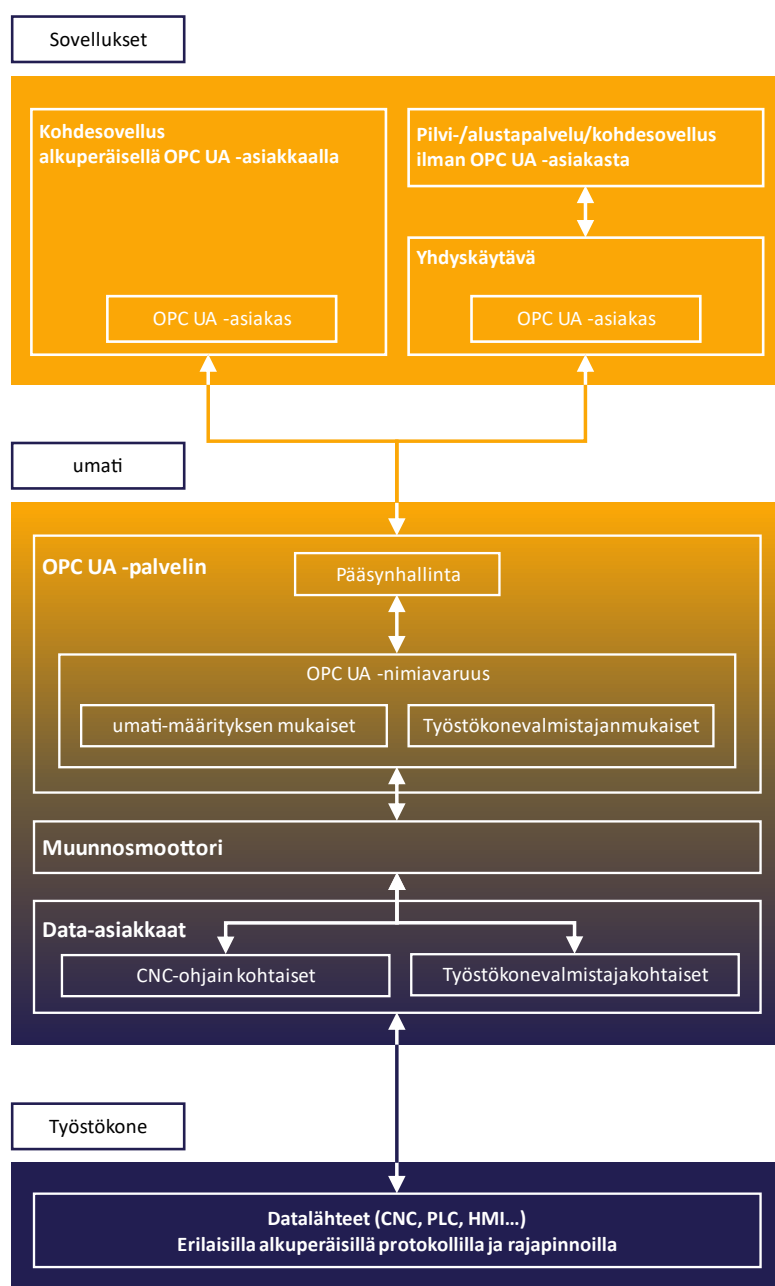
Kuviossa 34 on esimerkki työstökoneiden valvonnasta työstökoneohjainvalmistajien sovel-
luskehitystyökaluja ja kirjastoja sekä OPC UA:ta hyödyntäen. Työstökoneiden kommuni-
kointi voidaan tehdä suoraan CNC-ohjaimeen tai tietoa voidaan kerätä myös esimerkiksi
koneeseen lisätyn mikro-ohjaimen avulla. Laitteiden omat liittynät muutetaan OPC UA
-symboleiksi rajapintasovelluksen avulla, jossa geneeriset OPC UA -symbolit ja -funktiot
muutetaan CNC-ohjaimille sopiviksi. OPC UA -palvelimen välittämiä symboleita ja funkti-
oita voidaan käyttää muissa järjestelmissä samanlaisen rajapinnan kautta, huolimatta ke-
nen valmistamaan työstökoneeseen kommunikoidaan.

7.8.2 umati

CNC-työstökoneiden alalla on lukuisia tiedonsiirtorajapintoja, profiileja ja mekanismeja ko-
neiden integroimiseksi tuotantoverkkoon, niistä löytyy sekä standardoituja, että valmistaja-
kohtaisia ratkaisuja (OPC Foundation, i.a.-b). Tästä syystä syntyi yhteisö nimeltään umati
(universal machine technology interface), joka koostuu koneenrakennusteollisuudesta ja
sen asiakkaista, jotka edistävät ja ottavat käyttöön avoimia, standardoituja OPC UA:han
perustuvia rajapintoja (VDW, i.a.). umatin tarkoituksena on kehittää OPC UA -tietomalli
työstökoneiden universaalille viestintärajapinnalle ulkoisiin järjestelmiin kuten MES, ERP ja
pilvipalveluihin (OPC Foundation, i.a.-b). Rajapinta mahdollistaa työstökoneiden ja lisälait-
teiden liittämisen asiakaskohtaisiin IT-järjestelmiin helposti, turvallisesti ja saumattomasti
(OPC CONNECT, 2018).

umati tähtää pääasiassa asiakkaisiin ja loppukäyttäjiin, mutta toissijaisena tavoitteena on
tehostaa ohjausalojen välistä yhteensopivuutta, luoda horisontaalisia yhteyksiä, valmis-
tua tulevaisuuteen standardoimalla ja käyttämällä avoimia rajapintoja sekä säästää rahaa
ja vaivaa tuotteiden parantamiseksi (umati, i.a.). umati ei ole erillinen OPC UA Companion
-spesifikaatio vaan Companion-määrittely on umatin perusta. Se myös pyrkii tarjoamaan
käyttäjälupauksen ”plug and play” -mahdollisuuden toteutumisiksi koneteollisuuden tuot-
teille. umati perustuu pitkällä tähtäimellä tuotemerkkinä viestimään luottamusta ja luotetta-
vuutta loppuasiakkaille, että he koneenrakentajina huolehtivat siitä, että asiakas saa hel-
posti dataa koneestaan.

umati koostuu OPC UA Companion -määrittysistä, viestinnän oletusvaatimuksista, laatu-
vakuutuksesta sekä markkinointi ja merkinäkyvyydestä (umati, i.a.). Companion-määrittys-
set määrittävät maailmanlaajuisen semantiikan koneille. Viestinnän oletusvaatimukset
asettavat vaatimukset esimerkiksi salaukselle, todennukselle ja palvelinasetuksille, näillä
mahdollistetaan koneiden ja ohjelmistojen liittäminen toisiinsa. Laatuvaruutus toteutuu tes-
taamalla määrittäjiä ja työkaluja, sertifioimalla sekä toimimalla oikeusasiamiehenä tava-
rantoimittajan ja asiakkaan välisissä riita-asioissa. Merkinäkyvyys tulee maailmanlaajui-
sen koneenrakentajien, komponenttitoimittajien ja lisäarvopalveluiden kautta.

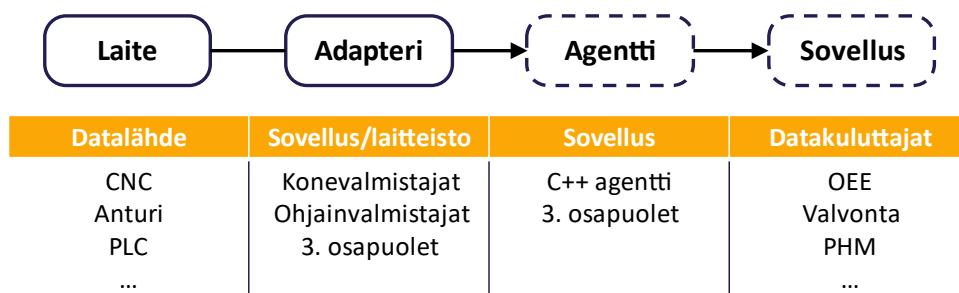


Kuvio 35. umati-järjestelmäpino (perustuu OPC Foundation, i.a.-b).

Kuviossa 35 on kuvattu umatin järjestelmäpino, jossa pohjimmaisena on työstökone, johon kommunikointi kohdistuu. Tiedonsiirto työstökoneelle tapahtuu data-asiakkaan kautta, joka koostuu CNC-ohjain- ja työstökonekohtaisista palveluista. Muunnosmoottori käsittelee tiedot data-asiakkaiden ja OPC UA -palvelimen välillä niin, että kummatkin ymmärtävät toisiaan. OPU UA -palvelin sisältää nimiavaruuden käytettävistä symboleista ja funktioista, sekä pääsynhallinnan näihin. OPC UA -palvelimen jakamat symbolit ovat käytettävissä kaikissa OPC UA -asiakaslaitteissa. Tiedonsiirto on mahdollista niin koneesta muihin järjestelmiin kuin myös muista järjestelmistä koneeseen päin.

7.8.3 MTConnect

MTConnect on datan- ja tiedonvaihtostandardi, joka perustuu valmistustoimintoja kuvaavien termien datasanakirjaan eli tietyntyyppiseen datarakenteeseen (MTConnect, 2021). Standardi määrittelee myös sarjan semanttisia tietomalleja, jotka antavat selkeän ja yksiselitteisen esityksen tietojen liittyvyydestä valmistustoimintaan. Standardi on suunniteltu parantamaan tiedonkeruuta tuotantolaitteista, laajentamaan datalähtöisen päätöksenteon käyttöä tuotantovaiheissa sekä mahdollistamaan ohjelmistosovellusten ja valmistuslaitteiden yhteensovittaminen.



Kuvio 36. MTConnect-kommunikointimalli (perustuu MTConnect, i.a.-a).

Kuviossa 36 on MTConnectilla toteutettu ohjelmistojärjestelmä, joka koostuu neljästä perusmoduulista, joita ovat laite, adapteri, agentti ja asiakassovellus (MTConnect, 2021). Laitteet ovat datan alkuperäisiä lähteitä, standardissa laitteilla tarkoitetaan mitä tahansa aineellista omaisuutta, jota käytetään tuotantolaitoksien toimintojen varustamiseen, esimerkiksi työstökoneet, uunit, anturiyksiköt. Laitteet vaativat ohjelmistoadapterin, joka kääntää laitteen alkuperäisien rekisteri-/datatagien tiedot MTConnect-standardin mukaiseksi (MTConnect, i.a.-a). Agentti on sovellus, joka kerää jaettavat tiedot yhdeltä tai useammalta

laitteelta ja järjestää ne jäsennellysti. Se myös vastaa asiakasohjelmistojärjestelmien tietopyyntöihin antamalla jäsennellyn vastauksen, joka on muodostettu standardin määrittelemien semanttisten tietomallien mukaan (MTConnect, 2021). Agentti voidaan integroida laitteeseen tai se voi olla oma kokonaisuutensa. Asiakassovellukset ovat datan loppukäsittelijöitä, jotka pyytävät dataa agenteilta ja prosessoivat sitä tukemaan valmistusoperaatioita.

Tämänhetkiset MTConnect-toteutukset perustuvat HTTP-siirtoprotokollaan ja XML-koodattuihin semanttisiin datamalleihin (MTConnect, 2021). OPC-säätiö ja MTConnect ovat kuitenkin muodostaneet yhteisen työryhmän yhdistämään suositut OPC UA- ja MTConnect-standardit luodakseen täydellisen teollisuuden yhteensopivuusstandardin (OPC Foundation, i.a.-c). MTConnect-tietomallin soveltaminen OPC UA:han parantaa liitettävyyttä ja yhteensopivuutta merkittävästi moniin suosituihin SCADA-järjestelmiin ja muihin ohjelmistotuotteisiin tehtaalla sekä myös pilvipalveluihin. MTConnect-OPC UA -tietomalli kilpaileekin umati-mallin kanssa (MTConnect, i.a.-b). Kummatkin käsittävät jonkinlaiset määrytykset ja rakenteet, mutta ottavat hiukan erilaisen lähestymistavan omien sidosryhmiensä tarpeiden mukaan.

MTConnect-OPC UA:n suunnittelu suoritetaan pitäen mielessä seuraavat pääseikat: inkrementaalinen käyttöönotto, kehittyminen, kustomointi ja ei-omistusoikeuksellisuus (OPC Foundation, i.a.-c). Inkrementaalinen käyttöönotto vähentää MTConnect-OPC UA:n käyttöönoton estettä, spesifikaation ja lähdekoodin ansiosta. Kehittymisellä tarkoitetaan standardin kehittymistä vaarantamatta yhteensopivuutta vanhempiin versioihin. Laajennettavuuden ansiosta lisäarvoa tuottavien ohjelmistojen ja työkalujen luonti on helppoa, konekohtaisesti tai asennuskohtaisesti vaarantamatta yhteensopivuutta muiden laitteiden tai ohjelmistojen kanssa. Ei-omistusoikeuksellisuus tarkoittaa avoimille standardeille rakentamista. Tätä tukee satoja yrityksiä ja yksityishenkilöitä, valtion organisaatioita ja voittoa tavoittelemattomia organisaatioita edustavat OPC-säätiö ja MTConnect-instituutti.

8 TULOKSET

Tässä työssä saavutettiin työkalutietojen käsittelylle asetetut tavoitteet ja lopputuloksena syntyi valmis kirjasto funktioista, joilla tietoja voidaan lukea ja kirjoittaa työstökoneelle. Työkalutiedoista voidaan käsitellä työkalunumerot, työkalujen kompensointiarvot ja työkalujen käyttöajat. Työkalunumeroiden hallinta mahdollistaa työkalujen osoittamisen tiettyihin paikkoihin, näin voidaan määritellä, mitä työkaluja koneessa on ja missä paikoissa ne sijaitsevat. Työkalujen kompensointiarvojen hallinta mahdollistaa työkalujen kompensointiarvojen siirtämisen koneeseen uutta työkalua lisättäessä, myös vanhat arvot voidaan lukea koneesta. Kompensointiarvot käsittävät geometria- ja kulumatiedot työkalun pituudelle ja säteelle. Työkalujen käyttöaikojen luku ja kirjoitus mahdollistaa työkalujen leikkuuajkojen seurannan. Leikkuuajoista voidaan käsitellä edellisen leikkuun kesto, työkalun kokonaisleikkuu aika ja edellinen leikkuuajankohta.

Työkalumakasiinin ohjauksessakin päästiin tavoitteisiin ja työssä mahdollistettiin makasiinin ohjaus ulkoisesti. Työstökoneen logiikkaohjelmaan lisättiin oma aliohjelma, jossa suoritetaan makasiinin ulkoiseen ohjaukseen liittyvät toiminnot. Aliohjelmassa tarkastellaan lupasignaaleja makasiinin ohjaamiseksi, makasiinin varaaminen ulkoiselle ohjaukselle sekä makasiinin paikoittaminen. Koneen rajapinnaksi muodostui PMC:n sisäiset osoitteet, joiden kautta ohjaussignaaleja siirretään. Osoitteita hyödyntäen luodulla rajapintasovelluksella voidaan ohjata makasiinin paikoitusta myös työstökoneen työstäessä kappaletta. Ulkoinen ohjaus vaikuttaa koneen normaaliin toimintaan vain koneen vaihtaessa työkalua, jolloin kone jää odottamaan makasiinin ohjauksen palaamista takaisin työstökoneelle.

Työstökoneeseen rekisteröitävien työkalunumeroiden määrää saatiin kasvatettua alkupe-
räisestä 99:stä 250:een. Tämä saavutettiin muuttamalla työkalujen muistiosoitteiden koodaus BCD:stä binääriseksi. Koodauksen muutos vaati myös muutoksia koneen PMC-ohjelmaan, sillä numeroiden muunnokset piti jättää pois muistiosoitteiden muutoksen jälkeen.

Täysin käyttövalmista rajapintasovellusta työn aikana ei luotu, sillä työn tekohetkellä ei ollut tiedossa, millä järjestelmällä koko toimintaa tulisi ohjaamaan. Näin ollen päädyttiin vain kirjastofunktioiden luontiin, joita voidaan käyttää myöhemmin ohjausjärjestelmän selvityä. Tehdyt funktiot voidaan integroida esimerkiksi umati- tai MTConnect-rajapintoihin.

9 POHDINTA JA YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli mahdollistaa Tongtai SH-4000P vaakakaraisten työstökoneiden työkaluhallinta. Työkalutiedoille asetettiin tavoitteeksi niiden lukeminen ja kirjoittaminen työstökoneelle ulkoisen sovelluksen avulla. Makasiinin ohjaukselle asetettiin tavoitteeksi sen ohjaus ulkoisesti niin, ettei se aiheuta häiriötä koneen normaalille toiminnalle. Työn aluksi selvitettiin työkalutiedot, joita työn jälkeen pitäisi pystyä käsittelemään. Ennen työn alkua selvittiin myös, että työstökoneen PMC-ohjelman lähdekoodi on muokattavissa.

Työ alkoi työkalutietojen tallennuspaikkojen selvittämisellä työstökoneen muistista. Työkalutietojen löydyttyä luotiin Fanuc FOCAS -kirjastolla funktiot, joilla tietoja voitiin kirjoittaa ja lukea työstökoneesta. Työkalutietojen käsittelyn jälkeen luotiin työstökoneen PMC-ohjelmaan uusi aliohjelma, joka integrointiin koneen muuhun toimintaan, tällä mahdollistettiin koneen makasiinin ulkoinen ohjaus. Työstökoneen muutoksen jälkeen luotiin myös makasiinin ohjaukselle funktiot FOCAS-kirjastolla. Lopputulokseksi saatiin rajapinta koneen ja ulkoisen järjestelmän välille työkalujen hallintaan ja työstökoneen makasiinin ohjaukseen.

Yritys pystyy hyödyntämään luotuja funktioita myöhemmissä järjestelmissä. Huolimatta työstökoneista, joille tämä työ tehtiin, voidaan funktioita käyttää myös muille Fanucin CNC-ohjaimilla varustetuille työstökoneille. Tämä työ oli myös osoitus ulkoisen työkaluhallinnan mahdollistamisesta työstökoneeseen, jossa sellaista ei vakiona ole. Työssä tehtyjen muutosten tekeminen ei tietysti ole mahdollista kaikkiin koneisiin varsinkaan, jos laitevalmistaja on lukinnut lähdekoodit. Työssä tehdyissä muutoksissa työstökoneen toimintaan on mahdollisuus vikoihin muutosten myötä, siksi muutokset vaativat huolellisen testauksen, jotta kolareilta ja muilta ongelmilta säästyttiin.

Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista selvittää rajapintasovelluksen kommunikointitapa muihin järjestelmiin tai toteuttaa funktioiden integrointi osaksi muuta sovelluskokonaisuutta. Kiinnostavaa olisi myös selvittää funktioiden integroiminen osaksi umati- tai MTConnect-rajapintoja, jotka ovat yleistymässä tulevaisuudessa. Integrointi näihin rajapintoihin mahdollistaisi muiden hyödyllisten tietojen yhtäaikaisen luvun työstökoneista yhtä rajapintaa käyttämällä.

JTA Connection FMF -järjestelmä, johon tämä työ liittyy, vaatii tulevaisuudessa rajapinnan laitteiden kommunikointiin. Rajapinta voisi rakentua OPC UA:n ympärille, jolloin voitaisiin käyttää valmiiksi standardoituja rajapintakuvauksia, kuten umati tai MTConnect. Nämä kyseiset rajapintakuvaukset liittyvät nykyisellään pääasiassa työstökoneiden tiedonkeruuseen, mutta tulevaisuudessa ne voivat mahdollistaa paljon muutakin. umati mahdollistaa jo kaksisuuntaisen liikenteen, mutta nykyisellään MTConnect mahdollistaa XML-kuvauksellaan tiedonkeruun vain työstökoneesta muihin järjestelmiin. Tulevaisuudessa MTConnect voi olla kuitenkin yhtä varteenotettava vaihtoehto sen integroitua OPC UA -rajapintaan.

OPC UA tiedonsiirtorajapintana mahdollistaisi monenlaisen tiedon siirtämisen erilaisien laitteiden välillä. OPC UA:n suurin etu on sen riippumattomuus laitteistosta tai alustasta, mikä mahdollistaa rajapinnan luomisen lähes mille laitteelle tahansa. Tiedonsiirtorajapinnan vaadittu nopeus saattaa kuitenkin rajoittaa OPC UA:n käyttöä, sillä se ei ole yhtä nopea verrattuna moneen muuhun kenttäväylään tai tiedonsiirtotapaan. Myös tageihin perustuva kommunikointi voi aiheuttaa joissakin tapauksissa ongelmia.

Tämä selvitystyö tarjoaa mahdollisuuden tulevaisuudessa FMF-järjestelmien työstökonesolujen täysin automaattiseen työkaluhallintaan. Työkalut voitaisiin tuoda soluun työstettävien aihoiden kanssa. Työssä vaaditut työkalut voitaisiin vaihtaa robotilla työstökoneeseen ennen työn aloitusta. Myös työkalujen leikkuuajoista voitaisiin pitää kirjaa, jolloin vältyttäisiin työkalujen kulumisen aiheuttamilta tappioilta. Tällaisen työkaluhallinnan avulla saavutettaisiin entistä joustavampi ja tehokkaampi tuotanto. Lisäksi työ luo pohjaa tulevaisuuden FMF:n kehittämiseksi Älykäs valmistus kappaleessa kuvattua tavoitetta.

Tämä työ oli mielenkiintoinen selvitys ominaisuuksien lisäämisestä jo ajossa oleviin koneisiin, mihin työstökonevalmistaja ei voinut tarjota varmaa ratkaisua ilman suurta hintalapua. Tämän työn jälkeen voidaan näitä toiminnallisuuksia lähteä kehittämään ja integroidaan tuleviin koneenpalvelusoluihin. Työ myös osoitti, että perinteisellä automaatioalan koulutuksella muutoksien tekeminen järjestelmiin, joista ei ollut aikaisempaa kokemusta, on mahdollista.

LÄHTEET

- Abraham, E. (13.12.2016). *BINARY CODED DECIMAL (BCD)*. Computer craft studies. <http://computercrafts.blogspot.com/2016/12/binary-coded-decimal-bcd.html>
- Akrani, G. (18.2.2021). *What are Advantages of Flexible Manufacturing System FMS?* Kalyan City Life. <https://kalyan-city.blogspot.com/2012/02/what-are-advantages-of-flexible.html>
- Aravind, S. (16.2.2019). *Types Of Flexible Manufacturing Systems*. Wrytin. <https://wrytin.com/shreyasaravind/types-of-flexible-manufacturing-systems-js7lhcj6>
- Bolton, W. (2009). *Programmable logic controllers* (5. p.). Newnes.
- BrainKart. (i.a.). *Flexible Manufacturing Systems (FMS) Components*. [https://www.brainkart.com/article/Flexible-Manufacturing-Systems\(FMS\)-Components_6425/](https://www.brainkart.com/article/Flexible-Manufacturing-Systems(FMS)-Components_6425/)
- CNC Machines LLC. (i.a.). *What are CNC Machines?* <https://cncmachines.com/what-is-a-cnc-machine>
- CPV Manufacturing. (i.a.). *Advantages & Disadvantages of Flexible Manufacturing System*. <https://www.cpvvmfg.com/news/advantages-disadvantages-flexible-manufacturing-system/>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayalab, N. F., & Frank, A. G. (2018). *The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Daniel, E., & Kandray, P.E. (2010). *Programmable Automation Technologies*. Industrial Press Inc.
- Evans, K. (2016). *Programming of CNC machines* (4. p.). Industrial P.
- Fanuc. (i.a.). *PMC Programming Manual* (B-64513EN/03). <https://usermanual.wiki/Pdf/ProgrammingManualPMC.2066182799/view>
- Fanuc. (2017). *FOCAS1/2 Library disk (for general)* (A02B-0207-K738).
- Fastems. (2019). *Manufacturing made easier: Flexible Manufacturing System FMS ONE*. https://www.fastems.com/wp-content/uploads/2019/01/FMS-ONE_TechBrochure_A4_EN_WEB.pdf
- Groves, B. (i.a.). *Macro B Programming Manual*. CNC Data. <https://cnctar.hobbycnc.hu/Fanuc/Fanuc%20Macro%20B.pdf>

How To Mechatronics. (i.a.). *G-code Explained | List of Most Important G-code Commands*. <https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>

Inventcom. (16.9.2021). *FOCAS LIBRARY CD | FANUC*. Haettu 28.1.2022, <https://www.inventcom.net/support/fanuc/focas-library-cd>

Inventcom. (10.6.2018-a). *OVERVIEW | GENERAL*. Haettu 28.1.2022, <https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/general/overview>

Inventcom. (10.6.2018-b). *DNC1 | GENERAL* Communication with Ethernet Board. Haettu 28.1.2022, <https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/general/dnc1>

Inventcom. (17.3.2019). *GENERAL | GENERAL*. Haettu 29.1.2022, <https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/general/general#HSSBvsEther>

Inventcom. (10.6.2018-c). *HANDLE | GENERAL*. Haettu 29.1.2022, <https://www.inventcom.net/fanuc-focas-library/general/handle>

JTA Connection Oy. (i.a.). *Kokonaisvaltainen automaatiokumppani*. Haettu 11.10.2021, <https://www.jtaconnection.fi/>

Khan, G. M., Shah, M. F., Farooq, S. S., & Hammad, S. M. (2020). *Implementation Of Flexible Manufacturing System (FMS) And Its Quantitative Analysis For Pump Industries*. IJSTR. <https://www.ijstr.org/final-print/mar2020/Implementation-Of-Flexible-Manufacturing-Systemfms-And-Its-Quantitative-Analysis-For-Pump-Industries.pdf>

Kief, H. B., Roschiwal, H. A., & Schwarz, K. (2022). *CNC Handbook*. Industrial Press Inc.

Martins, A., Lucas, J., Costelha, H., & Neves, C. (2021). *Developing an OPC UA Server for CNC Machines*. Procedia Computer Science <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.276>

Mazak. (i.a.). *AUTOMATION What is PALLETECH?* <https://www.mazakusa.com/machines/process/automation/>

Monroe. (10.2.2017). *What is a Flexible Manufacturing System?* <https://monroeengineering.com/blog/what-is-a-flexible-manufacturing-system/>

MTConnect. (i.a.-a). *Getting Started*. <https://www.mtconnect.org/getting-started>

MTConnect. (i.a.-b). *UMATI Companion Specification*. <https://www.mtconnect.org/umati>

MTConnect. (6.9.2021). *MTConnect® Standard: Part 1.0 – Overview and Fundamentals Version 1.8.0*. <https://www.mtconnect.org/standard20181>

- OPC CONNECT. (2018). *umati: Based on OPC UA: umati: universal machine tool interface*. OPC Foundation. <https://opconnect.opcfoundation.org/2018/10/umati-based-on-opc-ua/>
- OPC Foundation. (i.a.-a). *Unified Architecture*. <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>
- OPC Foundation. (i.a.-b). *vdw-umati: umati – universal machine tool interface OPC UA Companion Specification for machine tools and manufacturing systems to external communication partners*. <https://opcfoundation.org/markets-collaboration/umati/>
- OPC Foundation. (i.a.-c). *MTConnect: Semantic data and contextual models for factory floor devices*. <https://opcfoundation.org/markets-collaboration/mtconnect/>
- Ortiz, J. H., Marroquin, W. G., & Cifuentes, L. Z. (2020). *Industry 4.0: Current Status and Future Trends*. Teoksessa J. H. Ortiz, *Industry 4.0 - Current Status and Future Trends*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90396>
- Rekers, S. (2019). *Correction of Systematic Errors in Piezoelectric Cutting Force Measurement*. Apprimus Wissenschaftsverlag.
- Shivanand, H. K., Benal, M. M., & Koti, V. (2006). *Flexible manufacturing system*. New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Shrivastava, M., Dubey, T., & Sharma, V. (2013). *Productivity enhancement of knuckle joint using – flexible manufacturing system (a case study)*. TJPRC Pvt. Ltd. <http://www.tjprc.org/publishpapers/2-67-1362467922-26.Productivity.full.pdf>
- Shenchong. (3.8.2021). Definition: *What is a Flexible Manufacturing System (FMS) | Update 2022*. Haettu 5.3.2022, <https://www.shenchong.com/blogs/flexible-manufacturing-system-definition-advantage/#What-is-the-advantage-of-flexible-manufacturing-systems>
- Sinha, S., K., (2010). *CNC Programming Using Fanuc Custom Macro B*. McGraw Hill.
- ST-Koneistus Oy. (i.a.-a). *Jo 50 vuotta työtä hydraulikan parissa!* Haettu 16.3.2022, <https://www.st-koneistus.fi/st-koneistus-oy-yrityksena/>
- ST-Koneistus Oy. (i.a.-b). *Laadukkaat tuotantotilat ja monipuolinen konekanta*. Haettu 16.3.2022, <https://www.st-koneistus.fi/tuotanto-ja-konekanta/>
- Thomas Publishing Company. (i.a.). *What is CNC Machining? | Definition, Processes, Components & More*. <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/understanding-cnc-machining/>
- umati. (i.a.). *About*. <https://umati.org/about/>

VDW. (i.a.). *umati: universal machine technology interface*. <https://vdw.de/en/technology-and-standardisation/umati-universal-machine-technology-interface/>

Vesamäki, H. (2014). *Lastuavan työstön NC-ohjelmointi*. Teknologiainfo Teknova Oy.

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S., T. (2017). *Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review*. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>