

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Славенко М. Стојадиновић

**ИНТЕЛИГЕНТНИ КОНЦЕПТ ПЛАНИРАЊА
ИНСПЕКЦИЈЕ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА
НА МЕРНОЈ МАШИНИ**

докторска дисертација

Београд, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Slavenko M. Stojadinovic

**INTELLIGENT CONCEPT FOR THE
INSPECTION PLANNING OF PRISMATIC
PARTS ON MEASURING MACHINE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: др Видосав Мајсторовић, редовни професор,
Машински факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије: др Бојан Бабић, редовни професор,
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Мирослав Трајановић, редовни професор,
Машински факултет, Универзитет у Нишу

др Радован Пузовић, ванредни професор,
Машински факултет, Универзитет у Београду

др Саша Живановић, ванредни професор,
Машински факултет, Универзитет у Београду

Датум одбране:

Предговор

Докторска дисертација је резултат вишегодишњег истраживачког рада у домену производне метрологије и мерних машина. Неограничену захвалност на доприносу да ова докторска дисертација угледа светлост дана дугујем следећим институцијама и појединцима:

Проф. др Нуману Дуракбаси на указаном поверењу, гостопримству током посете и саветима током извођења експеримента.

Ментору, Проф. др Видосаву Мајсторовићу на омогућеној студијској посети Техничком Универзитету у Бечу, његовој свестраној помоћи и усмеравању током израде дисертације као и поверењу које ми је указао, пружајући ми пуну слободу у развоју интелигентног концепта инспекције.

Министарству просвете, науке и технолошког развоја, Републике Србије на финансијској помоћи у својству стипендисте докторанта и кроз учешће на пројектима које је финансирало.

Фонду за младе таленте и Хемофарм фондацији на стипендијама на Дипломским студијама, које су олакшале и обезбедиле моје даље научно усавршавање.

Члановима комисије, Проф. др Бојану Бабићу, Проф. др Мирославу Трајановићу, Проф. др Радовану Пузовићу, и Проф. др Саши Живановићу на корисним сугестијама и саветима.

Институту за Производно машинство и ласерску технологију у Бечу и особљу института на стрпљењу показаном током студијске посете, а посебно при мерењу експерименталних делова на мерној машини.

Аустријској служби за академску размену (OeAD) на финансијској помоћи и упознавању дела Аустријског културног наслеђа током студијске посете.

Највећу захвалност дугујем својој породици због њихове неизмерне љубави, вере и наде пружене у најтежим тренуцима која би ме изнова погонила и умивала од напорног рада и одрицања и давала снагу да истрајем.

У Београду, јануар 2016.

Славенко М. Стојадиновић

Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини

Апстракт

Предмет истраживања у овој дисертацији је интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини. Истраживања су спроведена кроз развој два главна елемента, а то су модел планирања инспекције призматичних делова на *NUMM* и модел оптимизације мерне путање на бази колоније мрава. Развијени модел планирања инспекције призматичних делова на *NUMM* се састоји из моделирање примитива за инспекцију, дистрибуције мерних тачака, анализе приступачности мерног сензора, принципа избегавања колизије и планирања путање мерног сензора. У моделу је симулирана путања мерног пипка и то на основу три алгорита: алгорита за дистрибуцију мерних тачака, алгорита за избегавање колизије и алгорита за планирање путање мерног сензора. Излаз из симулације је мерни протокол за мерну машину *ZEISS UMM500*. Експеримент је извршен на два тест призматична дела наменски произведена за потребе ових истраживања. Резултати инспекције показују да су све толеранције оба тест дела у прописаним границама. Представљени модел је један нов приступ аутоматској инспекцији и основа за развој интегрисног интелигентног концепта планирања инспекције. Предност овог прилаза се огледа у смањењу времена припреме мерења на основу аутоматског генерисања протокола мерења, могућности за оптимизацију путање мерног пипка тј. смањењу времена мерења и анализи постављања дела, као и аутоматском конфигурисању мерних пипака. Модел оптимизације је базиран на математичком моделу који дефинише иницијалну путању престављену скупом тачака са дефинисаним редоследом за пролазак пипка без колизије и решењу *TSP* применом колоније мрава. За решење *TSP* примењен је *AS* алгоритам кретања колоније мрава за проналажење најкраћег пута тј. оптимизоване путање. Оптимизована путања је поређена са оствареном путањом при *on-line* програмирању мерне машине *ZEISS UMM 500* и мерном путањом добијеном у модулу за инспекцију на *NUMM* у софтверу *Pro/ENGINEER*. Резултати поређења оптимизоване путање и *on-*

line програмиране путање показују минимум 20 % мање вредности дужине оптимизоване путање, док у поређењу са *Pro/ENGINEER* путањом, показује минимум 10 % мање вредности дужине оптимизоване путање.

Кључне речи: *NUMM*, планирање инспекције, призматични делови, планирање мерне путање, оптимизација на бази колоније мрава, инжењерска онтологија, база знања, системи планирања инспекције базирани на примитивима

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Производно машинство

УДК: 62-53:004.896(043.3)

Intelligent concept for the inspection planning of prismatic parts on measuring machines

Abstract

The subject of research in this dissertation is intelligent concept for the inspection planning of prismatic parts on measuring machines. The researches are conducted through the development of two main elements, and those are model of inspection planning prismatic parts on CMMs and optimisation model of the measuring path based on ants colony. The developed model of inspection planning on CMMs is composed of inspection feature construction, sampling strategy, probe accessibility analysis, automated collision-free generation, and probe path planning. In this model, the simulation of a measuring probe path is based on three algorithms: algorithm for measurement points distribution, algorithm for collision avoidance, and algorithm for probe path planning. The simulation output is a measuring protocol for CMM ZEISS UMM500. An experiment was performed on two parts that have been produced for the purpose of this research. The inspection results show that all tolerances for both parts are within the specified limits. The proposed model presents a novel approach for the automatic inspection and a basis for the development of an integrated, intelligent concept of inspection planning. The advantages of this approach imply the reduction of preparation time due to an automatic generation of a measuring protocol, a possibility for the optimisation of measuring probe path, i.e. the reduction of a time needed for the actual measurement and analysis of a workpiece, and an automatic configuration of measuring probes. The optimisation model is based on the mathematical model that establishes an initial collision-free path presented by the set of points, and the solution of travelling salesman problem (TSP) obtained by ants colony. In order to solve TSP, AS algorithm that aims to find the shortest path of ant colony movement (i.e. the optimised path) is applied. Then, the optimised path is compared with the measuring path obtained by on-line programming on CMM ZEISS UMM500 and with the measuring path obtained in CMM module for inspection in Pro/ENGINEER software. Results of a comparison between the optimised path and the other two generated paths show that the optimised path is at least 20 % shorter than the path obtained by on-line

programming on CMM ZEISS UMM500, and at least 10 % shorter than the path obtained using CMM module in Pro/ENGINEER.

Key words: CMM, inspection planning, prismatic parts, path planning, ant colony optimisation, engineering ontology, knowledge base, feature-based inspection systems

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Production engineering

UDC: 62-53:004.896(043.3)

Садржај

1	УВОД	1
2	ПРЕГЛЕД СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ПЛАНИРАЊА ИНСПЕКЦИЈЕ НА МЕРНИМ МАШИНАМА	12
2.1	Уводне напомене	12
2.2	Модел мерног система на бази NUMM	13
2.3	Развој NUMM	15
2.3.1	Софтвери за NUMM	16
2.4	Развој планирања инспекције на NUMM	17
2.5	Метролошка интероперабилност	22
2.5.1	Проблем метролошке интероперабилности	24
2.5.2	Пројектни тим за метролошку интероперабилност	26
2.6	Поставка проблема истраживања	28
3	ОНТОЛОШКА БАЗА ЗНАЊА	33
3.1	Уводне напомене	33
3.2	Развој инжењерске онтологије за домен координатне метрологије	34
3.2.1	Методологије развоја инжењерских онтологија	35
3.2.2	Поређење традиционалних и нових приступа	37
3.2.3	Предложени метод развоја инжењерске онтологије	37
3.2.4	Пример имплементација метода	41
3.2.5	Имплементација у софтверу Protégé	43
3.3	Изградња модела базе знања за планирање инспекције призматичних делова на NUMM	44

3.3.1	Модел базе знања	45
3.3.2	Експериментални пример	48
3.4	Закључне напомене	56
4	РАЗВИЈЕНИ МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ИНСПЕКЦИЈЕ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ	58
4.1	Уводне напомене	58
4.2	Математички модел	61
4.3	Моделирање примитива за инспекцију	64
4.4	Дистрибуција мерних тачака	66
4.5	Анализа приступачности мерног сензора	72
4.6	Избегавање колизије	75
4.7	Планирање путање мерног сензора	78
5	ОПТИМИЗАЦИЈА ПЛАНИРАНЕ МЕРНЕ ПУТАЊЕ ПРИМЕНОМ ОПТИМИЗАЦИОНОГ АЛГОРИТМА НА БАЗИ КОЛОНИЈЕ МРАВА	80
5.1	Уводне напомене	80
5.2	Модел потребних података за оптимизацију	82
5.2.1	Модел примитива	84
5.2.2	Обрада радног предмета	85
5.2.3	NUMM on-line мерна путања	86
5.2.4	Генерисање мерне путање уз помоћ софтвера	87
5.3	Математички модел за оптимизацију	87
5.4	Модел оптимизације применом колоније мрава	90
5.4.1	Проблем трговачког путника	93
5.4.2	АСО алгоритам за TSP	93
5.4.3	Генерисање путање колоније мрава	94
5.4.4	Ажурирање феромонских путања	95
5.5	Резултати оптимизације	96
5.6	Закључне напомене	99
6	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА ПЛАНИРАЊА ИНСПЕКЦИЈЕ И РЕЗУЛТАТИ	101

6.1	Уводне напомене	101
6.2	Симулација путање мерног пипка	101
6.2.1	Алгоритам за дистрибуцију мерних тачака (ADMT)	102
6.2.2	Алгоритам за избегавање колизије (AIK)	105
6.2.3	Алгоритам за планирање путање мерног сензора (APP)	108
6.2.4	Генерисање мерног протокола и управљачке листе података	109
6.3	План експеримента	110
6.3.1	Пројектовање делова	110
6.3.2	Обрада делова	113
6.3.3	Калибрација машине ZEISS UMM 500 према ISO 10360-2	113
6.3.4	План инспекције делова	115
6.4	Кратак осврт на лабораторију	118
6.5	Инспекција делова	119
6.6	Резултати мерења	121
7	ЗАКЉУЧАК	124
8	БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА	130
9	ЛИТЕРАТУРА	131

Списак слика

2.1	Шема основног модела мерног система	13
2.2	IDEF0 модел димензионалног метролошког система [3]	14
2.3	IDEF0 дијаграм активности мерног процеса [3]	15
2.4	Модел планирања инспекције [22]	17
2.5	Предвиђање оствариве тачности обраде по Taniguchi-ју [48]	18
2.6	Једна операција инспекције на NUMM [61]	19
2.7	Алгоритам планера инспекције на NUMM [62]	19
2.8	Једна управљачка хијерархија инспекције [73]	20
2.9	Шема "on – machining" мерења [106, 107]	21
2.10	Оквир планирања инспекције према [108, 109]	21
2.11	Интероперабилне препреке између комерцијалних софтверских система у димензионалној метрологији [3]	23
2.12	Тренутно стање проблема интероперабилности у димензионој метрологији [3]	25
2.13	Будућа визија димензионог метролошког система [3]	26
2.14	Дефинисање информација о толеранцијама према GD & T [3]	29
2.15	EXPRESS-G дијаграм метролошких примитива [3]	31
3.1	Инжењерска онтологија и процес развоја инжењерског лексикона [134]	36
3.2	Један пример представљања класа, особина и индивидуа	38
3.3	Илустрација метода развоја инжењерске онтологије	38
3.4	Три приступа за креирање хијерархије класа	40
3.5	Таксономија [143]	40

3.6	Један пример имплементације класа, особина и индивидуа	42
3.7	Представљање примитива као индивидуа у софтверу Protégé	43
3.8	Граф базе знања [152]	45
3.9	Елементи за изградњу модела базе знања за инспекцију призматичних делова на NUMM	47
3.10	Граф базе знања и илустрација његове декомпозиције на простијем CAD моделу дела	48
3.11	Правила за декомпозицију графа базе знања у софтверу Protégé	50
3.12	Део IGES датотеке цилиндра као геометријског примитива	52
3.13	Реалан метролошки део	53
3.14	Декомпозиција реалног метролошког дела на метролошке примитиве	54
3.15	Правци приступа мерног сензора за троосну NUMM	55
4.1	Интелигентни концепт инспекције PD на NUMM	60
4.2	Математички модел планирања инспекције PD на NUMM	61
4.3	Базни геометријски примитиви и њихови параметри: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; ђ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера	65
4.4	Дистрибуција мерних тачака: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; ђ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера.	71
4.5	Принцип генерисања тачака P_{i1} и P_{i2} на основу тачака P_i : а) конкавна цилиндрична површина; б) конвексна цилиндрична површина; в) равна површина.	72
4.6	Дистрибуција тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_i(x_i, y_i, z_i)$ на основу $P_i(x_i, y_i, z_i)$: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; ђ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера.	74
4.7	Принцип избегавања колизије при кретању пипка са једног примитива на други	76
4.8	Пресек дужи и троугла	77
5.1	Модел података	83

5.2	Обрада радног предмета	85
5.3	Експериментална поставка мерења PD	86
5.4	Прозор инспекције у Pro/ENGINEER-у за зарубљену полусферу са CL фајлом	88
5.5	Приказ три зоне колизије за три карактеристична случаја површина примитива	89
5.6	Приказ могуће или потенцијалне путање колоније мрава за три карактеристична случаја површина примитива	92
5.7	Упрошћен приказ кретања колоније мрава унутар графа G	94
5.8	Резултати поређења дужина трију путања за геометријске примитиве: а) раван, б) круг, ц) зарубљена полусфера, д) цилиндар, е) зарубљени конус	97
6.1	Процедура ADMT дистрибуције мерних тачака	102
6.2	Процедура KEYWORD дистрибуције мерних тачака	104
6.3	Алгоритам за избегавање колизије	106
6.4	Процедура планирања путање мерног сензора	108
6.5	Део управљачке листе података радног дела бр. 1	109
6.6	Радионички цртеж мерног дела бр.1	111
6.7	Радионички цртеж мерног дела бр.2	112
6.8	Обрада делова на обрадном центру LOLA НМС 500: а) и б) захвати грубе и fine обраде глодањем полусфере лоптастим глодалом пречника $\phi 18$ [mm]; в) израдак једноставнијег PD; г) израдак сложенијег PD.	113
6.9	Артефакт за калибрацију мерне машине	114
6.10	Део резултата мерења артефакта	115
6.11	Припрема за мерење дела бр.1	116
6.12	Припрема за мерење дела бр.2	117
6.13	Нанометролошка лабораторији за високо прецизна мерења	118
6.14	Експериментална инсталација за мерење дела бр.1	120
6.15	Експериментална инсталација за мерење дела бр.2	120

Списак табела

3.1	Екстракција параметара из IGES датотеке	51
3.2	Израчунавање параметара	52
4.1	Параметри примитива	66
5.1	Резултати поређења три врсте мерних путања	99
6.1	Тестирани облици толеранција	110
6.2	Техничке карактеристике лабораторије [181]	119
6.3	Техничке карактеристике NUMM	121
6.4	Резултати мерења тест делова	122
6.5	Резултати поређења	123

Номенклатура

Ознака	ЈМ	Опис
a	[mm]	Ширина примитива
α_1		Угао између дужи $\overline{T_1P_j}$ и стране $\overline{T_1T_2}$ троугла $\Delta T_1T_2T_3$
α, β, γ		Унутрашњи углови троугла
b	[mm]	Дужина примитива
β_1		Угао између дужи $\overline{T_2P_j}$ и стране $\overline{T_1T_2}$ троугла $\Delta T_1T_2T_3$
c		Вектор корекције (повезује центар сфере пипка и мерну тачку)
D	[mm]	Већи пречник примитива
D_1	[mm]	Мањи пречник примитива
D_{tot}		Укупан пређени пут мерног пипка (сензора) приликом мерења N -тачака
d_1	[mm]	Пут спорог хода
d_2	[mm]	Пут брзог хода
d_m	[mm]	Дужина ручно програмиране мерне путање
d_s	[mm]	Дужина мерне путање генерисане софтвером
d_o	[mm]	Дужина оптимизоване мерне путање применом ACO
d_{ij}		Растојање између градова i и j код TSP
δ	[mm]	Параметар корекције
$\Delta\tau_{ij}^k$		Износ положених феромона мрва k у гранама које је посетио
η_{ij}		Хеуристичку тежња одласка из града i директно у град j
$f(\pi)$		Растојање $Hamilton$ -овом циркулацијом графа
γ_1		Угао између дужи $\overline{T_3P_j}$ и стране $\overline{T_2T_3}$ троугла $\Delta T_1T_2T_3$
H	[mm]	Висина примитива

Ознака	ЈМ	Опис
H_1	[mm]	Висина сегмента примитива
I_1	%	Унапређење путање дефинисане моделом у односу на софтверску путању
I_2	%	Унапређење путање дефинисане моделом у односу на ручно програмирану мерну путању
I_s	%	Унапређење оптимизоване у односу на софтверску путању
I_m	%	Унапређење оптимизоване у односу на ручно програмирану мерну путању
\mathbf{n}		Вектор нормале примитива
\mathbf{n}_p		Вектор пуноће примитива
P_i		Мерна тачка
$P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$		Тачка прелаза из брзог у спори ход мерног сензора и њене координате
$P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$		Почетак брзог хода мерног сензора и његове координате
$P_{(N_{F1})1}$		Последња тачка за инспекцију предходног примитива
$P_{(N_{F2})1}$		Прва тачка за инспекцију наредног примитива
P_j		Пресечна тачка између дужи $\overline{P_{(N_{F1})1}P_{(N_{F2})1}}$ и троугла $\Delta T_1T_2T_3$
p		Права која садржи тачке $P_{(N_{F1})1}$ и $P_{(N_{F2})1}$
p_{ij}^k		Вероватноћа са којом мрав k , тренутно позициониран у тачки i , бира одлазак у тачку j
${}^M\mathbf{r}_{P_i}$		Вектор положаја мерне тачке у KS мерне машине
${}^M\mathbf{r}_W$		Вектор положаја KS мерног предмета у KS мерне машине
${}^W\mathbf{r}_{P_i}$		Вектор положаја мерне тачке у KS мерног предмета
${}^W\mathbf{r}_F$		Вектор положаја метролошког примитива у KS мерног предмета

Ознака	ЈМ	Опис
${}^F\mathbf{r}_{P_i}$		Вектор положаја мерне тачке у KS метролошког примитива
${}^M\mathbf{r}_F$		Вектор положаја метролошког примитива у KS мерне машине
${}^M\mathbf{r}_P$		Вектор положаја KS мерног сензора
${}^P\mathbf{r}_{P_i}$		Вектор положаја мерне тачке у KS мерног сензора
s_i, t_i, w_i	[mm]	Координате i - те мерне тачке по x, y и z -оси респективно у Декартовом KS
ρ		Стопа феромонске евапорације
s'_i, t'_i, w'_i	[mm]	Координате i - те мерне тачке по r, φ и z -оси респективно у поларно-цилиндричном KS
${}^W_F T$		Хомогена матрица трансформације која дефинише положај и оријентацију примитива у односу на KS радног предмета
${}^M_W T$		Хомогена матрица трансформације која дефинише положај и оријентацију радног предмета у односу на KS машине
${}^M_F T$		Хомогена матрица трансформације која дефинише положај и оријентацију примитива у односу на KS машине
τ_{ij}		Тежња посете граду j директно после посете граду i

Списак акронима

AC	<u>A</u> nts <u>C</u> olony
ACO	<u>A</u> nts <u>C</u> olony <u>O</u> ptimization
ADMT	<u>А</u> лгоритам за <u>Д</u> истрибуцију <u>М</u> ерних <u>Т</u> ачака
AIAG	<u>A</u> utomotive <u>I</u> ndustry <u>A</u> ction <u>G</u> roup
AI	<u>A</u> rtificial <u>I</u> ntelligence
AIK	<u>А</u> лгоритам за <u>И</u> збегавање <u>К</u> олизije
AS	<u>A</u> nts за <u>S</u> ystem
APP	<u>А</u> лгоритам за <u>П</u> ланирање <u>П</u> утање
AP	<u>A</u> pplication <u>P</u> rotocol
APMS	<u>А</u> нализа <u>П</u> риступачности <u>М</u> ерног <u>С</u> ензора
ARM	<u>A</u> pplication <u>R</u> eference <u>M</u> odel
BR	<u>B</u> oundary <u>R</u> epresentation
CAD	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>D</u> esign
CAM	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>M</u> anufacturing
CAI	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>I</u> nspection
CAIPP	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>I</u> nspection <u>P</u> rocess <u>P</u> lanning
CAPP	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>P</u> rocess <u>P</u> lanning
CBR	<u>C</u> ase <u>B</u> ased <u>R</u> easoning
CL	<u>C</u> utter <u>L</u> ocation
CNC	<u>C</u> omputer <u>N</u> umerical <u>C</u> ontrol
DMT	<u>Д</u> истрибуција <u>М</u> ерних <u>Т</u> ачака
ES	<u>Е</u> кспертни <u>С</u> истем
EWEDS	<u>E</u> nhanced <u>w</u> ing <u>E</u> d <u>D</u> ata <u>S</u> tructures
FBS	<u>F</u> eature <u>B</u> ased <u>S</u> ystems
GA	<u>G</u> enetic <u>A</u> lgorithm
GD&T	<u>G</u> eometric <u>D</u> imensioning and <u>T</u> olerancing
GPS	<u>G</u> eometrical <u>P</u> roduct <u>S</u> pecifications
HIPP	<u>H</u> igh-level <u>I</u> nspection <u>P</u> rocess <u>P</u> lanning
HPMR	<u>H</u> igh <u>P</u> recision <u>M</u> easurement <u>R</u> oom
IDEF	<u>I</u> ntegrated <u>D</u> E <u>F</u> inition
IGES	<u>I</u> nitial <u>G</u> raphics <u>E</u> xchange <u>S</u> pecification

IK	<u>И</u> збегавање <u>К</u> олизије
IMEKO	<u>I</u> nternational <u>M</u> Easurement <u>C</u> onfederation
IPIM	<u>I</u> ntegrated <u>P</u> roduct <u>I</u> nformation <u>M</u> odel
ISO	<u>I</u> nternational <u>O</u> rganization for <u>S</u> tandardization
KS	<u>К</u> оординатни <u>С</u> истем
MPI	<u>М</u> одел <u>П</u> ланирања <u>И</u> нспекције
MPT	<u>M</u> etrology <u>P</u> roject <u>T</u> eam
NN	<u>N</u> eural <u>N</u> etwork
NIST	<u>N</u> ational <u>I</u> nstitute for <u>S</u> tandards and <u>T</u> echnology
NUMA	<u>Н</u> умерички <u>У</u> прављана <u>М</u> ашина <u>А</u> латка
NUMM	<u>Н</u> умерички <u>У</u> прављана <u>М</u> ерна <u>М</u> ашина
PD	<u>П</u> ризматичан <u>Д</u> ео
PLM	<u>P</u> roduct <u>L</u> ifecycle <u>M</u> anagement
PMI	<u>P</u> roduct <u>M</u> anufacturing <u>I</u> nformation
PPMS	<u>П</u> ланирање <u>П</u> утање <u>М</u> ерног <u>С</u> ензора
RMSE	<u>R</u> oot <u>M</u> ean <u>S</u> quare <u>E</u> rror
RTM	<u>R</u> obot <u>T</u> ime and <u>M</u> otion
SAD	<u>С</u> једињене <u>А</u> меричке <u>Д</u> ржаве
SAT	<u>S</u> tandard <u>A</u> cis <u>T</u> ext
SPP	<u>С</u> мер <u>П</u> реступа <u>П</u> ипка
ST	<u>S</u> warm <u>T</u> heory
STL	<u>S</u> Tereo <u>L</u> ithography
STEP	<u>S</u> tandard for the <u>E</u> xchange of <u>P</u> roduct Model Data
NC	<u>N</u> umerical <u>C</u> ontrol
TC	<u>T</u> echnical <u>C</u> ommittee
TF	Толеранција облика
TL	Толеранција дужине
TLC	Толеранција локације
TO	Толеранција положаја
TOVE	<u>T</u> Oronto <u>V</u> irtual <u>E</u> nterprise
TSP	<u>T</u> raveling <u>S</u> alesman <u>P</u> roblem
WEB	World Wide <u>W</u> EB

1 УВОД

Развој интелигентних система за планирање инспекције је императив и предуслов за развој нове генерације технолошких система и дигиталног квалитета заснованог на глобалном интероперабилном моделу производа. Интероперабилни модел интегрише *CAD-CAM-CAI* информације у дигиталном окружењу и представља основу за виртуелну симулацију и планирање инспекције на бази знања за призматичне делове на нумерички управљаним мерним машинама (*NUMM*).

Истраживања која су спроведена у оквиру дисертације се односе на област планирања инспекције метролошки комплексних призматичних делова на *NUMM*. У ширем смислу истраживања су усмерена на развој глобалног и локалног плана инспекције призматичних делова на *NUMM*. У ужем смислу истраживања обухватају одређивање редоследа инспекције метролошких примитива, одређивање броја и позиције мерних тачака, као и оптималне путање мерног сензора.

Призматични делови су значајна група машинских делова јако заступљена у индустрији још од најранијих фаза производње карактеристична по томе што се састоји из основних геометријских примитива као што су раван, цилиндар, конус итд. Са метролошког аспекта у ову класу делова спадају и делови са слободним површинама чија инспекција се не захтева, а присутне су из естетских или неких других разлога. Ова група делова присутна је готово у свим типовима производње. У фокусу ових истраживања су делови средње и повишене тачности.

NUMM је базни елемент флексибилне аутоматизације у производној метрологији и представља незаобилазан фактор у инспекцији призматичних

делова. Интезивна истраживања која се данас спроводе, односе се на решавање проблема интелигентног планирања инспекције на *NUMM*, као предуслова за развој интелигентних мерних машина, с једне стране, и смањење времена мерења с обзиром на данас све више изражену геометријску и функционалну варијантност производа.

Инспекција на мерној машини је базирана на комплексној софтверској подршци за различите класе метролошких задатака (толеранција). Спровођење униформног плана инспекције на њима представља специјални проблем, који зависи од метролошке комплексности призматичних делова, интуиције и искуственог знања оног ко планира инспекцију. Елиминација интуиције, представљање, поновна употреба и дељење знања кроз развој интелигентног концепта планирања инспекције способног да у датом тренутку донесе одлуку, представља решење наведеног проблема. При развоју интелигентног концепта акценат је на генерисању оптималне путање мерног сензора као фундаменталног дела инспекције призматичних делова. У општем смислу концепт обухвата:

- развој онтолошке базе знања кроз дефинисање ентитета и правила на основу којих ће се она претраживати у циљу припреме геометријских информација и њиховог повезивања и интеграције са стандардним облицима толеранција посредно, увођењем метролошких примитива и њиховог свођења на геометријске примитиве.
- развој глобалног плана инспекције у којем се дефинише оптимална секвенца инспекције метролошких примитива кроз анализу приступачности мерног сензора и груписање примитива по правцима приступа.
- развој локалног плана инспекције који ће генерисати број и позицију мерних тачака тј. њихову дистрибуцију за све метролошке примитиве и оптималну путању мерног сензора за тако дистрибуиране тачке.

Актуелност планираних истраживања се огледа у неколико истраживачких тема које се односе на: метролошку интероперабилност, интелигентну производну метрологију и дигиталне технолошке системе.

Значај покретања истраживања и мотивација је у оствареним резултатима у оквиру истраживачких пројеката покренутих у Сједињеним Америчким Државама (*SAD*) од стране Националног института за стандарде и технологију (*National Institute for Standards and Tehnology - NIST, Automotive Industry Action Group - AIAG, Metrology Project Team - MPT*) и водећих Европских метролошких лабораторија (*Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology Lab., Lehrstuhl fur Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik*), као и *IMEKO* конфедерације [1]. Истраживања се односе на развој интелигентног концепта планирања инспекције призматичних делова у циљу смањења укупног времена мерења на *NUMM* кроз смањење компоненте времена потребног за планирање инспекције. Сва ово истраживања имају за циљ да организују и ефикасно користе знања (искуствена, интуитивна) и закључивања на основу њих, а ради спровођења униформног плана инспекције с обзиром на релативно високу метролошку комплексност и варијантност производа.

Круцијални проблем у планирању инспекције призматичних делова је повезивање толерисаних мера призматичних делова са основним геометријским примитивима према *GD&T (Geometric and Dimensional Tolerancing)*, *PMI (Product Manufacturing Information)*, *IPIM (Integrated Product Information Model)* и премошћавање јаза између парцијално успешно развијена два приступа, геометријског и толеранцијског, за развој система компјутером подржаног планирања процеса инспекције (*Computer Aided Inspection Process Planning - CAIPP*). Један од првих корака у развоју интелигентног концепта инспекције је интеграција геометрије и толеранција призматичних делова који заједно учествују у планирању инспекције. Да би се то остварило неопходно је развити базу знања, која даје одговор на питање који геометријски примитив учествује у креирању које толеранције односно модел генерисања мерне путање без колизије на основу дефинисане везе геометрије и толеранција дате базом знања. Геометрија дела се тако замењује скупом тачака или *point – to – point* мерном путањом при чему путања одговара инспекцији задатих толеранција призматичних делова. Који од примитива или групе примитива ће бити мерен и када, такође је отворен проблем чије решење

даје оптималну путању мерног сензора и успоставља везу између идеалне и реалне геометрије призматичних делова са метролошког аспекта. Истраживања у овој дисертацији представљају покушај да се реше предходно наведена два проблема у циљу реализације дуго очекиваног концепта интелигентног планирања инспекције призматичних делова на *NUMM*.

Појам интелигентног се у литератури може дефинисати на два начина. Први начин је дефинисање архитектуре интелигентног система, који између осталог садржи сензорске информације као последица интеракције система са околином. Такав пример је подстицао и развијао аутор *J.S Albus* у [2]. Другу начин, такође заступљен у литератури, се односи на примену неког од алата вештачке интелигенције, *Artificial Intelligence (AI)*, у контексту повећања аутономности ситема, оптимизације итд. Интелигентни концепт планирања инспекције у овој дисертацији се огледа у примени алата *AI* као што су инжењерска онтологија и колонија мрава. Инжењерска онтологија се користи за моделирање онтолошке структуре у циљу дефинисања веза између толерисаних мера (задатих толеранција) и геометрије призматичних делова која учесствује у креирању толеранција. Онтолошка структура потом служи као основа за дефинисање базе знања, која даје одговор на питање: "Који геометријски примитив учествује у креирању које толеранције?". Одговор се добија претраживањем онтолошке структуре дате графом базе знања уз помоћ тзв. резонера после имплементације у софтверу *Protégé*. С друге стране интелигентни концепт се односи и на примену једне од теорија ројева, у овом случају колонија мрава за оптимизацију мерне путање. Иницијална мерна путања дефинисана од тачке до тачке представља улаз у модел оптимизације на бази колоније мрава. Сваки мрав у саставу колоније случајно посећује све чворне тачке и поставља феромоне дуж путања које пређе. Након одређеног броја циклуса који се може задавати формирају се феромонске стазе. Феромонске стазе које имају највећи број положених феромона је најкраћа мерна путања или оптимизована мерна путања.

Имајући у виду предходно изложено, обим, домен и актуелне правце истраживања, одабрано је следећих пет хипотеза на којима се базира ово истраживање:

- да је могуће развити модел базе знања за подршку интелигентном концепту планирања инспекције;
- да се стандардни облици толеранција могу, преко метролошких примитива, свести на основне геометријске примитиве и тако успоставити директна веза између толеранција и геометријских примитива;
- да је могуће развити глобални план инспекције или метод за дефинисање редоследа инспекције основних геометријских примитива;
- да је могуће проширити постојеће методе за генерисање мерних тачака или апроксимацију реалних метролошких примитива за променљиве параметре основних геометријских примитива узимајући у обзир да мерне површине примитива могу бити унутрашње и спољашње;
- да је могуће развити алгоритам за генерисање оптималне путање мерног пишка применом колоније мрава.

Према постављеним хипотезама, научни доприноси истраживања у овој дисертацији су онтолошка база, развијени модел планирања инспекције и његова експериментална верификација као и модел оптимизације мерне путање применом колоније мрава.

Текст дисертације је организован у пет главних поглавља, кроз која су представљена обављена истраживања, уз закључак кроз који је дат сажет осврт на остварене резултате и могућности њихове практичне примене. Могући правци даљих истраживања су дати у последњем поглављу.

У другом поглављу су, у оквиру анализе постојећег стања истраживања и развоја у области планирања инспекције на мерним машинама, разматрани основни проблеми и правци истраживања и развоја планирања инспекције призматичних делова на мерним машинама са интелигентног аспекта дефинисања плана инспекције и то са акцентом на најновија истраживања у свету и код нас. Посебно су наглашени проблеми метролошке интероперабилности између метролошких софтвера и проблем дубоког јаза између *GD&T* и постојећих стандарда за дефинисање *CAD* геометрије који утиче на прекид тока информација у планирању инспекције и одговоран је,

у већини случајева, за немогућност повезивања и аутоматског генерисања веза између *CAD* геометрије и толеранција. Такође, дат је кратак приказ развоја мерних машина и планирања инспекције на њима где је истакнуто шта су то фактори који су допринели или условили такав хронолошки редослед развоја ова два сегмента координатне метрологије. Између осталог, истакнута је потреба за брзим одговором на захтев тржишта у погледу инспекције упркос високој геометријској и метролошкој варијантности производа, односно тенденцији ка минималном укупном времену мерења кроз смањење компоненте времена потребног за планирање инспекције. Са друге стране неопходно је минимизирати физичко и умно учешће човека у појединим деловима процеса мерења као што је планирање инспекције како би се постигао уједначен или униформан ниво квалитета инспекције као и подигао ниво аутономности процеса мерења. На бази предходно спроведених истраживања дефинисани су кључни елементи процеса планирања инспекције, њихова улога као и везе између њих у циљу дефинисања интелигентног концепта инспекције призматичних делова.

У трећем поглављу се полази од анализе тренутног стања развоја инжењерске онтологије у циљу дефинисања онтолошке базе знања, поновне употребе и дељења знања у домену координатне метрологије. Примарни задатак базе знања је повезивање геометрије делова са њиховим толеранцијама уз помоћ основних компоненти онтологије као што су класе, индивидуе и особине. Развоју базе знања предходи развој онтологије за домен координатне метрологије и методологије њеног развоја на концептуалном нивоу. Да би се ово остварило било је неопходно размотрити постојеће методологије развоја и до сада развијене онтологије, као и развити и имплементирати сопствену онтологију која ће служити као логичка структура базе знања за интелигентну инспекцију призматичних делова на мерним машинама. Развијена онтологија је имплементирана у софтверу *Protégé*. Дефинисањем инжењерске онтологије уз помоћ представљеног метода дефинише се скуп термина, који пресликан у домен изградње база знања представља ентитете и релације између ентитета. Класе инжењерске онтологије су ентитети базе знања, а релације између ентитета су особине инжењерске онтологије. Са

овако дефинисаном онтологијом дефинисан је скуп термина базе знања која је заснована на графу, а њено одлучивање на бази тзв. резонера софтвера Protégé. Мотивација за комбиновање онтологије и већ развијеног графа, лежи у уоченој погодности да се метролошки примитиви могу представити помоћу основних компоненти инжењерске онтологије, а да се претраживањем графа може доћи до одговора на питање из којих примитива се састоји неки од стандардних облика толеранција. Одговор на ово питање даје везу између толеранција и геометрије дела, те се даље стиче услов за дефинисање математичког модела инспекције призматичних делова. Резултат предложеног метода развоја онтологије је итеративан процес за домен координатне метрологије у пет корака. Резултат овог приступа је и дефинисање припадности геометријских карактеристика (примитива) појединим облицима толеранција кроз претраживање графа модела базе знања. Претраживањем графа, општи облици толеранција дефинисани стандардом се повезују са геометријским карактеристикама тако да је могуће дефинисати метролошке секвенце и планирати путању мерног сензора.

У четвртом поглављу је представљен развијени модел планирања инспекције призматичних делова на мерној машини. Главна идеја представљеног модела је генерисање путање мерног пипка на основу *CAD* модела призматичног дела и његових (задатих) толеранција. Модел се састоји из дефинисања математичког модела, моделирања примитива за инспекцију, дистрибуције мерних тачака, анализе приступачности мерног сензора, избегавања колизије и планирање путање мерног сензора. Основна улога математичког модела је у дефинисању веза између координатних система мерне машине, мерног дела и примитива из којих се састоји део, а који учествују у креирању прописаних толеранција дела. Сваки произвођач софтвера за мерне машине има развијен и имплементиран свој математички модел. Модел представљен у овој дисертацији је нов и примењив на инспекцију скупа призматичних делова. Следећи корак у развоју модела је моделирање примитива за инспекцију базирано на основним геометријским примитивима и њиховим параметрима. Појам геометријског примитива прво је дефинисан у аналитичкој геометрији, да би на истим основама касније био примењен у

инжењерском моделирању. У координатној метрологији овај појам представља базу за дефинисање - моделирање примитива за инспекцију са аспеката геометрије и толеранција. У овом моделирању, геометријски примитив представља најнижи ниво дефинисања толеранције или објекат генерисања тачака мерног сензора на мерном делу. Сваки геометријски примитив је једнозначно одређен локалним координатним системом и скупом параметара у односу на њега. Геометријски примитиви обухваћени моделирањем су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера. Након дефинисања примитива први следећи корак је дистрибуција мерних тачака за тако дефинисане примитиве. Дистрибуција мерних тачака је базирана на *Hammerslay*-овој секвенци, за израчување координата мерних тачака дуж две осе метролошког примитива. Модификовањем *Hammerslay*-еве секвенце, изведени су обрасци за дистрибуцију жељеног броја мерних тачака за све напред наведене геометријске примитиве. Експериментални пример је обухватио расподелу десет мерних тачака, међутим метод дистрибуције дозвољава унос било ког броја мерних тачака, што зависи од типа и квалитета прописане (захтеване) толеранције. Да би се извршила инспекција једног примитива без колизије неопходно је и спровести анализу приступачности мерног сензора. Она обухвата одређивање још два скупа тачака као и дефинисање вектора пуноће примитива којим се узима у обзир да ли је примитив пун или шупаљ. Први скуп тачака представља тачке у којима се прелази из брзог у спори ход, док други скуп тачака дефинише почетке брзог хода. Овим приступом дефинисања скупова тачака и хода спроводи се избегавање колизије између једног примитива и мерног пипка. За дефинисање мерне тачке и уочена три карактеристична случаја површина примитива дефинисани су принципи расподеле оба скупа ових тачака. На основу тог принципа изведен је образац за дужину пута пипка или дужину иницијално пређене путање што је основ за оптимизацију путање применом колоније мравца у следећем поглављу. Када је реч о избегавању колизије неопходно је још избећи колизију приликом преласка сензора са једног на други примитив (прост пример за то је инспекција паралелности две равни). Из тог разлога је развијен принцип избегавања колизије на основу *STL* модела представљања геометрије

призматичних делова, његових толеранција, координате последње тачаке за инспекцију предходног примитива и координата прве тачке за инспекцију наредног примитива. Принцип се састоји од итеративног померања праве, која првобитно пролази кроз поменуте тачке, за неку вредност по одређеној процедури све до онда до када права не пресеца запремину призматичног дела. Померање праве се врши translацијом за наведену вредност. Проблем проналаска пресечних тачака између праве и запремине призматичног дела се своди на проблем проналаска пресечне тачке између површине ограничене троуглом и дужи. На основу дефинисане повезаности толеранција и геометрије као предходно објашњених процедура развијених метода и принципа, планирање путање мерног сензора као излаз даје *point – to – point* мерну путању за дати призматични део.

У петом поглављу је представљена оптимизација путање мерног сензора при инспекцији призматичних делова на *NUMM*. Модел оптимизације је базиран на математичком моделу развијеног модела планирања инспекције који дефинише иницијалну путању представљену скупом тачака са дефинисаним редоследом за пролазак пипка без колизије и решењу проблема трговачког путника, *Traveling Salesman Problem (TSP)*, и то применом колоније мрава. Поглавље се састоји из неколико целина као што је модел података, математички модел за оптимизацију и модел оптимизације базиран на колонији мрава, *Ants Colony Optimization (ACO)*. Основа *ACO* модела су потребни подаци преузети из *IGES* фајла *CAD* модела призматичног дела и математичког модела који на излазу даје скуп тачака између којих се тражи најкраће растојање или оптимална путања мерног пипка. Приликом дефинисања иницијалне путање стриктним дефинисањем редоследа тачака дефинисана је мерна путања. Да би се оставио простор за оптимизацију и добила оптимална путања дефинисане су три зоне: зона могуће колизије, оптимална зона и зона нерентабилног планирања инспекције. Скуповима тачака које припадају зони оптимизације, дозвољено је случајно посећивање или пролазак мерног пипка кроз поменуте тачке. Управо ова чињеница или прилагођавање математичког модела омогућава примену принципа оптимизације на бази колоније мрава. Наиме, принцип ове технике је случајан обилазак свих, у овом случају, тачака

и полагање феромона по таквој путањи, а потом проналажења најкраћег пута по критеријуму највећег броја положених феромона дуж пређене путање. Путања која садржи највећи број феромона је најкраћа путања. Број циклуса случајног обиласка и број мрава у колонији се могу бирати. Оптимална путања се потом пореди са *on – line* програмираном путањом на мерној машини *ZEISS UMM500* и путањом генерисаном у *Pro/ENGINEER*-у при истим параметрима. Резултати поређења оптимизоване путање и *on – line* програмиране путање показују минимум 20 % мање вредности дужине оптимизоване путање, док у поређењу са *Pro/ENGINEER* путањом, показује минимум 10 % мање вредности дужине оптимизоване путање при исто сетованим параметрима.

У шестом поглављу извршена је експериментална верификација развијеног модела планирања инспекције. У циљу верификације и симулације путање ради визуелне провере колизије између мерног сензора и радног предмета, најпре је написан програм у *Matlab* софтверском окружењу. Поред верификације и симулације један од главних циљева написаног програма је и генерисање мерног протокола и листе управљачких података на излазу, а који се потом користе у процесу планирања експеримента и као улаз за експериментална мерења. Симулација је развијена уз помоћ три алгорита, и то:

- алгорита за дистрибуцију мерних тачака,
- алгорита за избегавање колизије,
- алгорита за планирање путање мерног сензора.

Њима су обухваћени сви геометријски примитиви представљени развијеним моделом планирања инспекције. Развијени модел симулације путање мерног сензора на излазу даје мерни протокол и управљачку листу податка за тест мерне делове. Мерни протокол се даље користи за *on – line* програмирање мерне машине *ZEISS UMM 500*, генерисање програма за ову машину, процеса мерења и верификације развијеног модела планирања инспекције. За потребе експеримента пројектована су и обрађена два тест радна предмета. Обрада је извршена у Заводу за машине алатке, Катедре за производно

машинство Машинског факултета у Београду на обрадном центру *LOLA HMC 500* у квалитету обрађених површина *N7* и *N8*. Пре процеса инспекције пројектованих и обрађених тест радних предмета проверена је димензионална тачност машине на бази артефакта домаће производње према стандарду ISO 10360-2. Инспекција делова је извршена на Техничком Универзитету у Бечу у Нанометролошкој лабораторији за високо прецизна мерења, *High Precision Measurement Room - Nanometrology Laboratory* током студијске посете универзитету. Резултати инспекције показују да су све толеранције радних предмета у цртежом прописаним границама. Ово потврђује да је развијени модел планирања инспекције један успешан и практично примењив приступ развоју интелигентног концепта планирању инспекције призматичних делова.

2 ПРЕГЛЕД СТАЊА ИСТРАЖИВАЊА У ОБЛАСТИ ПЛАНИРАЊА ИНСПЕКЦИЈЕ НА МЕРНИМ МАШИНАМА

Предмет овог поглавља је преглед до сада спроведених истраживања и постигнутих резултата у области планирања инспекције на *NUMM* са акцентом на најновија истраживања у свету и код нас.

2.1 Уводне напомене

Развој интелигентних система за планирање инспекције на нумерички управљаним мерним машинама (*NUMM*) је императив и предуслов за развој нове генерације метролошких система и њихове примене у концепту дигиталног квалитета заснованог на глобалном интероперабилном моделу производа [3–7], који интероперабилни модел производа интегрише кроз *CAD – CAM – CAI* информације на дигиталној платформи [8, 9]. Овај прилаз представља основу за виртуелну симулацију и планирање инспекције на бази знања, посебно за призматичне делове на *NUMM*, што је и предмет истраживања у овој дисертацији. С друге стране, дигитална производња представља оквир за развој нове генерације технолошких система заснованих на виртуелној симулацији, дигиталном моделу производа и примени *cloud*¹ концепта [5, 7].

Истраживачки пројекти покренути у Америци од стране Националног института за стандарде и технологију, *National Institute for Standards and Technology (NIST)* и водећих Европских метролошких центара као

¹енг. cloud manufacturing - омогућава свеприсутан, погодан и на захтев доступан приступ мрежи заједничких производних ресурса и способности да ресурси могу бити брзо обезбеђени и издати уз минималан напор менаџмента или услуга интеракције провајдера

што су Лабораторија за измењиву производњу и индустријску метрологију *Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology Lab., (IMIML)* Катедра за менаџмент квалитетом и производну метрологију, *Lehrstuhl für Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, (LQF)* и Нанометролошкој лабораторији за високо прецизна мерења, *High Precision Measurement Room - Nanometrology Laboratory (HPMR-NL)*, између осталог односе се и на истраживања развоја интелигентног концепта планирања инспекције призматичних делова у циљу смањења укупног времена мерења на *NUMM* кроз смањење компоненте времена потребног за планирање инспекције. Сва ова истраживања имају за циљ да организују и ефикасно користе знања (искуствена, интуитивна) и закључивања на основу њих, а ради спровођења униформног плана инспекције с обзиром на релативно високу како метролошку тако и геометријску комплексност и варијантност производа. Поред поменутих истраживања актуелни су и други правци истраживања као што је нано-метрологија [10–12].

2.2 Модел мерног система на бази NUMM

Као полазна основа за развој интелигентног концепта планирања инспекције може се искористити модел неког мерног система. Како се у овом случају ради о једној грани метрологије названој координатна метрологија и мерењу призматичних делова (*PD*) на *NUMM*, такав систем је на бази саме *NUMM*.

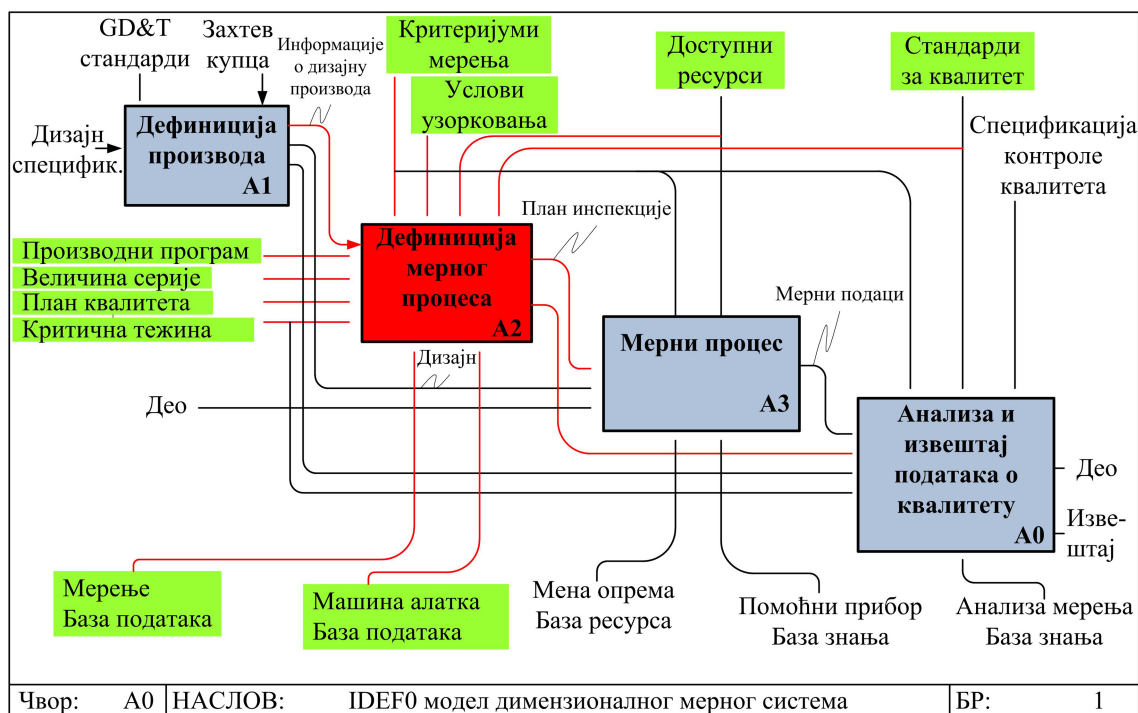


Слика 2.1: Шема основног модела мерног система

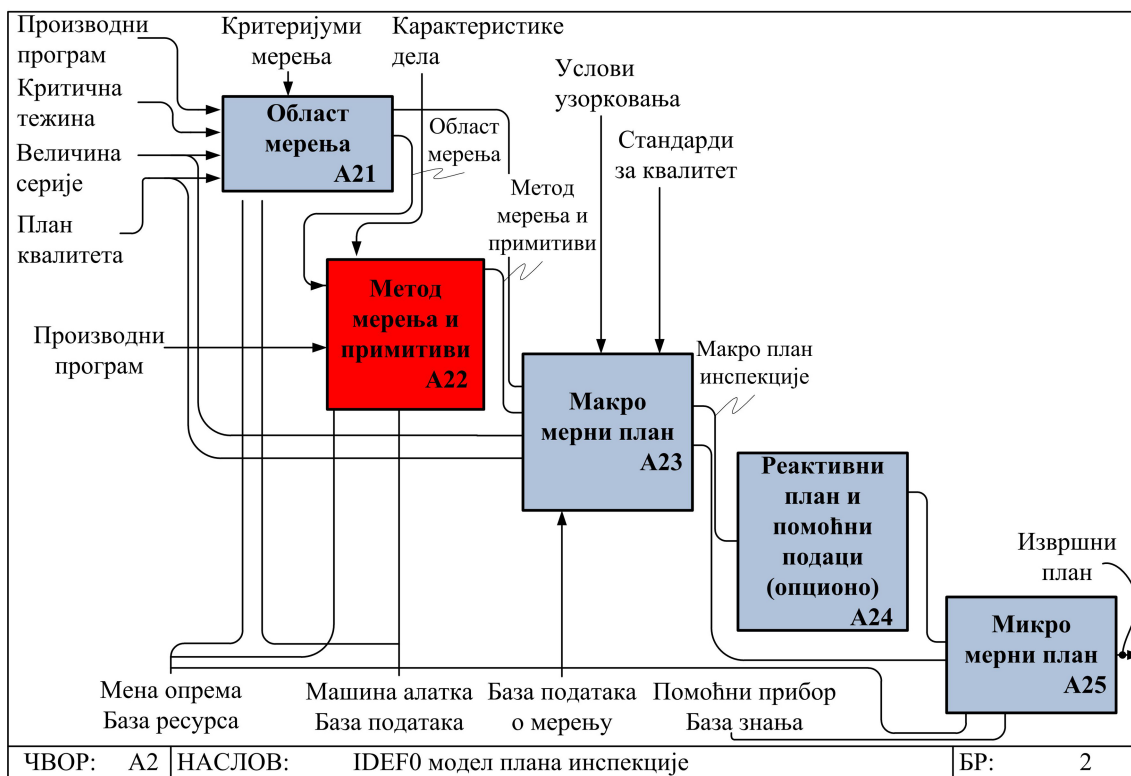
Простији модел мерног система на бази *NUMM* може бити изведен из аналогије са основним моделом обрадног система представљеног у [13]. Превођењем појмова из домена обраде на домен мерења, модел мерног система се може представити помоћу слике 2.1.

Мерни систем на бази *NUMM* се састоји из машинског система и мерног процеса. Поред *NUMM* саставни део машинског система су мерни сензор, помоћни прибор и мерни део. Мерни процес се састоји из процеса планирања инспекције, помоћних процеса као што су постављање мерног дела, уравнивање итд., затим процеса мерења и анализе добијених (измерених) резултата. Постављање мерног дела се детаљно разматра у [14].

Према аутору *Zhao*, *IDEF0* модел димензионог мерног система се састоји из четири главна елемента, а то су: дефинисање производа (*A1*), дефинисање мерног процеса (*A2*), мерни процес (*A3*), као и анализа и извештај података о квалитету (*A0*) (слика 2.2), док *IDEF0* модел плана инспекције дефинише активности (слика 2.3) плана мерења, као што су област мерења (*A21*), метод мерења и примитиви (*A22*), макро-мерни план (*A23*), реактивни план и помоћни подаци (*A24*) и микро мерни план (*A25*), тако да се обезбеди функционалност дела за време и после обрадног процеса.



Слика 2.2: *IDEF0* модел димензионалног метролошког система [3]



Слика 2.3: IDEF0 дијаграм активности мерног процеса [3]

IDEF0 модел планирања мерења за делове произведене на обрадном центру је представљен у [15].

2.3 Развој NUMM

Развој *NUMM* је условљен увођењем нових технологија и развоју технолошких система и уопштено се може поделити на развој хардвера и софтвера за *NUMM*. Према [16] на почетку индустријског развоја задатак производње, односно контроле био је да обезбеди функцију производа уз високе толеранције производа док са повећањем тачности, комплексности и флексибилности обрађених делова, успостављањем концепта серијске производње, увођења принципа замењивости делова, трансвер линија и *NUMA*, улога контроле је не само идентификација геометријске тачности већ и параметра за управљање обрадним процесом као што су подешавање алата, параметри режима обраде - храпавост обрађене површине, и слично. Према истим ауторима, посебан допринос развоју *NUMM* су имала два догађаја и то: отпочињање индустријске производње крајем шездесетих година мерних

система на бази електронике за дужине и углове, а други, развој рачунарске технологије.

Данас, за разлику од старијег концепта производње који се ослањао на тежњу ка што тачнијој изради компоненти *NUMM* што је знатно повећавало трошкове њихове производње, на снази је нови концепт где се захтевана тачност *NUMM* остварује алгоритмима компензације грешака и тачности израде компонената мерних машина.

Један концепт развоја модерних машина дефинисан крајем прошлог века је представљен у [17], а стање развоја производне метрологије до средине предходне декаде у [18]. Значај производне метрологије у индустрији је описан у [19].

2.3.1 Софтвери за *NUMM*

Паралелно са развојем хардвера за *NUMM* долази до развоја и софтвера који се могу класификовати у две групе и то софтвери опште намене и специјалне намене (нпр. инспекцију зупчаника, лопатица турбина, итд.). Према степену сложености метролошких задатака [16], софтвери за *NUMM* могу бити класификовани у следеће групе: 1) мерење и инспекција толеранција дужина, углова облика и положаја, 2) мерење и инспекција параметара зупчаника, 3) мерење и инспекција кривих линија и површина.

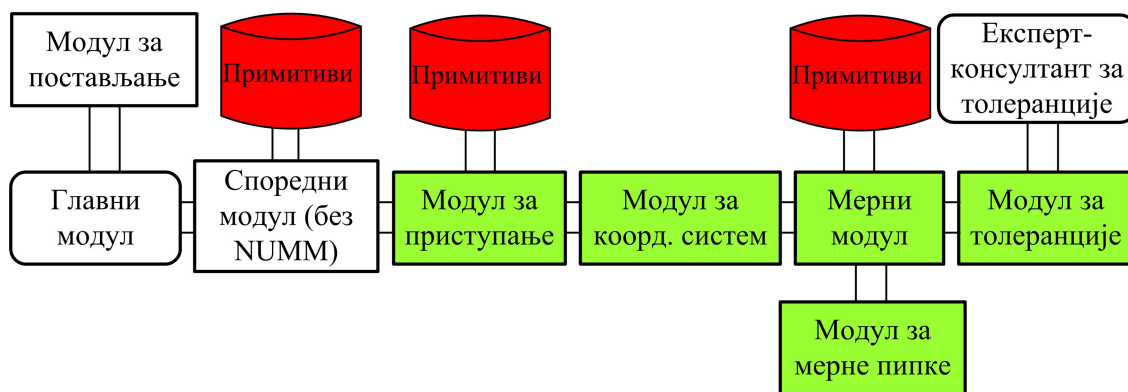
Основни геометријски елементи помоћу којих се остварују различити метролошки задаци, уз помоћ софтвера за *NUMM*, су: тачка, права, круг, раван, цилиндар, конус, сфера и торус. За сваки од њих се дефинише минималан и максималан број тачака, помоћу кога се применом методе најмањих квадрата он једнозначно одређује.

Резултате мерења софтвери могу приказати у различитим врстама координатних система као што су: Декартов или Картезијански (x, y, z) , поларно-цилиндрични (r, θ, z) и сферни (r, θ, φ) , и то у координатном систему мерења који се односи на мерни део.

Развој софтвера је условљен развојем теорија и алгоритама [20, 21], који су у позадини тј. који се користе за обраду измерених података у процесу инспекције на *NUMM*.

2.4 Развој планирања инспекције на NUMM

У последње три деценије планирање инспекције на *NUMM* се развијало кроз следеће прилазе: мануелни план, план генерисан *CAI* софтвером који се задржао до данас, план добијен експертним системом [22], аутоматски генерисан план мерења [23–29] и интелигентни концепт планирања инспекције [30–38]. Планови који се не могу подвести под наведене су [39, 40]. Последњих година се дизајнирају и развијају модели виртуелних *NUMM* [41, 42] посебно за потребе моделирања мерне несигурности [43, 44]. Ако се изузме човек као планер и творац мануелног плана инспекције, као и првобитни софтвери за *NUMM*, међу прве системе планирања инспекције засноване на знању спада модел показан на слици 2.4. Садржао је све елементе планирања инспекције у виду модула и нешто што се појављује по први пут, а то је елемент за одлучивање назван експерт-консултант за толеранције. Један готово свеобухватан значај развоја производне метрологије је представљен у [45], док објектно оријентисан приступ планирању инспекције је дат у [46]. Генерисање стандардизованог референтног скупа података за мерну машину је извршено у [47].

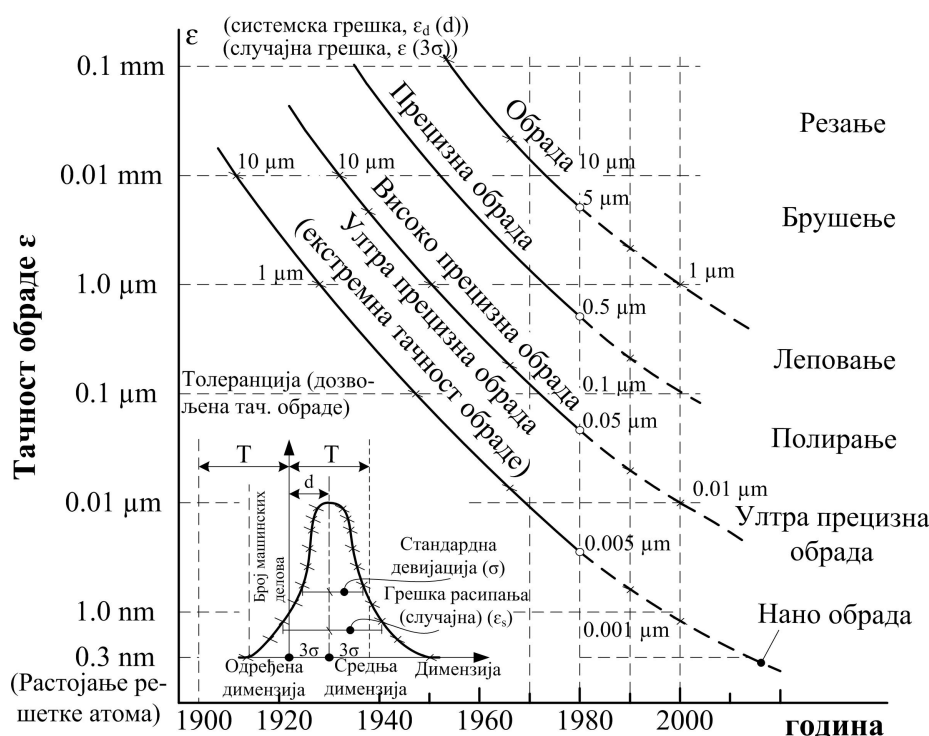


Слика 2.4: Модел планирања инспекције [22]

Два главна параметра која су диктирала овај редослед развоја прилаза планирања инспекције су остварива тачност обраде и укупно време мерења (слика 2.5).

Тенденција ка смањењу укупног времена мерења и повећање тачности обраде уз појаву високе варијантности производа захтевају стални развој нових

метода планирања инспекције на *NUMM*. Заједнички елемент који је остао исти кроз све ове етапе развоја, је мерни део, односно објекат контакта - мерења.

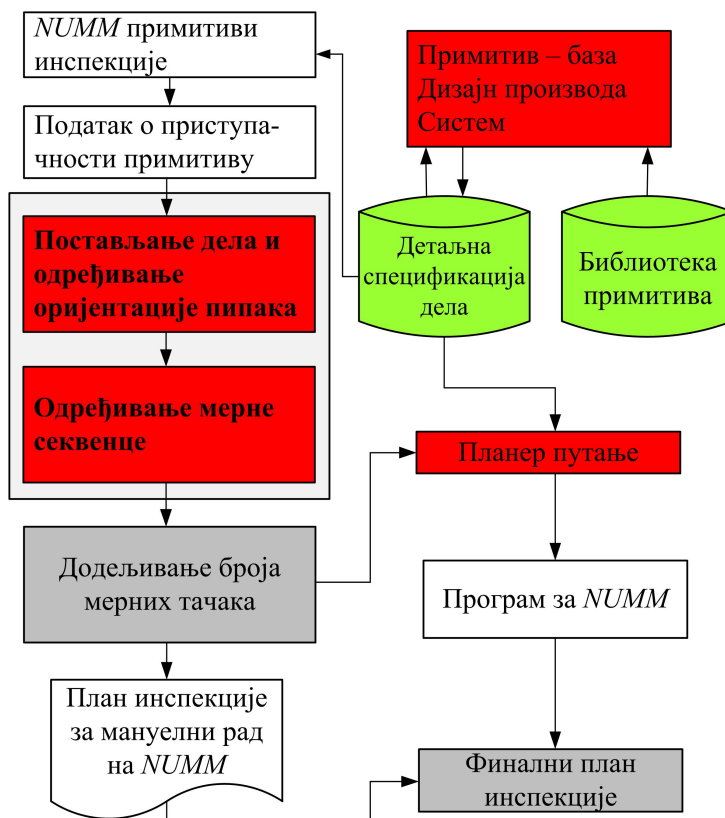


Слика 2.5: Предвиђање оствариве тачности обраде по Taniguchi-ју [48]

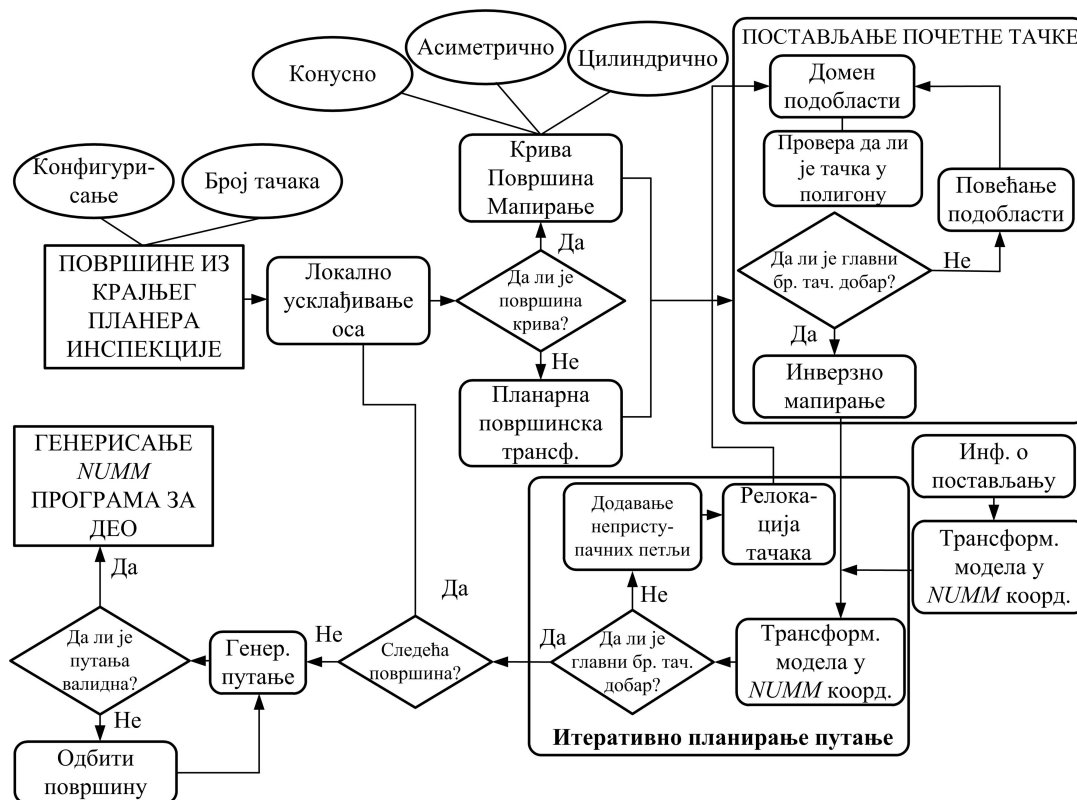
Према начину анализе или синтезе геометријских информација о мерном предмету (толеранцијама), до сада су развијена три приступа:

- анализа геометрије [49—51],
- анализа толеранција [52—57], и
- комбиновани приступ [58—60].

Процес планирања инспекције се састоји из неколико кључних елемената као што су планирање путање, избегавање колизије, анализа приступачности мерног сензора и постављања дела, као и конфигурисање мерних пипака. Ниво развоја и имплементације до сада развијених модела генерисања плана инспекције дефинише заступљеност ових елемената у њему. Комплетан систем за планирање инспекције садржи све наведене елементе. У раду од аутора *Hwang* [61], заступљени су елементи као што су постављање дела, одређивање оријентације пипака и одређивање мерне секвенце на основу библиотеке примитива за инспекцију (слика 2.6).



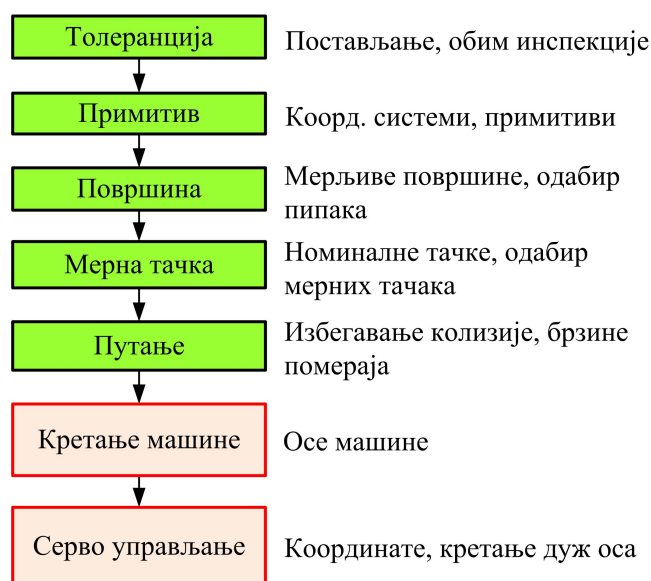
Слика 2.6: Једна операција инспекције на NUMM [61]



Слика 2.7: Алгоритам планера инспекције на NUMM [62]

Модел потребних информација за планирање инспекције су дати у [47, 63, 64]. Неопходно је напоменути да стратегија мерења такође има битну улогу у планирању инспекције [65, 66] као и програмирање мерних машина [67, 68].

У [62, 69—72] дати су приступи за планирање путање. Типична процедура планирања инспекције на бази ових приступа дата је на слици 2.7. Корак даље је отишао аутор *Juster* који поред путање дефинише и управљачки код за *NUMM* на основу хијерархије дате на слици 2.8.



Слика 2.8: Једна управљачка хијерархија инспекције [73]

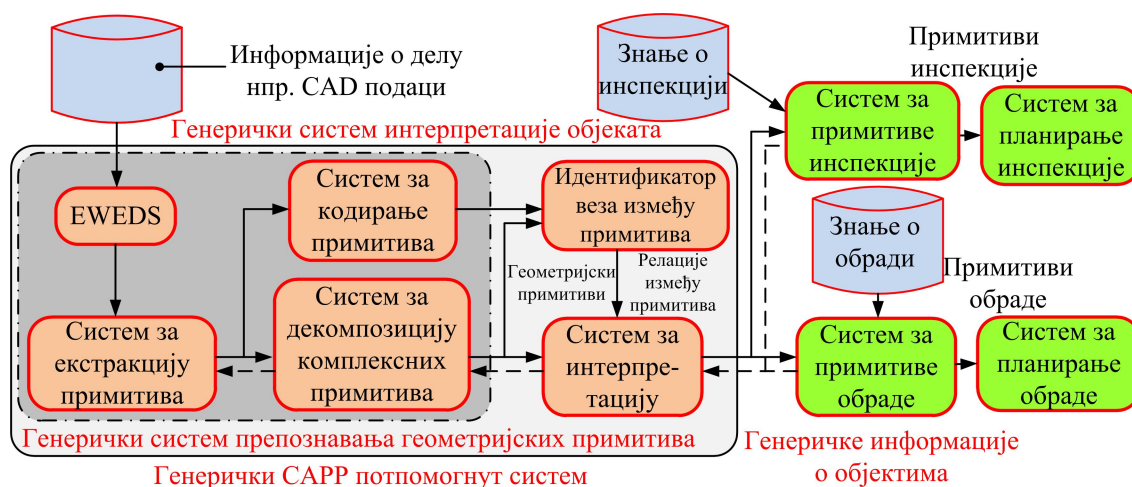
У [74, 75], разматрају се решења за избегавање колизије, а у [76—84] анализа приступачности, док конфигурисање мерних пипака разматрају [85—90]. Планирање инспекције се може разматрати и кроз поделу на локални и глобални план инспекције [91]. Елементи ова два плана су дати на слици 2.9. Системи за планирање инспекције могу бити базирани на примитивима [92—101] или на знању [102]. Системи базирани на примитивима се користе и за планирање обраде [103, 104].

У [105] представљен је *off-line* систем планирања мерења, који се састоји из три модула: модул за улазне податке, модул за планирање мерења и модул за статистичку анализу. Пример екстракције примитива из *CAD* модела за потребе планирања инспекције на бази *CBR* технике показано је на слици 2.10. Ова студија представља први генеративни приступ планирању инспекције применом *CBR* технике и разматра само геометријски аспект мерног дела, а

не и његове толеранције.



Слика 2.9: Шема "on – machining" мерења [106, 107]



Слика 2.10: Оквир планирања инспекције према [108, 109]

Стање истраживања у области планирања инспекције призматичних делова и скулпторских површина је детаљно дато у [91, 110].

Аутоматско планирање инспекције на *NUMM* представљено у [111] базирано је на Б-репрезентацији, *Boundary Representation (BR)*, солид модела у *SAT* формату. На излазу даје програм за *NUMM* у *DMIS* формату.

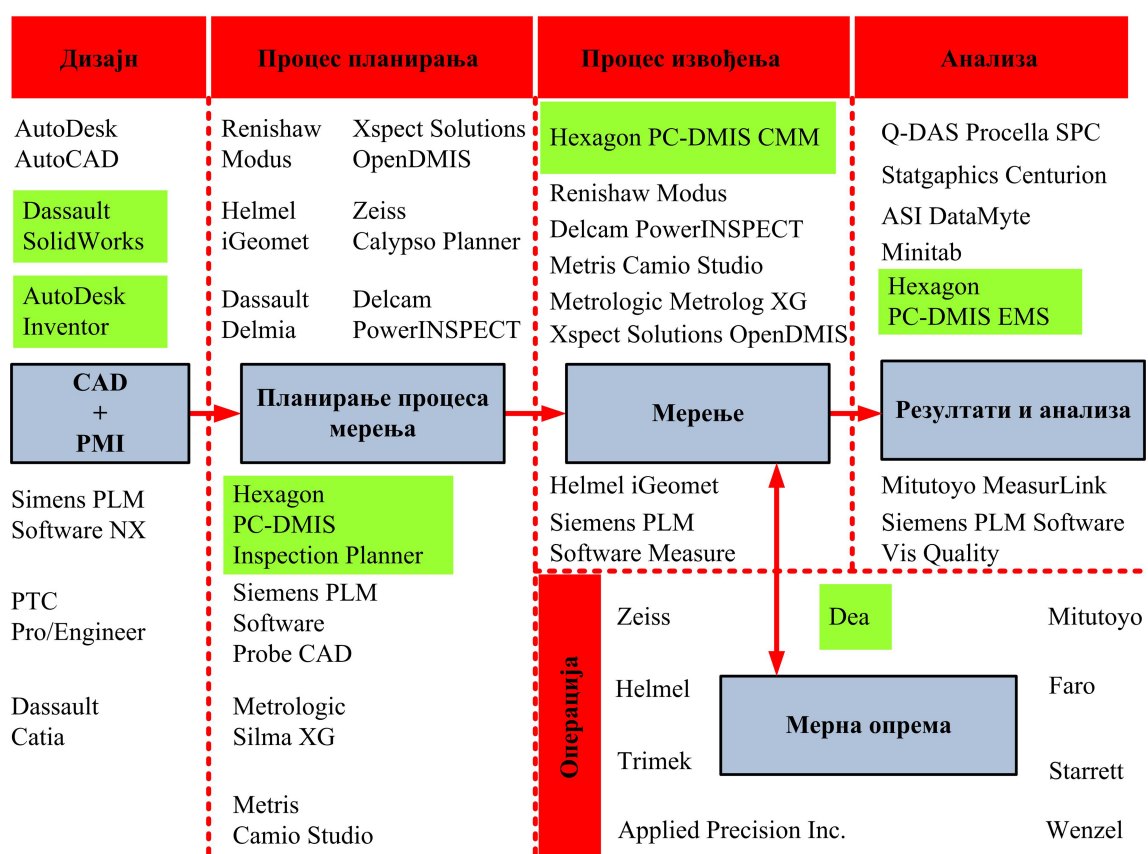
У координатној метрологији као што је мерење на *NUMM*, геометријски и толеранцијски приступ дефинисању објекта мерења у процесу планирања инспекције се не могу одвојено посматрати, већ везано. Геометријски, код *PD* објекат мерења је геометријски примитив (раван, круг, сфера, итд.), а са толеранцијског аспекта то је метролошки примитив (толерирано растојање између две равни, толериран пречник, толеранција управности, итд.). Повезаност између ова два типа примитива дефинише облик или врста толеранције. Путања мерног пипка се упрошћено може приказати као скуп тачака који се састоји из три подскупа. Први подскуп су мерне тачке и оне се могу добити на основу геометријских информација о примитивима и метода њихове дистрибуције. Други скуп су преостале тачке кроз које пипак прође при инспекцији једног геометријског примитива, такође се могу добити на основу геометријских информација о примитивима и развијеног модела дистрибуције. Трећи скуп тачака омогућава путању без колизије и немогуће га је дефинисати без информација о толеранцијама тј. повезаности између два геометријска примитива и принципа избегавања колизије при преласку пипка са једног на други геометријски примитив.

2.5 Метролошка интероперабилност

Планирање инспекције *PD* се може размотрити и са становишта нове парадигме као што је метролошка интероперабилност.

Под метролошком интероперабилности се подразумева способност за заједнички рад (комуникацију) различитих метролошких система, техника или програма (софтвера), базираних на различитим платформама. Да би се ово уредило, потребно је развити нове процедуре, унапредити постојеће стандарде или интерфејсе који ће их повезати. Метролошка интероперабилност се према [112] дефинише као спецификација језика интерфејса која дефинише

и имплементира метролошке податке тако да их корисници могу разменити са произвођачем (продавцем) са минималном, али сасвим довољном количином података. У [113] се о интероперабилности говори као о мери способности да више система комуницирају ефикасно и прецизно, на тај начин обезбеђујући решавање различитих задатака. Главни изазов метролошке интероперабилности је дефинисање одговарајућих процедура и интерфејса базираног на заједничком језику, тако да произвођачи имају све функције које су им потребне, при чему им је остављено довољно простора да се њихови производи разликују од производа конкуренције без откривања пословних тајни. Циљ метролошке интероперабилности је развој и одржавање заједничких језика за кључне интерфејсе у великим индустријским организацијама (на пример, *AIAG*, *I + +*, *BOING* итд.) који ће бити широко прихваћени.



Слика 2.11: Интероперабилне препреке између комерцијалних софтверских система у димензионалној метрологији [3]

У постизању заједничког циља укључени су корисници (*DaimlerChrysler*, *Ford*, *BMW* итд.), продавци (*Zeiss*, *Mitutoyo* итд), индустријске организације,

као и тела за стандардизацију и акредитацију.

Један пример интероперабилности у домену димензионе метрологије је дат на слици 2.11. Састоји се из четири опште активности: дизајн, процес планирања, процес извођења и анализа којим у домену димензионалне метрологије одговарају активности *CAD-PMI*, планирање процеса мерења, мерење, мерна опрема, резултати и анализа, респективно.

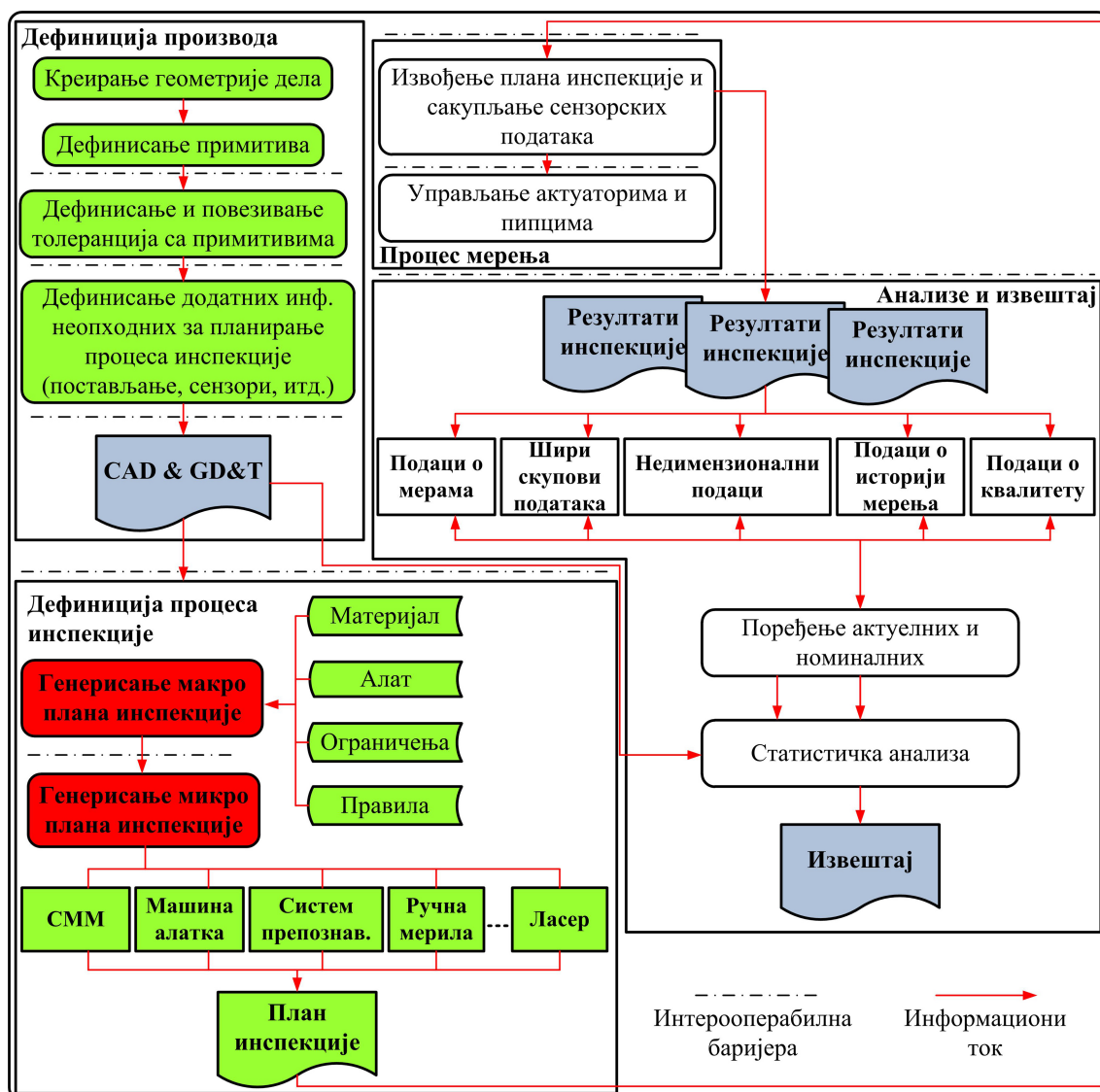
2.5.1 Проблем метролошке интероперабилности

Проблеми интероперабилности су стални проблеми који се јављају при изради апликација, а посебно при њиховом коришћењу. Данашњим апликацијама недостаје једнозначан опис или дефиниција на нивоу једног примитива² и детерминистичко дефинисање веза ка вишим нивоима. Прилаз за решење овог проблема је сличан данашњем свакодневном језику заснованом на семантичком опису проблема. Неспоразум између људи приликом пословања у оквиру производног система и ат-хок превода софтверских апликација доприноси расту трошкова интероперабилности у производњи што није пожељно. Из овог разлога захтевају се заједничке терминологије и синтаксе да би се ефикасно и ефективно решио проблем.

Питања интероперабилности се појављује у производним погонима када се жели успоставити равнотежа између рада (инспекције) неколико мерних машина измештањем инспекције са једне на другу мерну машину или када је потребно да се пренесе програм инспекције дела или читаве групе делова из једне фабрике у другу. Један пример тренутног стања проблема интероперабилности је дат на слици 2.12 .

Проблем интероперабилности се може решити развојем новог језика који ће сви (произвођачи и корисници) користити. Пре неколико године *NIST* је међу произвођачима хардвера и софтвера покренуо иницијативу о метролошкој интероперабилности њихових производа. У [114] је дат комплетан преглед тестова за утврђивање нивоа постигнуте интероперабилности софтвера и хардвера развијен од стране *NIST*-а.

²енг. *feature* - срб. примитив - општи или генерички облик коришћен у некој компјутерски подпомогнутој апликацији

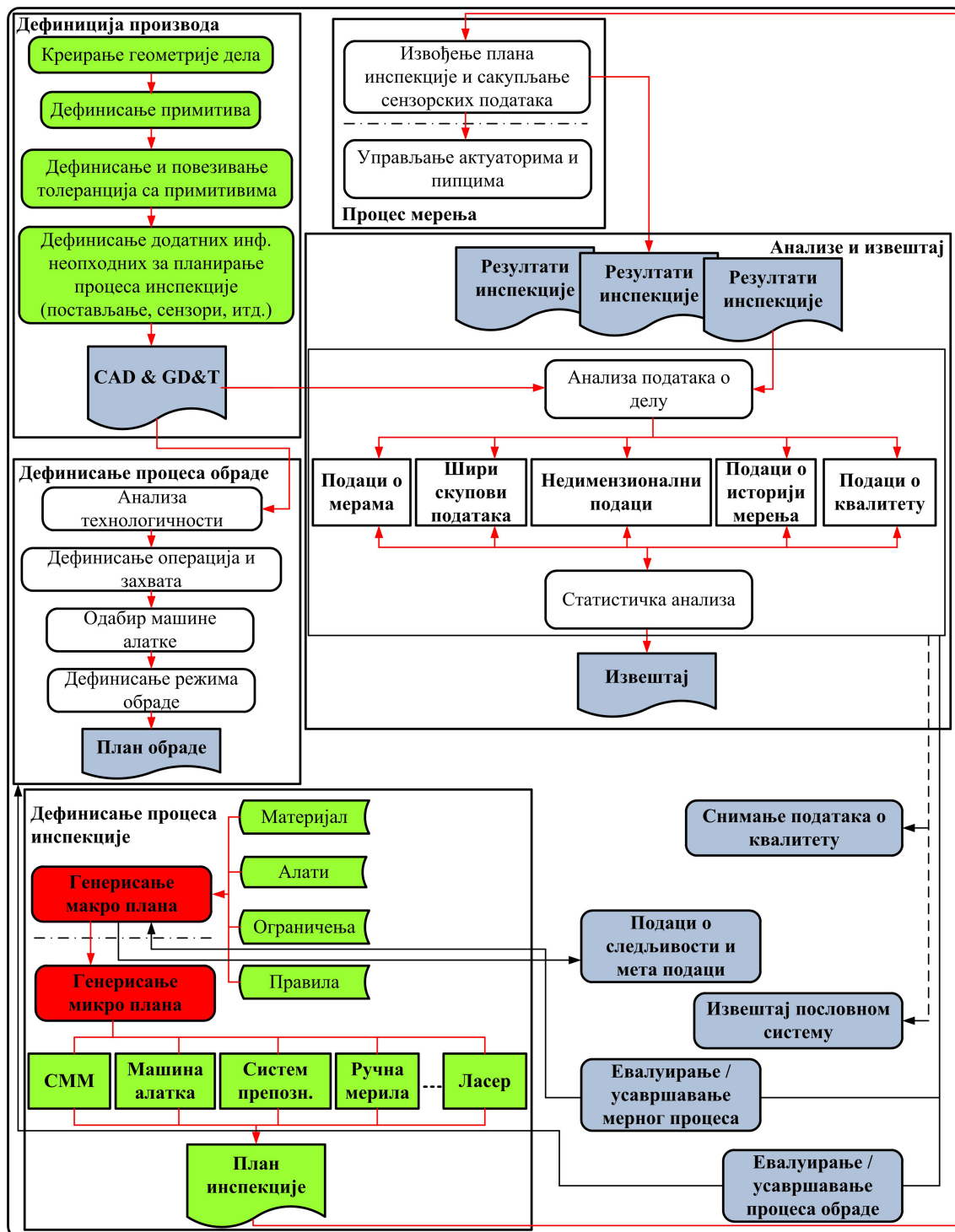


Слика 2.12: Тренутно стање проблема интероперабилности у димензионој метрологији [3]

Један пример решења проблема интероперабилности у домену димензионалне метрологије је дат на слици 2.13, док је решење применом инжењерске онтологије дато у [115]. Детаљније о проблему метролошке интероперабилности је дато у [116, 117].

Упркос уложеним великим напорима, неуспех интероперабилности је стално присутан и представља озбиљну препреку за повећање продуктивности и ефикасности у индустрији. Кроз преглед до сада постигнутих резултата у области метролошке интероперабилности, у овој дисертацији се истиче значај и допринос развоја интелигентног концепта планирања инспекције као једног од начина уклањања интероперабилних препрека односно решења проблема

интероперабилности у домену инспекције *PD* на *NUMM*.



Слика 2.13: Будућа визија димензионог метролошког система [3]

2.5.2 Пројектни тим за метролошку интероперабилност

Национални институт за стандарде и технологију у Америци је основао Акциону групу за аутомобилску индустрију, *Automotive Industry Action*

Group (AIAG), која се састоји из више корпорација и универзитета на бази чије сарадње се решавају проблеми у области метролошких система. *AIAG* група је оснивач пројектног тима за метролошку интероперабилност тзв. Метролошког пројектног тима, *Metrology Project Team, (MPT)*. Поред проблема метролошке интероперабилности, као примарног, пројектни тим се бави и другим областима као што су: квалитет производних података, метрика производних података, инжењерска визуелизација, менаџмент производним подацима, размена и менаџмент техничким подацима итд. У погледу типа мерног система, пројектни тим, се углавном бави димензионалним метролошким системима чије кључне компоненте интерфејса су: програмирање; *CAD*; мерни експеримент; извештај и анализа добијених података. Према [118], основни циљ пројектног тима је да се смањи време развоја производа и трошкова производње постизањем високог нивоа интероперабилности софтверских и хардверских компоненти које се користе у аутоматизованој метрологији. Неке од активности у оквиру овог пројектног тима су:

- идентификовање недостатака у постојећим стандардима;
- увођење у дубљу евалуацију постојећих стандарда и развој стандарда за поједине интерфејсе;
- идентификација и подршка у усклађивању и преклапању стандарда.

Осим тога, овај тим се бави развојем инфраструктуре стандарда као и усаглашавању стандарда између Европе и Америке. Пројектни тим је организован кроз три радне групе чији тематски оквири су следећи:

- програмирање,
- заједнички формат извештаја и,
- *CAD* интерфејс.

STEP је *ISO* подршка решењу проблема интероперабилности дефинисањем комјутерски-интерпретативних података који описују производ и начин размене података.

DMIS описује неутрални формат за инспекцију програма инспекцију резултата [119], док *I++DME* описује комуникациони интерфејс између мерне

машине и извршног управљачког софтвера [120] и представља пут ка решењу проблема интероперабилности у домену инспекције на *NUMM*.

AIAG промовише и развој производа на бази стандардних интерфејса, а који су у складу са отвореним стандардима. Предност је у томе да ће производи различитих произвођача бити повезани и без конверзије једног формата података у други. Погодности за кориснике производа који подржавају стандардни интерфејси су: лакоћа повезивања производа, смањење трошкова одржавања, флексибилност у избору компоненти од стране корисника и повећана конкуренција међу продавцима, праћена смањењем трошкова.

2.6 Поставка проблема истраживања

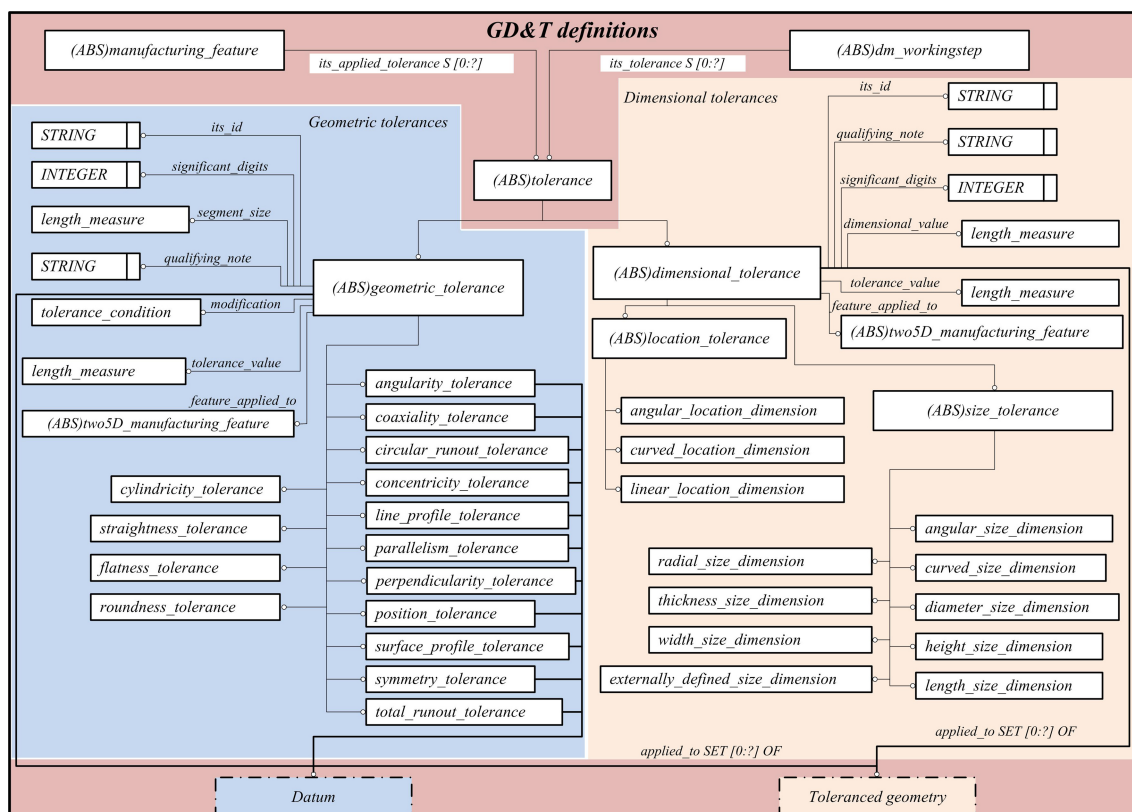
Приликом креирања мерног протокола, геометрија мерног дела се узима у обзир или уноси у софтвер за програмирање *NUMM* у виду неких од излазних датотека као што су неутрални формат података, *IGES* или *STEP*, док се подаци о толеранцијама уносе са техничког цртежа. За сада, не постоји формат података или датотека у коју су смештени и подаци о геометрији и подаци о толеранцијама. Поједини *CAD* софтвери, као што су *Autodesk Inventor Professional 2011* и *Catia V5* имају могућност задавања, у 3D окружењу, појединих облика толеранција као што су толеранције дужинских мера и пречника, међутим формат података у коме ће се видети веза између задатих толеранција и геометрије дела која учествује у креирању дате толеранције за сада не постоји.

Садашњи модел *STEP* података нема довољно *GD&T* информација за аутоматско генерисање плана процеса инспекције [3]. Слика 2.14³ показује *EXPRESS – G* дијаграм предложених *GD&T* дефиниција у предложеном Апликационом референтном моделу, *Application Reference Model (ARM)*. *STEP – NC* у себи садржи толеранције, али не податке које их везују за геометрију мерног дела. Са геометријског аспекта битну улогу заузима и развој *GPS* области [121].

Јасно дефинисање ових података олакшало би аутоматску инспекцију на основу *CAD* модела дела и елиминисало употребу техничког цртежа као

³термини на слици су дефинисани *GD & T* стандардом

основног медијума информација о толеранцијама.



Слика 2.14: Дефинисање информација о толеранцијама према GD & T [3]

Према аутору Zhao главни проблеми који се се јављају у процесу дефинисања производа и мерења су:

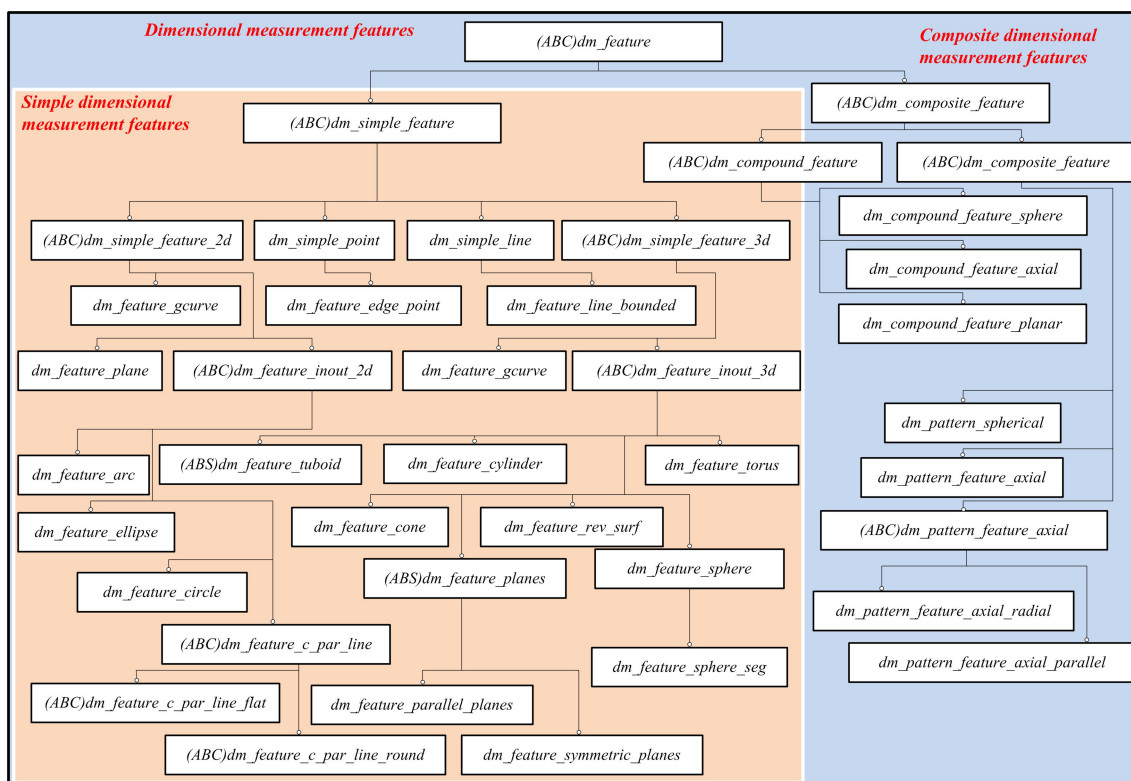
- *GD&T* подаци морају бити моделирани унутар *CAD* података, а не дати као коментари или записи. *ISO 10303 AP 203 [122] (BR)* је једино развијен стандард представљања података подржан од стране свих *CAD* система, међутим он нема у себи модел толеранција, елементе као што су координатни систем примитива, толеранције итд. *ISO 10303 AP 224 [123]* (представљање на бази примитива) инкорпорира модел толеранцијских примитива али као такав није подржан од стране *CAD* система,
- тренутно, једна од главних подршки развоју стандарда је нова верзија *ISO 10303 AP 203* која моделира толеранцијске елементе. Најновијим тестовима спроведеним од стране главних *CAD* добављача тестирана су тумачења *GD&T* информација моделираних у *AP 203* у издању 2 [124]. *GD&T* дефиниције из *AP 214 [125]* (језгро података за аутоматско

дизајнирање машинских процеса) су хармонизоване у *AP 203* у издању 2. Ове *GD&T* дефиниције су углавном употребљиве у сврхе тумачења, стога оне нису довољне за аутоматско генерисање плана мерног процеса. Неопходна је даља хармонизација *GD&T* дефиниција између *AP 214* и *AP 224*, као и њихово усвајање у *AP 203*. Једино на овај начин ће се омогућити *AP 203* да обезбеди адекватне информације за генерисање планова мерног процеса,

- не стандардне *GD&T* информације повезане са пројектовањем геометрије дела. Ова чињеница прожима како процес дефинисања производа тако и дефинисање активности мерног процеса,
- непостојање стандарних механизма да обухвате и један стандардни језик за мерне методе, праксе и правила,
- непостојање компјутерски читљивих (интерпретативних) и стандардних дефиниција ресурса могућности мерне опреме, капацитета, могуће конфигурације, перформанси, мерне неодређености, сензора, помоћних прибора, обртних столова,
- слаба крајња корисничка подршка за несвојински језик интерфејса метролошког система,
- *I ++DME* није формални стандард,
- примена *I ++DME* мора бити проширена на другу опрему, сензоре и окружења,
- имплементационе баријере *I ++DME* морају бити смањене, као што су почетни или улазни трошкови.

У предложеном *STEP* апликационом протоколу *ARM* модел података за интеграцију *CNC* обраде и инспекције, дефиниција димензионалних мерних примитива су хармонизоване од стране *AP 219* и *HIPP ARM* модела података предложеног од *NIST* на 53. *ISO TC 184 SC* састанку у Даласу 2007. године. Један димензионални мерни примитив (*dm_feature*) је или прост

(*dm_simple_feature*) или састављен (*dm_composite_feature*), као што је показано на слици 2.15⁴.



Слика 2.15: EXPRESS-G дијаграм метролошких примитива [3]

Сваки прост или састављен примитив може бити један од неколико типова који идентификују више заједничких примитива у планирању мерног процеса - као што су купе, цилиндри и састављени примитиви попут патерна (елемената који се понављају).

Наведени проблеми директно утичу на реализацију интероперабилности и ометају развој аутоматског и интелигентног концепта инспекције на *NUMM*. Покушај да се укаже на значај решења ових проблема је представљен у [126].

Решење наведеног проблема се може уочити у декомпозицији мерног дела на геометријске примитиве и дефинисању њихове припадности одређеном облику толеранције. Даље, геометријски примитиви се могу представити као класе инжењерске онтологије, нове технике вештачке интелигенције. Повезаност толеранција и геометријских примитива се може представити преко особина класа и индивидуа у јединствену онтолошку базу података. Основни

⁴термини на слици су дефинисани EXPRESS формалним језиком

задатак базе података је да да на излазу метролошке примитиве односно везе између геометријских примитива и толеранција мерног дела.

Изложени приступ решењу захтева и дефинисање инжењерске онтологије у домену инспекције призматичних делова на *NUMM* што је предмет следећег поглавља.

3 ОНТОЛОШКА БАЗА ЗНАЊА

Већ развијене и примењене инжењерске информације, често су складиштене и заборављене. Тренутни приступи претраживању информација су недовољно ефикасни у разумевању инжењерских садржаја, јер они нису развијени тако да деле, поново употребљавају и представљају информације једног инжењерског домена [127].

3.1 Уводне напомене

У овом поглављу се даје тренутно стање развоја инжењерске онтологије и предлаже метод њеног развоја на концептуалном нивоу, у циљу поновне употребе и дељења знања у домену координатне метрологије. Осим тога, метод дефинише развој онтологије за потребе изградње онтолошке базе знања, као једне од основних компоненти интелигентног система за инспекцију призматичних делова на *NUMM*. Предложени метод је имплементиран у софтверу Protégé.

Инспекција на *NUMM* се базира на комплексној софтверској подршци за разичите класе метролошких задатака (толеранција). Пројектовање униформног плана инспекције за мерни део, чија инспекција ће се извршити на *NUMM*, данас представља комплексан проблем због:

- типа производње и метролошке сложености мерног предмета,
- интуиције и знања планера инспекције или програмера *NUMM* и,
- модела и софтвера за *CAI* модел, као дела система за интегрисано пројектовање (*CAD*), планирање обраде (*CAPP / CAM*) и планирање

инспекцију на *NUMM (CAI)*, који се данас најчешће среће као *PLM* систем.

Овај проблем се може решити развојем онтологије и онтолошке базе знања за генерисање концепцијског плана инспекције за мерни део, на основу кога се може генерисати аутоматски план инспекције за конкретну *NUMM*, односно мерни протокол.

Развој онтологије инкорпорира све потребне информације моделирајући их помоћу онтолошких компоненти као што су класе, индивидуе, особине, хијерархија класа, хијерархија особина итд., док онтолошка база знања даје одговор на унапред постављена питања уз помоћ тзв. резонера махом уз помоћ правила за декомпозицију примитива.

3.2 Развој инжењерске онтологије за домен координатне метрологије

Појам онтологије је познат из филозофије где се дефинише као грана метафизике, која изучава природу бића или врсту ствари, које постоје [128, 129]. У инжењерству, појам онтологије се првенствено односи на представљање и поновну употребу знања. Поред потребе за представљањем и поновном употребом знања једне области, јавља се и потреба за дељењем знања једне области између више различитих корисника. Истраживачи у области вештачке интелигенције и представљања знања истичу да је основна намена инжењерске онтологије пренос и размена знања. С друге стране, један део аутора повезује онтологију са базом знања, тврдећи да она представља основну логичку структуру око које ће се градити база знања [128, 130]. Међутим једно је извесно, онтологија је пронашла своје место у областима у којима је семантика база комуникације међу људима и системима [131]. Неки од разлога који подстичу развој методологија за развој инжењерских онтологија, па самим тим и инжењерских онтологија су:

- инжењери данас ретко чине напор да пронађу инжењерске садржаје изван претраге преко кључних речи, истовремено све више игноришући поновну употребу знања зато што одговарајући алати за претрагу инжењерских

информација нису довољно развијени [132].

- у индустријском сектору, пројектанти проводе 20-30 % времена у комуникацији и преузимању информација [133].

Недавно предложени онтолошки развој у инжењерству се може категоризовати према томе за шта је намењен. Према [134], постоје три намене: висок ниво спецификације знања домена, систем интероперабилности и размена знања и његова поновна употреба.

3.2.1 Методологије развоја инжењерских онтологија

Први покушај да се консолидују искуства стечена у развоју онтологије је представљен у [135], кроз истицање критеријума као што су: јасноћа, кохерентност и проширивост. У раду [136], разматра се развој онтологије предузећа за моделирање производних процеса унутар предузећа и предложене су три стратегије за идентификацију концепата у онтологији, одозго на доле (*top - down*), одоздо на горе (*bottom - up*) и споља ка средини (*middle - out*). Развијен је метод који укључује следеће активности: идентификација циљева, евалуација и документација. Имајући у виду комплексност проблема са којима се инжењери суочавају, потребно је комбиновати поменуте стратегије за идентификацију класа и на тај начин олакшати приступ концептима „у средини“, као најнеприступачнијем делу хијерархије класа. Онтолошки развој и метод евалуације којим је развијена, *Toronto Virtual Enterprise (TOVE)* онтологија [137], базира се на скупу питања, тзв. компетентних питања за одређивање обима онтологије и издвајање класа онтологије. *TOVE* метод је развијен у циљу изградње модела заснованог на логици првог реда за представљање онтологије. Сличне методе се помињу у раду [138]. У раду [139], представљен је метод за развој онтологије од самог почетка, назван *METHONTOLOGY*. Међутим, њена евалуација, по мишљењу стручњака за ову област је још увек субјективна. Међу недавно предложеним методама за развој онтологије, у инжењерству се усвајају неке од њих као што су: примена формалног концепта анализа [140] за формирање онтологије фамилије делова помоћу анализе слике добијене једнократном употребом камере, дизајнирање процеса развоја онтологије прилагођеног посебним потребама

производних компанија [141]. Међутим, примењено усвајање није експлицитно истраживање специфичних релација међу концептима, и стога, резултат усвајања је листа независних таксономија, а не онтологија. Концепт развоја инжењерске онтологије заснован на креирању инжењерског речника, као базе за даљи ток развоја инжењерске онтологије према [134], обухвата шест корака: спецификацију, концептуализацију, формализацију, популацију, евалуацију и одржавање (слика 3.1).



Слика 3.1: Инжењерска онтологија и процес развоја инжењерског лексикона [134]

Предложени концепт развоја методологије може бити прихваћен тек након развоја онтологије и њене успешне примене. Пример такве онтологије је

Skeletal – методологија предложена на основу искуства у развоју предузетничке онтологије, *Enterprise ontology* [136]. За развој онтологије предложени су различити критеријуми, а неки од тих критеријума су изложени у [142].

3.2.2 Поређење традиционалних и нових приступа

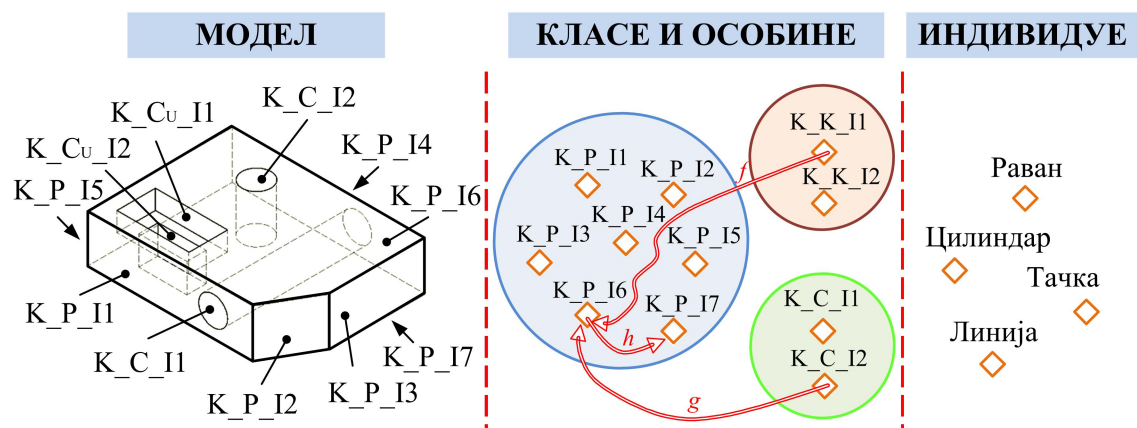
Свака методологија развоја инжењерске онтологије специфична је по домену за који се развија. Обзиром да за домен координатне метрологије и метрологије уопште до сада готово да није учињен ни један покушај да се она развије, не може се направити паралела у поређењу између традиционалних и нових приступа. Релативно поређење је могуће извршити на основу општих критеријума као што су јасноћа, кохерентност и проширивост за различите домене и то тек након развоја једне онтологије.

Онтолошко инжењерство је још увек у раној фази развоја и још увек нема детаљно разрађене методологије развоја онтологије, као и карактеристике онтологије које треба имати у виду при развоју онтологије. Сумарно, тренутне методе за развој онтологије захтевају велике напоре у циљу њихове интеграције од оних који се баве њеним развојем, усвајањем и одржавањем. Комплетност и тачност онтологије су сведене на индивидуалну процену истраживача или групе истраживача који су је развили, што је такође последица познавања специфичности домена за који се развија инжењерска онтологија.

3.2.3 Предложени метод развоја инжењерске онтологије

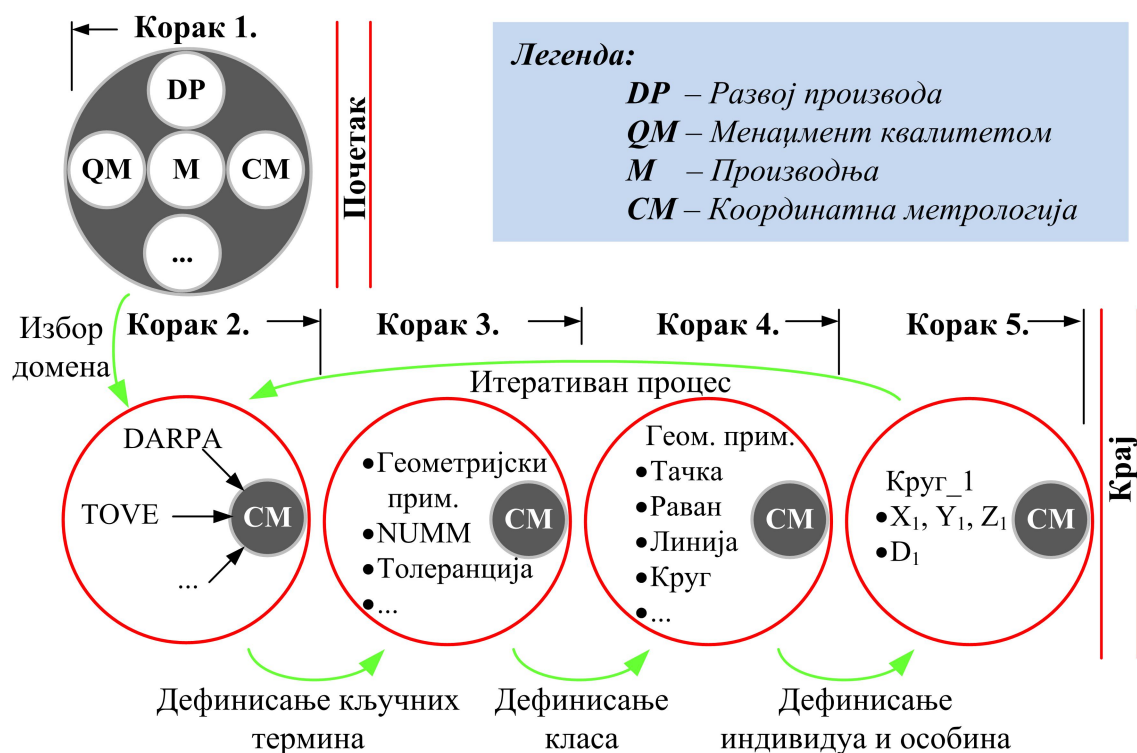
Да би смо извршили инспекцију призматичних делова, између осталог потребни су нам подаци о њиховој геометрији и толеранција. Податке о геометрији садржи *CAD* модел дела у неком од својих екстерних фајлова као што су *IGES*, *STL* или *STEP*. Уочена погодност компоненти инжењерске онтологија за преузимања потребних података из *CAD* фајлова и изградњу базе знања ствара потребу за дефинисањем метода за развој инжењерске онтологије у домену координатне метрологије. У раду [138], дефинисан је поступак развоја једне едукационе инжењерске онтологије у седам корака. Пре него што се крене у развој методологије потребно је дефинисати основне компоненте инжењерске онтологије. Према [143] основне компоненте онтологије су: класе, индивидуе и особине. На слици 3.2 показан је принцип означавања

основних компоненти инжењерске онтологије за домен координатне метрологије на простијем примеру CAD модела дела.



Слика 3.2: Један пример представљања класа, особина и индивидуа

Предложени метод развоја инжењерске онтологије у овом поглављу је резултат комбиноване примене предходно поменута два концепта и истраживања спроведених у [144, 145]. Метод се састоји из пет корака и његова илустрација је дата на слици 3.3.



Слика 3.3: Илустрација метода развоја инжењерске онтологије

Корак 1: одређивање области и обима онтологије. Обухвата

дефинисање:

- домена онтологије,
- сврхе онтологије, и,
- одржавања онтологије.

Један од начина да се утврди обим онтологије јесте да се направи листа питања на која би онтолошка база знања требало да одговори [137]. Листа питања и одговора на ова питања помажу да се побољша онтологија у раним фазама развоја и да се ограничи обим информационог модела одређеног домена.

Корак 2: разматрање могућности постојећих онтологија. Односи се на анализу могућности прилагођавања или усвајања већ развијених инжењерских онтологија, пре свега са становишта обима и домена примене. Библиотеке са већ креираним онтологијама за виšekратну употребу *WEB* онтологија су дате у [146, 147].

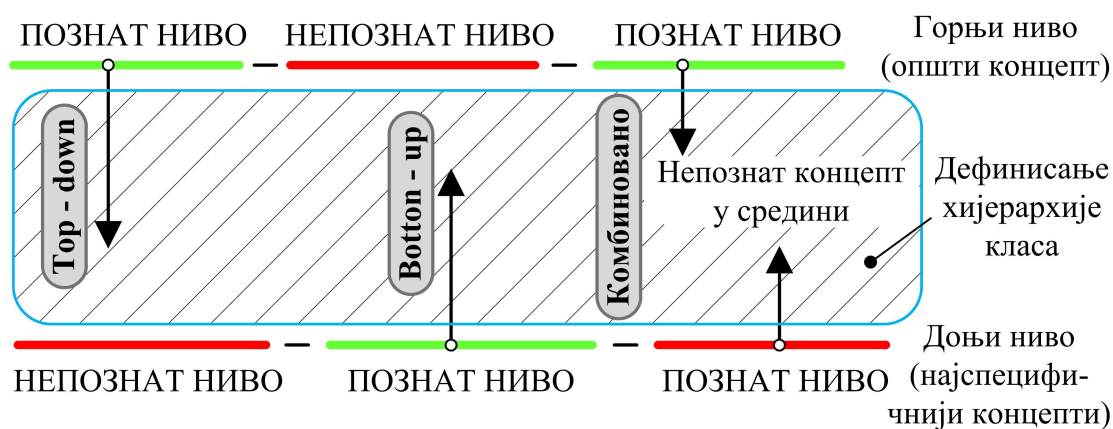
Корак 3: набрајање битних термина одабраног домена. У овом делу развоја инжењерске онтологије потребно је набројати све могуће термине који ће се користити у развоју онтологије. Један део ових термина постаће називи класа, други део називи особина појединих класа, а један део ће остати неупотребљен јер се испоставља да због оптималног обима онтологије нису битни.

Корак 4: дефинисање класа и њихове хијерархије. Постоји неколико могућих приступа за развој хијерархије класа. У раду [148] су то:

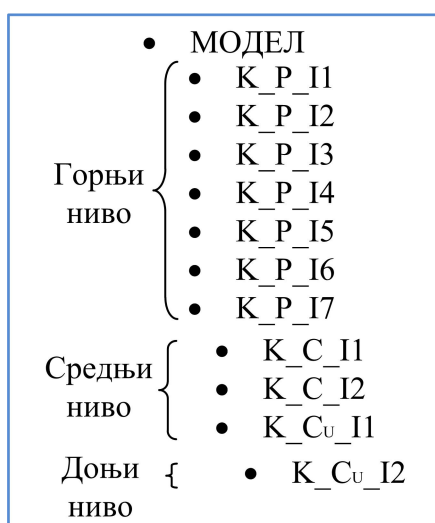
- одозго на доле, *top – down*: процес развоја почиње са дефинисањем најопштијег концепта,
- одоздо на горе, *botton – up*: процес развоја почиње од најспецифичних класа и њихове хијерархије,
- комбиновано: процес развоја који комбинује предходна два начина.

Илустрација ова три приступа на примеру простог *CAD* модела дела је дата на слици 3.4. Према [143], класе представљају скуп индивидуа. Оне

могу бити организоване у надкласа-подкласа хијерархију, која се често назива и таксономија (слика 3.5).



Слика 3.4: Три приступа за креирање хијерархије класа



Слика 3.5: Таксономија [143]

Корак 5: дефинисање индивидуа и особина. Као што је речено, један део дефинисаних термина ће представљати особине класа. Особина описује унутрашњу структуру класе или концепта. Према [143] постоје два главна типа особина, и то особине објеката и особине података. Особине објеката су релације између две индивидуе и оне могу бити:

- инверзне особине,
- функционалне особине,
- транзитивне особине,

- симетричне особине,
- антисиметричне особине,
- особине рефлексije,
- особине антирефлексije.

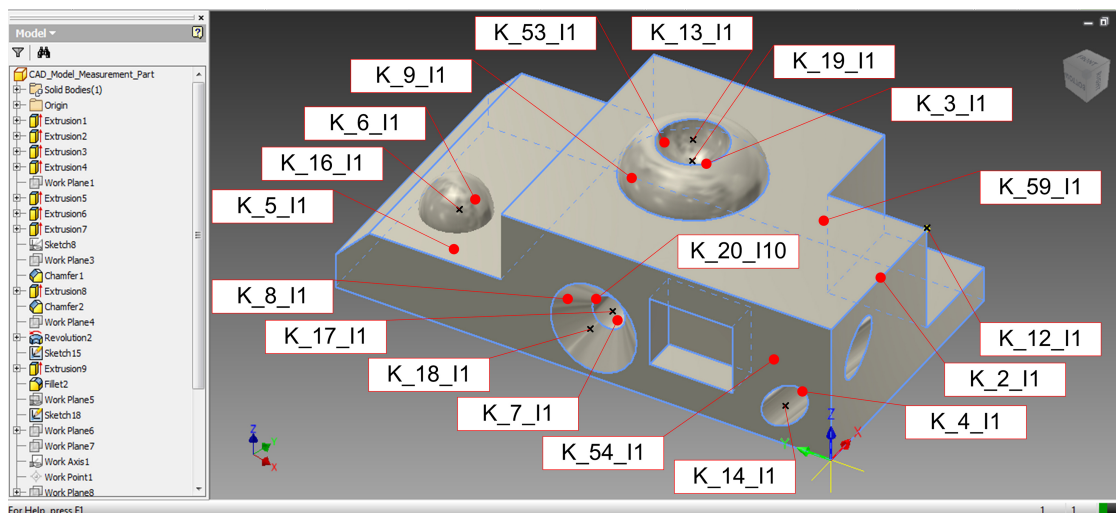
Детаљан опис сваке од ових врста особина је дат у раду [143]. Последњи корак у развоју инжењерске онтологије је дефинисање индивидуа свих класа. Индивидуе представљају објекте области од интереса. Називају се и инстансе и представљају најнижи могући ниво престављања у онтологији. Дефинисање индивидуа захтева: 1. одабир класа, 2. креирање инстанси класа и 3. одређивање особина индивидуа.

Иновативност предложеног метода развоја инжењерске онтологије је у следећем:

- смањење интероперабилности између метролошких софтвера,
- развој интелигентних мерних машина – сегменти: дефинисање интелигентног концепта планирања инспекције, аутоматског генерисања путање мерног сензора, избегавање колизије, првенство инспекције међу метролошким примитивима,
- систематизација знања домена, извршена уз помоћ представљеног метода, премешћава јаз између *CAD* и *CAI* за скуп призматичних делова.

3.2.4 Пример имплементација метода

Полазећи од претпоставке да се основни геометријски примитиви могу представити као класе инжењерске онтологије, у овом подпоглављу, представљен је опис једног репрезентативног *PD* (слика 3.6) са аспекта претходно изложеног метода. Модел информација о идеалној геометрији обухвата скуп геометријских информација у односу на координатни систем мерења призматичних делова, који се представљају основним геометријским примитивима. Садржај овог скупа, уз помоћ представљеног метода, описује се основним компонентама инжењерске онтологије тј. класама, подкласама, индивидуама и особинама, што је показано на слици 3.6.



Слика 3.6: Један пример имплементације класа, особина и индивида

Основни приступ метода је дефинисање садржаја овог скупа за инспекцију призматичних делова на *NUMM*. Скуп се састоји из:

класа: представљају основне геометријске примитиве као што су: тачка (K_1), линија (K_2), круг (K_3), елипса (K_4), раван (K_5), сфера (K_6), цилиндар (K_7), конус (K_8) и торус (K_9).

подкласа: геометријски примитиви који учествују у креирању других геометријских примитива су подкласе инжењерске онтологије (K_{11} , K_{12} , K_{13} , ..., K_{19} ; K_{52} , K_{53} , K_{54} , K_{57} , K_{58} , K_{59}).

индивидуа: представљају геометријске примитиве тачно одређене са једним или више параметара. Пример индивида за класу тачка је дат са ознаком K_{12_I1} , K_{13_I1} , итд.

особина: параметри индивида представљају особине инжењерске онтологије. Постоје четири типа особина: координате, нормални вектори, пречник и угао.

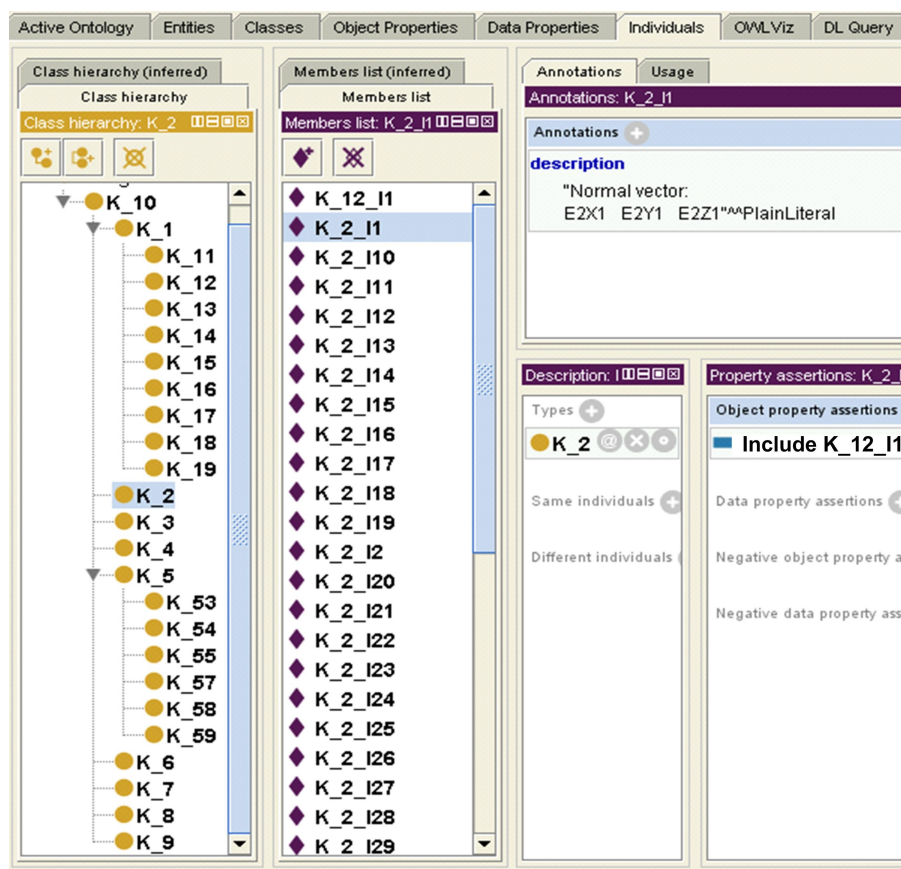
Предложеним методом су обухваћени сви основни геометријски примитиви. Експлицитна примена метода је поновно употреба, дељење података и логичка структура базе знања за интелигентну инспекцију призматичних делова на *NUMM*. Специфичност овог приступа се огледа у могућности да се сваки нови призматични део опише помоћу већ дефинисаних компоненти инжењерске

онтологије, с тим да се хијерархија класа разликује услед разлике у геометрији и метролошкој комплексности.

3.2.5 Имплементација у софтверу Protégé

Софтвер Protégé је бесплатан, *open source*, онтолошки едитор и програмски оквир базиран на знању развијен у Јави. Protégé имлементира скуп знања - моделираних структура и радњи које потпомажу креирању, визуелизацији и манипулацији онтологије у различитим форматима презентације [149]. Имплементација у софтверу Protégé се састоји из моделирања:

- класа,
- хијерархије класа,
- индивидуа, и,
- особина класа и индивидуа.



Слика 3.7: Представљање примитива као индивидуа у софтверу Protégé

Класе представљају геометријске примитиве као што су тачка, раван, круг, цилиндар, купа, зарубљена купа, полусфера и зарубљена полусфера. Представљање класа, подкласа, индивидуа и особина класа у софтверу Protégé је показан на слици 3.7. Скуп класа је показан у прозору лево. Индивидуе су у Protégé представљене као више специфичне класе и на слици 3.7 показане су у средњем прозору. Примера ради класа тачка се састоји из више индивидуа, које су такође тачке али тачно дефинисане уз помоћ особина које у овом случају представљају координате тачака у одређеном координатном систему. Као последица чињенице да у опису свих геометријских примитива учествују тачке, дефинишу се подкласе тачака, а које садрже индивидуе које онтолошки описују све остале примитиве: K_1i , $i = 2, 3, \dots, 9$. Слично важи и за раван, при чему се дефинишу подкласе K_53 , K_54 , K_55 , K_57 , K_58 K_59 .

3.3 Изградња модела базе знања за планирање инспекције призматичних делова на NUMM

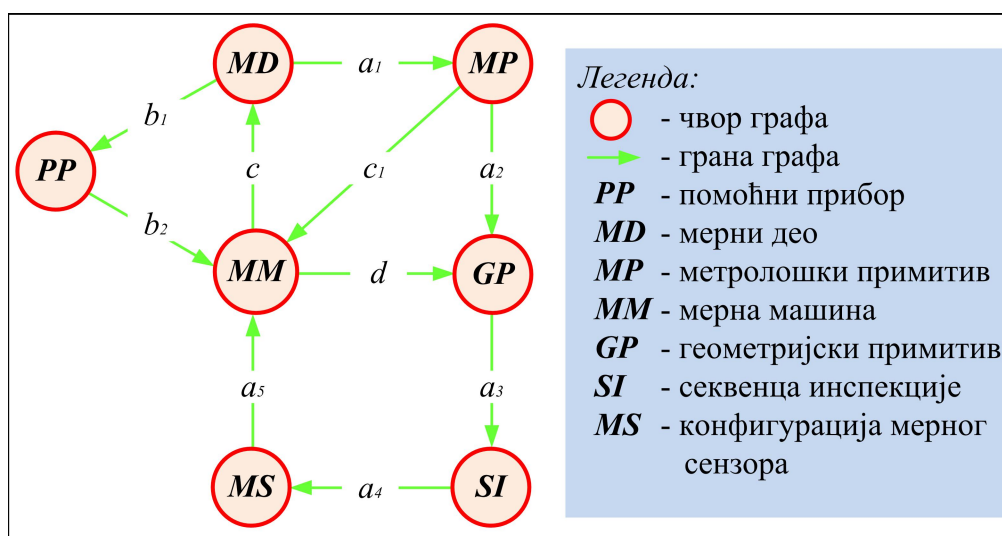
Изградња модела базе знања за планирање инспекције призматичних делова на *NUMM* је предуслов за развој интелигентног концепта планирања инспекције и његове примене у концепту дигиталног квалитета и дигиталне производње. Дигитална производња даље представља оквир за развој нове генерације технолошких система заснованих на виртуелној симулацији, дигиталном моделу производа и примени *cloud* концепта [6, 9].

Почело се са развојем експертних система (*ES*) као новог прилаза моделирању и примени инжењерских знања у технолошким системима, а који доживљавају експанизију деведесетих година прошлог века [22, 77, 79, 95]. У период од 2000. године па до данас, они су доживели зрело доба развоја и примене [50, 88, 96, 108, 109]. Са друге стране, под утицајем и развојем *ES* за планирање технолошких процеса (*CAPP/CAM*), а посебно *STEP* стандардизације [8, 150, 151], прилаз моделирања метролошких примитива, заснива се на моделирању метролошких карактеристика [92–94]. Истраживања у овој дисертацији су заснована на овом прилазу [33, 152]. Глобално говорећи у *CAI* моделу *ES*, метролошке карактеристике (метролошки примитиви) се разматрају на следеће начине: препознавање и издвајање из *CAD* модела,

дефинисање и моделирање [94], а овде истакнут прилаз је такође еволуирао од дефинисања и моделирања [152], преко примене онтологије за дефинисање хијерархије знања за инспекцију [33] и интегрисаног прилаза, који користи дигитални модел производа у интероперабилном окружењу (Autodesk Inventor Profesional 2011, PC-DMIS, Protégé).

3.3.1 Модел базе знања

Концептуални план инспекције представља основу за програмирање мерних машина. На бази искуства, интуиције и знања, инжењер планер инспекције генерише концепт плана за инспекцију на *NUMM*. Овај приступ се данас избегава, а посебно због ограничених могућности интуиције инжењера планера инспекције, када *NUMM* ради у дигиталном окружењу и са великим бројем различитих делова. Полазна основа за новији концепт је коришћење *ES* за генерисање концептуалног плана инспекције. Прва истраживања у овој области су извршена доста давно [22], али су била значајна због тога, што су дефинисала оквир за пројектовање плана инспекције за *NUMM* помоћу *ES*. После тога захваљујући пре свега развоју техника вештачке интелигенције, створене су основе за развој и примену нове генерације *ES*. Основа сваког модела *ES* у овој области је база знања (њена организација, обим и садржај чињеница и хеуристичког знања).



Слика 3.8: Граф базе знања [152]

Она мора садржати неопходна знања и информације о: мерном делу

(*MD*) и његовим толеранцијама, геометријским (*GP*) и метролошким (*MP*) примитивима, секвенцама инспекције (*SI*), конфигурацији мерног сензора (*MS*), *NUMM* (*MM*) и помоћном прибору (*PP*), слика 3.8. Основни кораци у генерисању концептуалног плана инспекције за *NUMM* су:

- анализа и синтеза метролошких задатака (толеранција), а према дигиталном моделу производа (знања из чворова графа: *MD,MP* и *GP*),
- дефинисање координатних система мерења и уравнивања (оријентације) (*MD,MP,SI,MS* и *MM*), представљен на слици 3.7,
- избор конфигурације мерног сензора (пипка) (*SI,MS* и *MM*), и
- дефинисање мерне стратегије (декомпозиција метролошких карактеристика и генерисање геометријских карактеристика, кроз планирање инспекције за њих).

На овај начин, прилаз развоју овог система се заснива на геометријско (*CAD*), технолошко (*CAPP/CAM*), метролошкој (*CAI*) интеграцији, на бази онтологије и правила за декомпозицију. Модел генерише концептуални план инспекције, са следећим елементима:

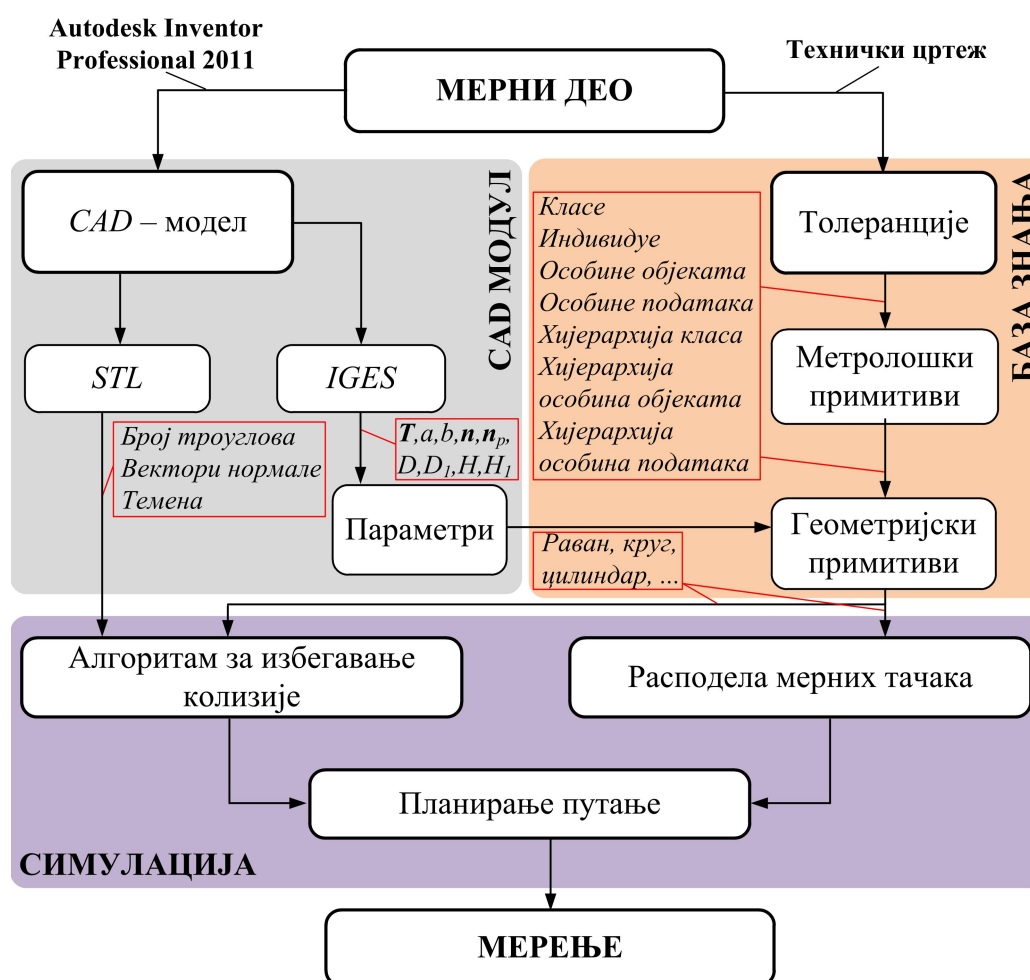
- мерни део са метролошким (геометријским) карактеристикама са секвенцама инспекције,
- координатни систем мерења,
- конфигурацију мерног сензора,
- стезни и помоћни прибор, и,
- потребне карактеристике *NUMM*.

Модел подржава *CAI* систем [153], који је развијен као интелигентни концепт инспекције призматичних делова на мерној машини, који подржава реализацију следећих прилаза:

- мерење (мерни део – *NUMM* – мерни резултати),
- инспекција (мерни део – *CAD* – *NUMM* – резултати инспекције),

- реверзибилно инжењерство (реални или општењени модел дела (резервног дела) – *NUMM – CAD*), и
- планирање инспекције (*CAD – CAI* – план инспекције).

На овај начин, модел се заснива на следећем аксиому: геометријско-технолошко-метролошке интеграције, слика 3.9, што је компатибилно и са најновијим светским прилазима [8].



Слика 3.9: Елементи за изградњу модела базе знања за инспекцију призматичних делова на NUMM

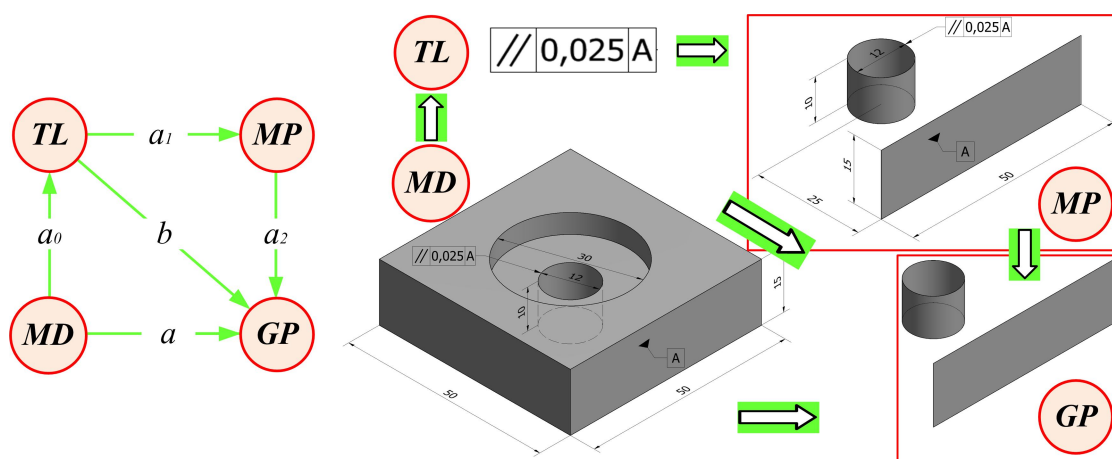
Претходне анализе показују да мерење и инспекција на *NUMM* захтевају широки опсег знања (по ширини и дубини, као општа и специјализована знања), и то:

- знања о обради дела (ради анализе толеранција и дефинисања координатних система за мерење),

- општа знања о толеранцијама (анализа и синтеза метролошких и геометријских карактеристика),
- специфична математичка знања о моделирању и релацијама геометријских или метролошких карактеристика (на пример моделирање кривих линија и површина)
- знање о *NUMM* и принципима њеног рада,
- знања о софтверу инсталисаном на *NUMM*,
- хеуристичка знања о предметној области.

3.3.2 Експериментални пример

Експериментална верификација је обухватила реалан мерни део [154], а за њега је дефинисан граф модела базе знања, са четири чвора и релацијама међу њима, слика 3.10. Чворови су не-терминирани симболи са следећим значењима као ентитетима знања: *MD* – знања о мерном предмету и његовим толеранцијама (*TL*), *MP* – знања о метролошким карактеристикама, *GP* – знања о геометријским карактеристикама за тачно дефинисану метролошку карактеристику. Проста илустрација декомпозиције графа на примеру толеранције паралелности отвора у односу на раван је такође показана на слици 3.10.

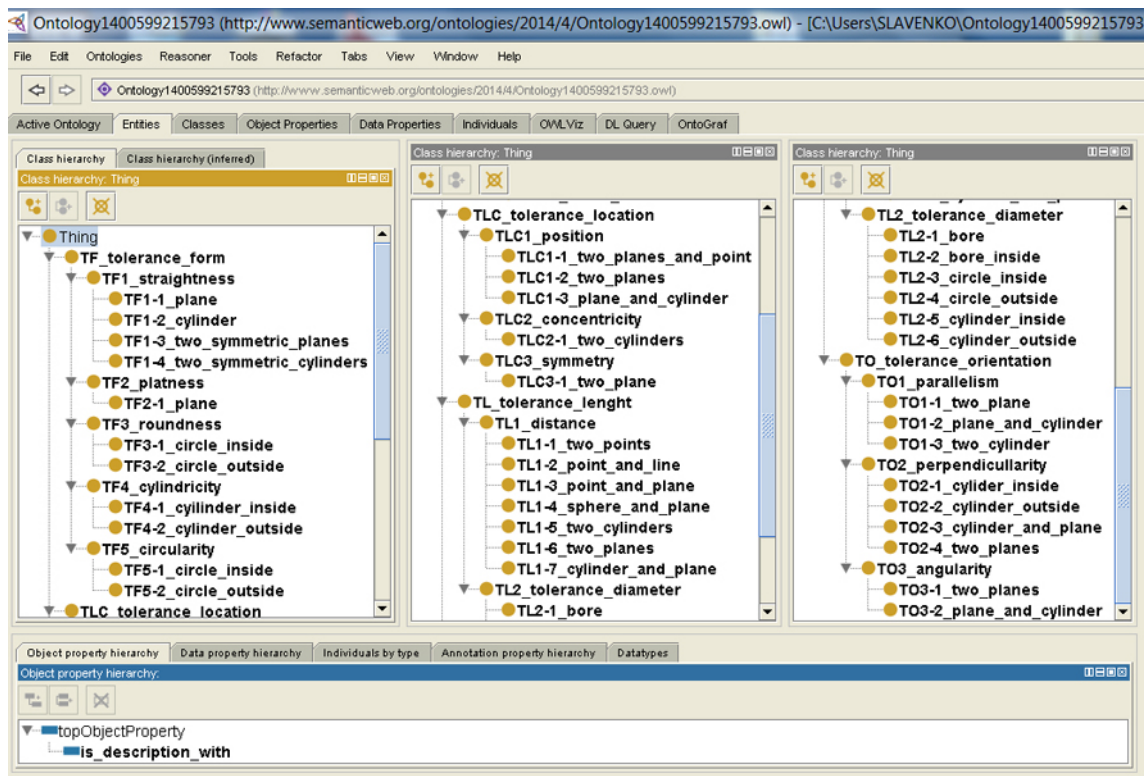


Слика 3.10: Граф базе знања и илустрација његове декомпозиције на простијем CAD моделу дела

Не-терминирани симболи као ентитети знања су повезани терминираним симболима, и то: a_0 (толеранције, карактеристике), a_1 (метролошка карактеристика, карактеристика, толеранције), a_2 (геометријска карактеристика, карактеристике), b (толеранција, геометријска карактеристика, карактеристике), и a (мерни предмет, геометријске карактеристике, карактеристике). Они се представљају као онтолошке структуре са хијерархијским релацијама, којима се дефинишу сви елементи знања за ову област. Тако на пример, релације између $MD - GP$ могу бити: $a_0 - a_1 - a_2$ (линија резоновања за генерисање путање мерног сензора), $a_0 - b$ (линија резоновања за генерисање координата тачака на геометријској карактеристици), и a (линија резоновања за геометријске карактеристике на мерном предмету). Неки од релевантних истраживања за моделирање на бази карактеристика толеранција су дати [8, 150–152], при чему прилаз у овом поглављу интегрише метролошке - геометријске информације из *CAD* дигиталног модела, а геометријске информације су параметри геометријских карактеристика који се преузимају из *IGES* фајла после моделирања призматичног мерног дела у софтверу Autodesk Inventor Professional 2011. Тако се толеранције дефинишу *ISO* стандардом и представљају се помоћу графа који илуструје онтолошку декомпозицију толеранција на метролошке карактеристике, а потом на геометријске карактеристике. На овај начин дефинишемо линију резоновања, а екстракцијом параметара сваку геометријску карактеристику једнозначно описујемо. Такође, на овај начин дефинисана геометријска карактеристика је основа за анализу приступачности пипака мерног сензора, конфигурисање мерног сензора, планирање путање и генерисање протокола мерења за улазне мерне захтеве.

Терминирани симбол a_0 дефинише декомпозицију призматичног мерног предмета на врсте толеранција дефинисане *ISO* стандардом: толеранција дужине (*TL*), толеранција облика (*TF*), толеранција положаја (*TO*) и толеранција локације (*TLC*). Терминирани симбол a_1 дефинише наставак декомпозиције толеранција на специфичне подврсте који су такође дефинисани *ISO* стандардом. На пример толеранција правца се може разложити на следеће подврсте: паралелност (*TO1*), управност (*TO2*) и угао (*TO3*). Терминирани

симбол a_2 такође дефинише наставак декомпозиције толеранција али на више специфичне облике. Ови облици се називају метролошким карактеристикама. Са метролошког аспекта једна метролошка карактеристика се састоји из једног или више геометријских карактеристика. На слици 3.11 дат је само део укупних онтолошких структура развијених помоћу софтвера Protégé, које представљају правила за декомпозицију у општем случају.



Слика 3.11: Правила за декомпозицију графа базе знања у софтверу Protégé

На пример, толеранција $TL1$ састоји се из седам метролошких примитива: $TL1-1$, $TL1-2$, $TL1-3$, $TL1-4$, $TL1-5$, $TL1-6$ и $TL1-7$. Декомпозицијом, сваки од њих се може описати са пет геометријских карактеристика ($GP100$, $GP200$, $GP500$, $GP600$ и $GP700$).

Појам геометријске карактеристике прво је дефинисан у аналитичкој геометрији, да бих на истим основама касније био примењен у инжењерском моделирању. У производном инжењерству овај појам представља базу за дефинисање карактеристика са аспекта пројектовања производа, процеса, инспекције, монтаже, итд [154]. У овом моделу инспекције геометријске карактеристике представљају најнижи ниво дефинисања толеранција или

објекте генерисања тачака мерног сензора на мерном делу. У овом контексту оне ће бити описане са становишта екстракције њихових параметара из *IGES* датотеке за потребе онтолошке базе знања.

Геометријске карактеристике као што су раван, сфера, купа итд., користе се за генерисање и опис свих врста метролошких карактеристика. Свака геометријска карактеристика је једнозначно одређена скупом параметара у односу на локални координатни систем (O_F, X_F, Y_F, Z_F) и координатни систем мерења мерног дела (O_W, X_W, Y_W, Z_W) . Параметри могу бити следећег типа: координате (X, Y, Z) , пречник (D, D_1) , висина (H, H_1) , ширина (a) , дужина (b) , вектор примитива (\mathbf{n}) , параметар пуноће примитива (\mathbf{n}_p) . Вектор \mathbf{n} одређује оријентацију примитива у простору. Позиција примитива је одређена координатама (X_0, Y_0, Z_0) . Параметар пуноће је дефинисан јединичним вектором X -осе карактеристике. Параметар пуноће и вектор карактеристике дефинишу правац приступа пишка мерног сензора при генерисању координате метролошке карактеристике.

Екстракција параметара једног цилиндра, као геометријске карактеристике из *IGES* фајла је могућа на основу познавања његове структуре. Део структуре неопходан за анализу у овом моделу приказан је у табели 3.1.

Табела 3.1: Екстракција параметара из *IGES* датотеке

Ентитет	1	1 2 3	5 6 7	73-80
Линија (генератрикс)	110	X_1, Y_1, Z_1 (почетна тачка)	X_2, Y_2, Z_2 (крајња тачка)	4 (број секвенце)
Линија (оса)	110	X_3, Y_3, Z_3 (почетна тачка)	X_4, Y_4, Z_4 (крајња тачка)	5 (број секвенце)
Површина ротације	120	Секвенца бр. 1 и секвенца бр. 2	α_1, α_2 (почетни и крајњи угао)	3 (број секвенце)
Правац	123	i_1, j_1, k_1 (јединични вектор)		18 (број секвенце)
Правац	123	i_2, j_2, k_2 (јединични вектор)		28 (број секвенце)

Као што је показано на слици 3.12, *IGES* датотека се састоји из пет делова који се могу поделити на: почетни или уводни део, општи део, директоријум, параметарски подаци, завршни део.


```

S      1
1      1
2      2
3      3
...
110    4      0      0      0      0      0      000010000D  7
110    0      0      1      0      0      0          0D      8
110    5      0      0      0      0      0      001010000D  9
110    0      0      1      0      0      0          0D     10
...
406,2,0,12Hcylinder.ipt;          1P      1
143,0,5,2,11,17;                  3P      2
120,9,7,0.0D0,6.28318530717959D0;  5P      3
110,-7.5D0,0.0D0,47.25D0,-7.5D0,0.0D0,-2.25D0;  7P      4
110,0.0D0,0.0D0,-2.25D0,0.0D0,0.0D0,-1.25D0;  9P      5
...
123,0.0D0,0.0D0,1.0D0;            27P     18
i23,-1.0D0,0.0D0,0.0D0;          45P     28
S ...  1G      3D      52P      32          T      1

```

Слика 3.12: Део IGES датотеке цилиндра као геометријског примитива

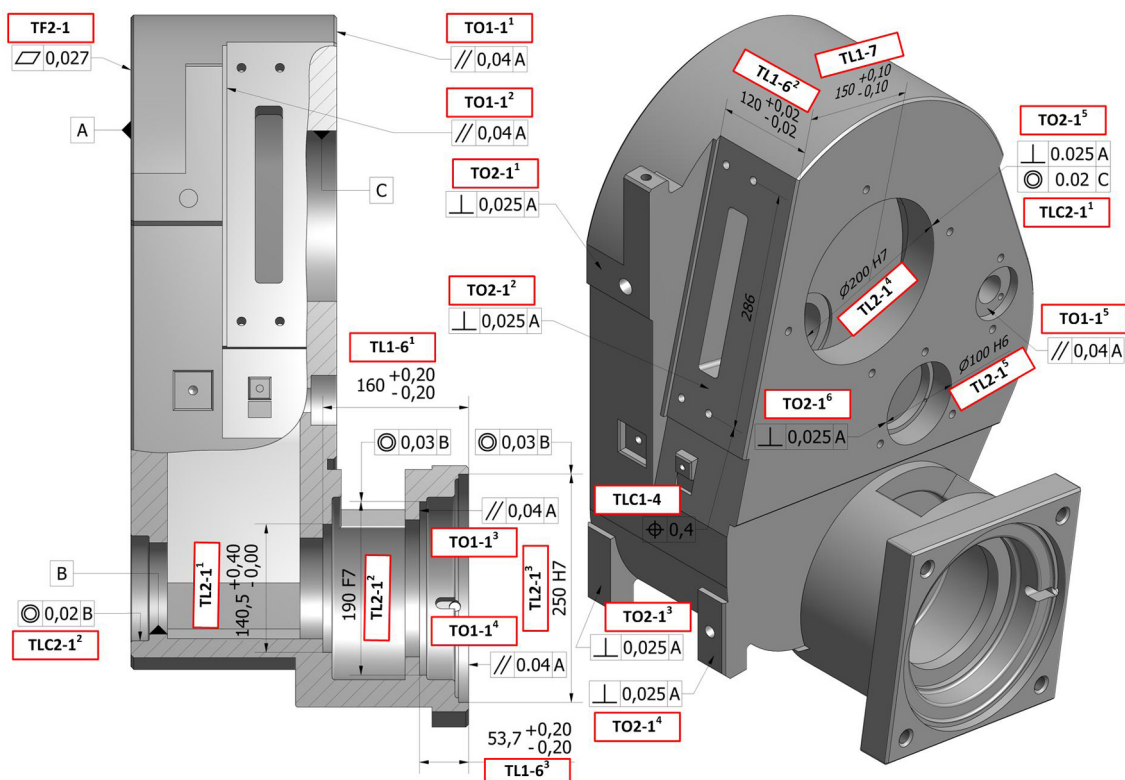
Екстракције параметара на примеру цилиндра се врши на основу броја секвенце ентитета (геометријске карактеристике) и образаца за израчунавање датих у табели 3.2. По истој процедури као за цилиндар извршена је екстракција параметара за остале геометријске карактеристике.

Табела 3.2: Израчунавање параметара

Број секвенце	Параметар цилиндра
4,5	$D = \sqrt{(X_6 - X_1)^2 + (Y_6 - Y_1)^2 + (Z_6 - Z_1)^2}$
5	$X_0 = X_1; Y_0 = Y_1; Z_0 = Z_1;$
5	$D = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}$
18	$\mathbf{n} = [i_1 j_1 k_1]$

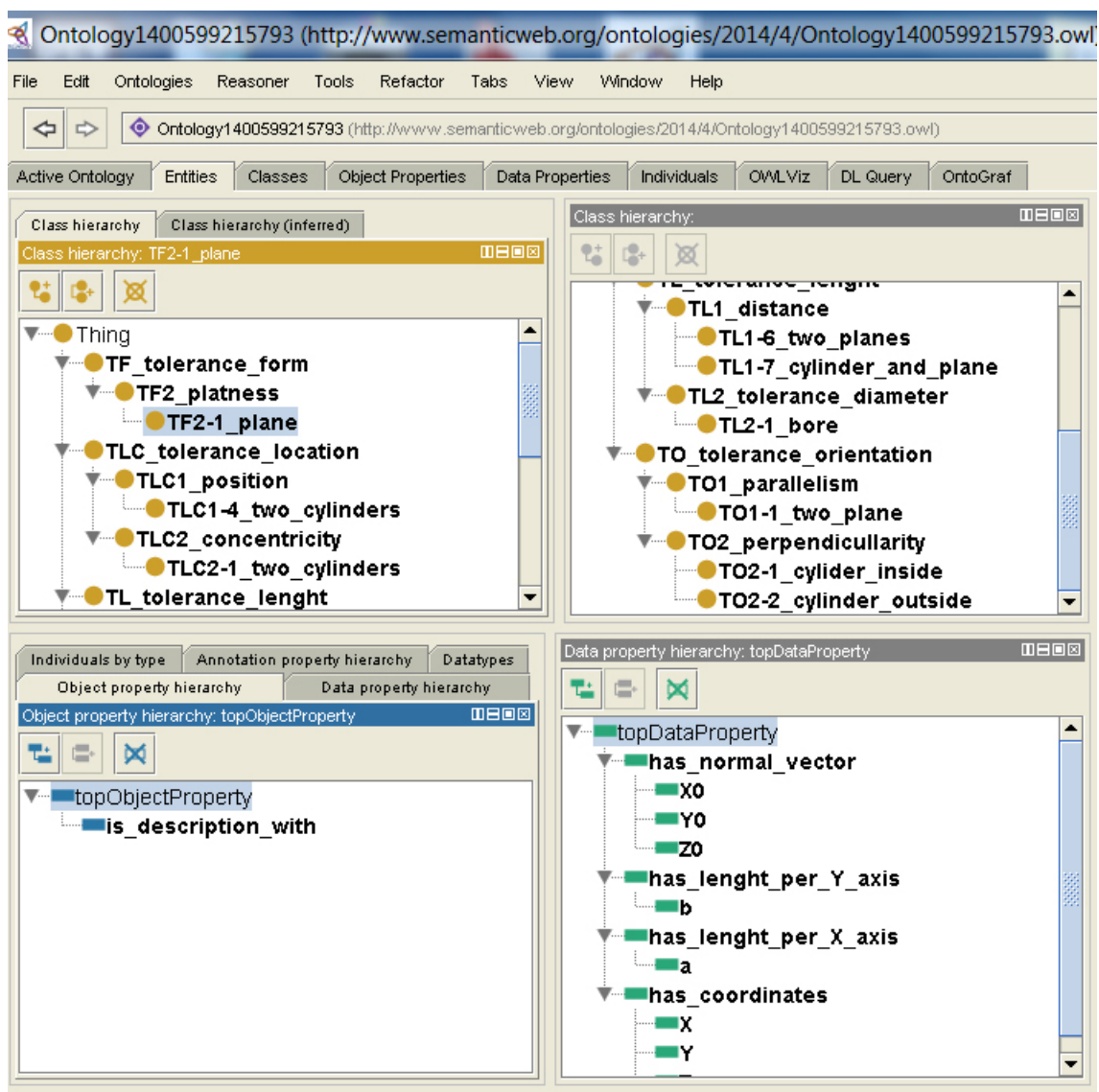
Примарни циљ је декомпозиција призматичног мерног дела на геометријске карактеристике који индиректно, кроз толеранције, учествују у планирању инспекције. Секундарни циљ је декомпозиција толеранција на геометријске карактеристике (GP), а оне са метролошког аспекта дају потпун скуп информација за дефинисање концептуалног плана инспекције. Примена и тестирање напред наведеног концепта базе знања извршена је на примеру реалног метролошког дела под називом кућиште главног вретена струга (слика 3.13). Према предходно изложеном моделу базе знања, толеранције дела су сведене на геометријске карактеристике. Том приликом обухваћене су све метролошке карактеристике, које учествују у креирању толеранција дела. Облици толеранција из којих се састоји мерни део су: толеранција дужинских

мера (TL), толеранције облика (TF), толеранције правца (TO) и толеранције положаја (TLC). Толеранција дужинских мера се састоји из четири толеранције дужина ($TL1-61$, $TL1-62$, $TL1-62$ и $TL1-7$) и пет толеранција пречника ($TL2-11$, $TL2-12$, $TL2-13$, $TL2-14$ и $TL2-15$). Толеранција облика је $TF2-1$, док су толеранције правца означене са $TO2-11$, $TO2-12$, $TO2-13$, $TO2-14$, $TO2-11$ и $TO2-12$. Толеранција положаја је дата са ознаком $TLC1-4$.



Слика 3.13: Реалан метролошки део

На слици 3.14 је показан део декомпозиције на онтолошку структуру (хијерархија класа, хијерархија особина објекта и хијерархија особина података) призматичног мерног дела на геометријске карактеристике. Почело се од декомпозиције предмета на опште облике толеранција дефинисане $ISO 1101$ стандардом. У овом случају су то толеранције TL , TF , TO и TLC . Ови облици толеранција се даље декомпонују на специфичне облике толеранција, такође дефинисане стандардом. Поштовање ове процедуре је неопходно због повезивања специфичних облика толеранција са толеранцијама које се појављују у пракси. Следећа итерација се односи на декомпозицију на више специфичне облике толеранција – облике који се сусрећу на цртежу дела.

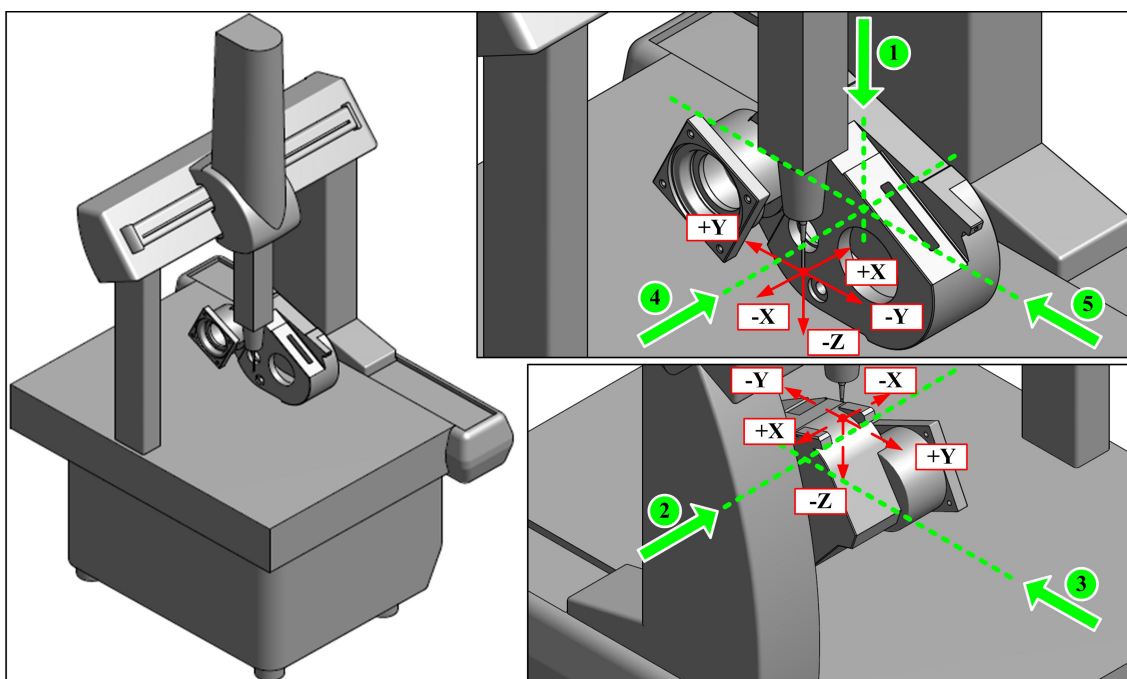


Слика 3.14: Декомпозиција реалног метролошког дела на метролошке примитиве

Метролошка карактеристика се састоји из једног или више геометријских карактеристика и представљају везу између облика толеранција и геометријских карактеристика из којих се састоји мерни део. Другим речима, ако се зна да је једини прави носилац метролошких информација технички пртеж дела, термин метролошка карактеристика се уводи као веза између толеранција и геометрије дела чији носилац је дигитални *CAD* модел дела. Софтвери за *CAD* моделирање имају могућност уноса ограниченог броја облика толеранција. Ова чињеница показује да се *CAD* модел дела у процесу планирања инспекције може користити само са становишта геометрије. У

прилог овом је и чињеница да софтвери за *NUMM* учитавају геометријске информације из *IGES* фајла.

Планирање инспекције призматичних делова на *NUMM* у зависности од броја, позиције и оријентације мерних пипака постављених у мерни сензор се углавном врши из три међусобно ортогонална правца. Ова предпоставка служи као основа за развој метода одређивања редоследа инспекције метролошких карактеристика код мерења призматичних делова на *NUMM*. Из наведена три правца могу се извести шест могућих смерова приступа мерног пипка (*SPP*). С обзиром да је мерни део неопходно поставити на сто машине један смер приступа мерног пипка се изоставља тако да преостаје пет: *SPP 1*, *SPP 2*, *SPP 3*, *SPP 4* и *SPP 5* (слика 3.15).



Слика 3.15: Правци приступа мерног сензора за троосну *NUMM*

Сваки од ових смерова има смер који одговара неком од смерова координатног система *NUMM*, и то: *SPP 1* одговара смеру $-Z$, *SPP 2* одговара смеру $-X$, *SPP 3* одговара смеру $-Y$, *SPP 4* одговара смеру $+X$, *SPP 5* = $+Y$. На нивоу једног геометријског примитива, *SPP* одређују вектори \mathbf{n} и \mathbf{n}_p . За инспекцију једног примитива правци могу бити *SPP 1*, *SPP 2*, *SPP 3*, *SPP 4* и *SPP 5*. Специјалан случај је када се правац вектора \mathbf{n} не поклапа са ни једним од наведених *SPP*. Тада се кретање мерног пипка разлаже на кретање

у два *SPP*. Први је најприближнији (критеријум: најмањи угао) од унапред наведених пет *SPP* за кретање непосредно испред геометријског примитива, а други – n примитива. Овим методом се аутоматски дефинишу секвенце инспекције по *SPP* за радни предмет.

3.4 Закључне напомене

На основу спроведене анализе тренутног стања методологија за развој инжењерске онтологије предложен је метод развоја инжењерске онтологије на концептуалном нивоу. Осим за поновну употребу и дељење знања једног домена, развијени метод дефинише развој онтологије за потребе изградње базе знања као једне од основних компоненти интелигентног система за инспекцију призматичних делова на *NUMM*. Дефинисањем инжењерске онтологије уз помоћ представљеног метода дефинише се скуп термина, који пресликан у домен изградње база знања представља скуп који се састоји из основних компоненти базе знања тј. ентитета и релација између ентитета. Класе инжењерске онтологије су ентитети базе знања, а релације између ентитета су особине инжењерске онтологије. Експлицитна примена метода је поновна употреба, дељење података и логичка структура базе знања за интелигентну инспекцију призматичних делова на *NUMM*. Специфичност овог приступа се огледа у могућности да се сваки нови призматични део опише помоћу већ дефинисаних компоненти инжењерске онтологије.

Резултат предложеног метода је итеративан процес развоја онтологије за домен координатне метрологије у пет корака. Имплементација метода у софтверу Protégé извршена је на примеру једног мерног дела и показује да је сасвим оправдан представљени приступ развоја инжењерске онтологије за домен координатне метрологије и инспекцију призматичних делова на *NUMM*.

Генерисање и примена униформног плана инспекције на *NUMM* представља специјални проблем, који зависи од метролошке комплексности призматичних делова, интуиције и искуственог знања оног ко планира инспекцију. Спроведена истраживања дају модел базе знања за планирање инспекције на *NUMM* у циљу решавања овог проблема и развоја интелигентног система за планирање инспекције. База знања је дефинисана ентитетима

и релацијама између њих. Резултат овог приступа је и дефинисање припадности геометријских карактеристика појединим облицима толеранција кроз претраживање графа модела базе знања. Претраживањем графа, општи облици толеранција дефинисани стандардом се повезују са геометријским карактеристикама тако да је могуће дефинисати метролошке секвенце и планирати путању мерног сензора.

4 РАЗВИЈЕНИ МОДЕЛ ПЛАНИРАЊА ИНСПЕКЦИЈЕ ПРИЗМАТИЧНИХ ДЕЛОВА НА МЕРНОЈ МАШИНИ

4.1 Уводне напомене

Дефинисањем веза између толеранција и геометрије у напред наведена два поглавља, дефинисане су улазне информације за модел инспекције призматичних делова на *NUMM* базиран на основним геометријским примитивима. Поред потребних информација о примитивима и њиховој вези са толеранцијама, један модел *off – line* планирања инспекције *PD* поседује још неке елементе који су предуслов за његов развој. У такве елементе спадају:

- координатни системи мерења,
- конфигурирање мерних пипака,
- принцип избегавања колизије,
- модул за метролошко препознавање *PD*,
- локални план инспекције, и
- глобални план инспекције.

Као што је познато, координатни системи при мерењу на *NUMM* могу бити везани за саму *NUMM*, затим за мерни сензор, мерни део, као и за мерни задатак. Отуда произилази устаљена подела координатних система на:

- координатни систем *NUMM*,

- координатни систем мерног сензора,
- координатни систем мерног дела,
- координатни систем мерног задатка.

Улога координатних система у моделу инспекције PD се не разликује од њихове примарне улоге у другим природним наукама (математика, физика, астрономија, итд.), а то је довођење у везу или описивање скупова координата. У овом случају реч је о координатама мерних тачака и осталих тачака које су саставни део путање мерног пипка, а које се могу назвати чворне тачке.

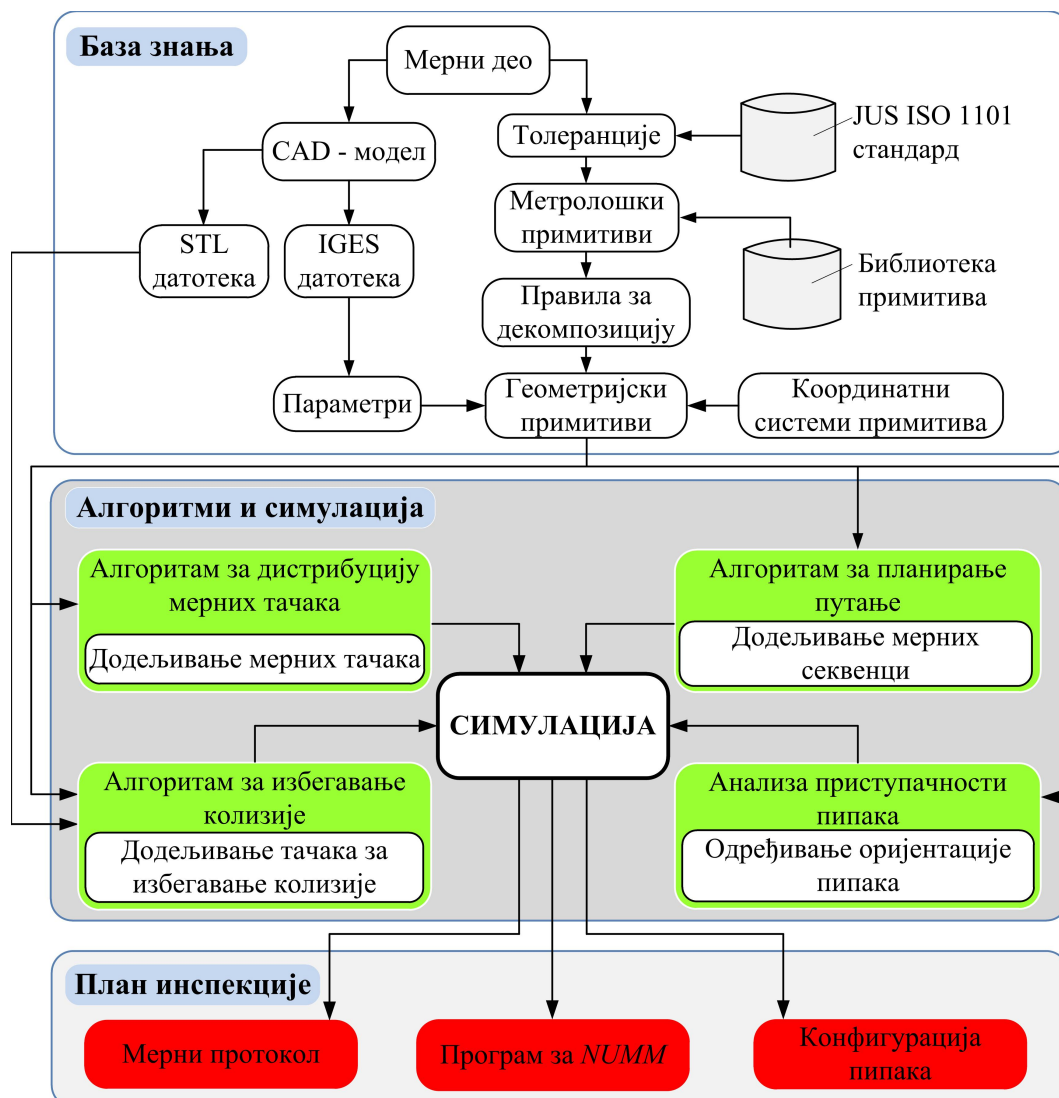
Принцип избегавања колизије у контексту *off-line* планирања инспекције PD остварује слободан пут мерног сензора при преласку са једног на други примитив и јавља се као последица аутоматског генерисања мерне путање. Наиме, при ручном програмирању путање визуелно се прати положај пипка и мерног предмета и тако води пипак по путањи без препрека. За ручно вођење пипка потребна је интуиција планера инспекције, док знање планера може утицати да пут буде дужи или краћи.

Конфигурисање мерних пипака произилази из анализе приступачности мерног сензора одређеном примитиву или групи примитива са тенденцијом да број измена мерних пипака буде минималан, а тиме и минимално време измене пипака.

Модул за метролошко препознавање је базирано на компјутером подржаном пројектовању, CAD моделу PD у интерном запису ($IGES$ датотека) и моделирању примитива за инспекцију. Метролошко препознавање је у ствари свођење геометријских примитива на метролошке посредством толеранција што је урађено уз помоћ онтолошке базе знања у напред датом поглављу, док моделирање примитива за инспекцију обухвата дефинисање параметара примитива тако да сваки од њих буде једнозначно одређен. Моделирани примитиви представљају основу за развој локалног плана инспекције. Локални план инспекције дефинише аутоматску дистрибуцију мерних тачака за сваки примитив засебно у зависности од параметара којим је једнозначно одређен. За разлику од локалног, глобални план инспекције разматра два или више примитива повезујући их моделом планирања путање мерног сензора. Тако се

на излазу добија иницијална путања мерног сензора.

Процес инспекције PD заснован на интелигентном интегрисаном моделу планирања инспекције PD на $NUMM$ је дат на слици 4.1.



Слика 4.1: Интелигентни концепт инспекције PD на $NUMM$

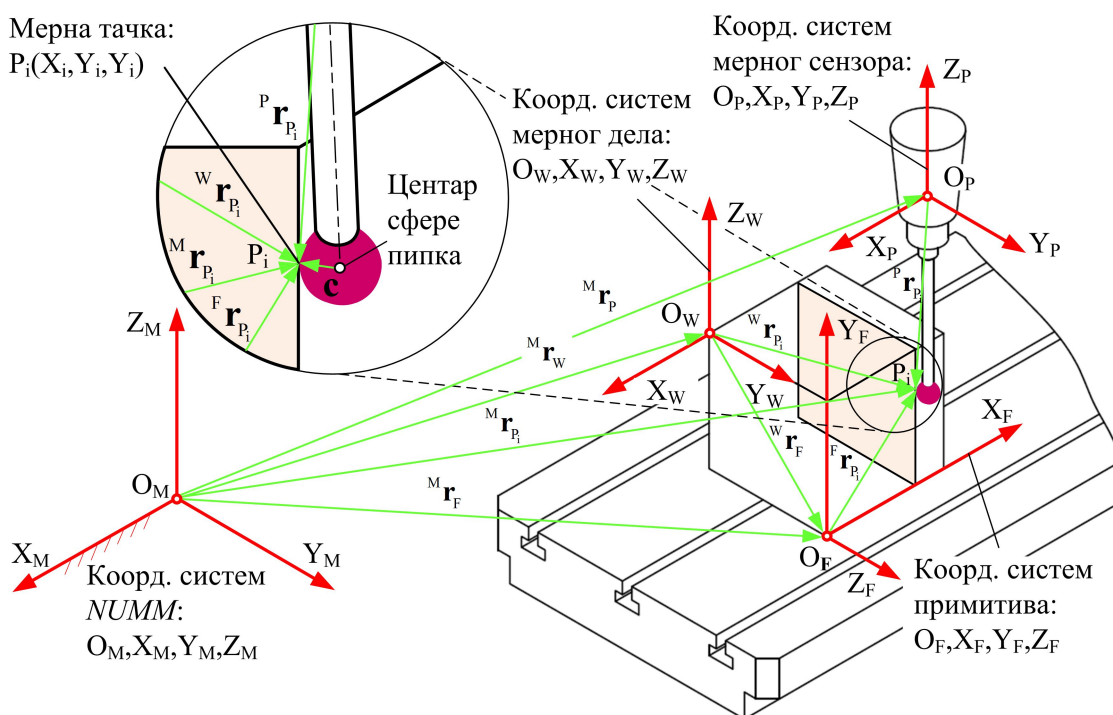
Основна разлика у односу на досада развијене моделе је у нивоу постигнуте аутоматизације и аутономности процеса планирања инспекције. Неминовно учешће човека у већини операција одлучивања снижава степен аутоматизације и аутономности. Ограничења примене су такође један од критеријума по којима се модели могу јасно разликовати. Тако, постоје модели за ротационе и призматичне делове, као и слободне површине. Већина развијених софтвера за планирање инспекције, није отворена за доградњу од стране корисника. Ово се посебно односи на немогућност оптимизације мерне

путање применом неке од техника *AI* (фази логика, Хопфилдове мреже, теорија ројева, итд.). Путања коју софтвер даје је фиксна за одабрану стратегију мерења, а толеранције се уносе мануелно. Веза између геометрије (примитива) и толеранција *PD* не постоји у неком облику записа у процесу планирања инспекције.

Главна одлика модела је отворен систем за доградњу који ће интегрисати све елементе процеса мерења (дистрибуцију мерних тачака, конфигурисање пипака, избегавање колизије итд.) уз минимално неопходно учешће човека са циљем постизања минималног времена мерења *PD* на *NUMM*.

4.2 Математички модел

Саставни део модела *off-line* планирања инспекције *PD* на *NUMM* је математички модел показан на слици 4.2. Његова основна улога је у дефинисању веза између координатних система мерне машине, мерног дела и примитива. Сваки произвођач софтвера за *NUMM* има развијен и имплементиран свој математички модел.



Слика 4.2: Математички модел планирања инспекције *PD* на *NUMM*

Уз подршку до данас развијених софтвера за инспекцију на *NUMM*

на бази *CAD* представљања *PD* принцип инспекције се спроводи на основу једначине 4.1:

$${}^M \mathbf{r}_{P_i} = {}^M \mathbf{r}_W + {}^W \mathbf{r}_{P_i} \quad (4.1)$$

где је:

${}^M \mathbf{r}_{P_i}$ - вектор положаја мерне тачке у *KS* мерне машине,

${}^M \mathbf{r}_W$ - вектор положаја *KS* мерног предмета у *KS* мерне машине,

${}^W \mathbf{r}_{P_i}$ - вектор положаја мерне тачке у *KS* мерног предмета.

Принцип инспекције *PD* по моделу развијеном у овом поглављу се заснива на једначини 4.2:

$${}^M \mathbf{r}_{P_i} = {}^M \mathbf{r}_W + {}^W \mathbf{r}_F + {}^F \mathbf{r}_{P_i} = {}^M \mathbf{r}_F + {}^F \mathbf{r}_{P_i} \quad (4.2)$$

где је:

${}^W \mathbf{r}_F$ - вектор положаја метролошког примитива у *KS* мерног предмета,

${}^F \mathbf{r}_{P_i}$ - вектор положаја мерне тачке у *KS* метролошког примитива,

${}^M \mathbf{r}_F$ - вектор положаја метролошког примитива у *KS* мерне машине.

Преостале обележене величине које се користе у процесу калибрације мерних пипака, односно успостављању везе између координатних система (*KS*) (O_P, X_P, Y_P, Z_P) и (O_M, X_M, Y_M, Z_M) су:

${}^M \mathbf{r}_P$ - вектор положаја *KS* мерног сензора,

${}^P \mathbf{r}_{P_i}$ - вектор положаја мерне тачке у *KS* мерног сензора,

\mathbf{c} - вектор корекције (повезује центар сфере пипка и мерну тачку).

Посматрајући једначине 4.1 и 4.2 уочавамо разлику која се састоји у разлагању вектора ${}^W \mathbf{r}_{P_i}$ на векторски збир ${}^W \mathbf{r}_F + {}^F \mathbf{r}_{P_i}$. Уочена разлика је последица увођења *KS* примитива односно чињенице да је модел инспекције заснован на примитивима ради лакше метролошке идентификације засноване на *CAD*

моделу PD . Координате мерних тачака $P_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$, где је N – жељени број мерних тачака, одређене су у односу на KS примитива (O_F, X_F, Y_F, Z_F) вектором 4.3:

$${}^F \mathbf{r}_{P_i} = x_{FP_i} \vec{i} + y_{FP_i} \vec{j} + z_{FP_i} \vec{k} \quad (4.3)$$

Ове координате су унапред познате и генерисане на основу параметара геометријских примитива преузетих из $IGES$ фајла и метода дистрибуције мерних тачака. За дате векторе позиције мерних тачака ${}^F \mathbf{r}_{P_i}$ потребно је одредити ${}^M \mathbf{r}_{P_i}$ - вектор положаја мерне тачке у KS мерне машине, а потом на основу једначине 4.2 одредити координате мерних тачака у односу на KS $NUMM$. Вектор ${}^M \mathbf{r}_{P_i}$ се одређује формирањем хомогених координата односно матрице ${}^M T$. Положај и оријентација примитива у односу на KS радног предмета може се одредити матрицом ${}^W T$:

$${}^W T = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^W R & & & {}^M \mathbf{r}_F \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} i_{Fx} & j_{Fx} & k_{Fx} & x_W \\ i_{Fy} & j_{Fy} & k_{Fy} & y_W \\ i_{Fz} & j_{Fz} & k_{Fz} & z_W \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.4)$$

Положај и оријентација радног предмета у односу на KS машине може се одредити матрицом 4.5:

$${}^M T = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^M R & & & {}^M \mathbf{r}_W \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} i_{Wx} & j_{Wx} & k_{Wx} & x_M \\ i_{Wy} & j_{Wy} & k_{Wy} & y_M \\ i_{Wz} & j_{Wz} & k_{Wz} & z_M \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.5)$$

Множењем 4.4 и 4.5 добија се матрица ${}^M T$ дата са матрицом 4.6:

$${}^M T = {}^M T \cdot {}^W T = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^M R & & & {}^M \mathbf{r}_F \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} i_{MFx} & j_{MFx} & k_{MFx} & x_{MF} \\ i_{MFy} & j_{MFy} & k_{MFy} & y_{MF} \\ i_{MFz} & j_{MFz} & k_{MFz} & z_{MF} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (4.6)$$

Из 4.6 следи

$${}^M\mathbf{r}_F = x_{MF}\vec{i} + y_{MF}\vec{j} + z_{MF}\vec{k} \quad (4.7)$$

Заменом 4.3 и 4.7 у 4.2 следи

$${}^M\mathbf{r}_{P_i} = (x_{MF} + x_{FP_i})\vec{i} + (y_{MF} + y_{FP_i})\vec{j} + (z_{MF} + z_{FP_i})\vec{k} \quad (4.8)$$

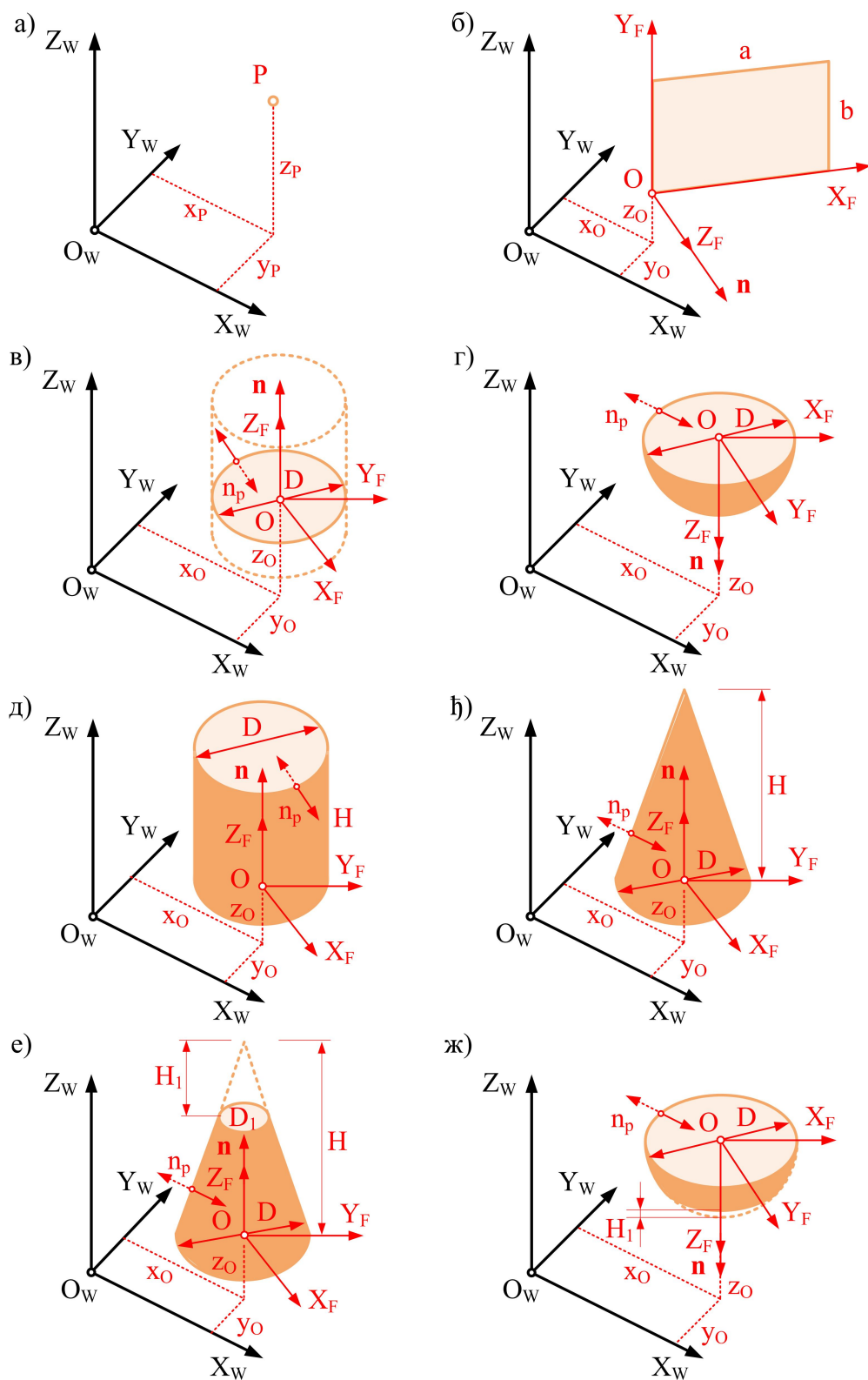
Овом процедуром се одређује вектор положаја мерне тачке у KS мерне машине за i – ту мерну тачку уколико су познати вектори: ${}^M\mathbf{r}_W$, ${}^W\mathbf{r}_F$ и ${}^F\mathbf{r}_{P_i}$, и $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$. Вектор ${}^W\mathbf{r}_F$ дефинише одабир KS мерног дела, а вектор ${}^M\mathbf{r}_W$ положај дела на радном столу $NUMM$.

4.3 Моделирање примитива за инспекцију

Моделирање примитива за инспекцију је базирано на основним геометријским примитивима и њиховим параметрима. Геометријски примитиви обухваћени овим моделирањем су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа и зарубљена полусфера (слика 4.3).

Као што је речено параметри примитива једнозначно одређују сваки примитив. Дефинисање параметара примитива је извршено тако да се у потпуности опише њихова геометрија као и то да ли је примитив пун или шупаљ. Дефинисање пуног и шупљег примитива се врши на основу вектора пуноће примитива који ће бити детаљно објашњен у наставку, а који даје информацију да ли се инспекција датог примитива врши изнутра или споља. Дефинисани параметри примитива су основ за развој алгоритама као што су алгоритама за дистрибуцију мерних тачака, избегавање колизије и планирање путање где се поред њих користе и онтолошки дефинисане везе примитива и прописаних толеранција.

Моделирање примитива за инспекцију је значајно и са аспекта оптимизације применом колоније мрава као и за дефинисање зона колизије. Иницијална путања добијена на основу информација (параметара) о примитивима је предмет оптимизације применом колоније мрава.



Слика 4.3: Базни геометријски примитиви и њихови параметри: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; њ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера

Приказ ових параметара у општем случају је показан у табели 4.1.

Табела 4.1: Параметри примитива

РБ	Примитив	Параметри								
		${}^W_F T$	KS примитива							
			\mathbf{n}	D	\mathbf{n}_p	H	D_1	H_1	a	b
1	Тачка	×								
2	Раван	×	×						×	×
3	Круг	×	×	×	×					
4	Полусфера	×	×	×	×					
5	Цилиндар	×	×	×	×	×				
6	Купа	×	×	×	×	×				
7	Зарубљена купа	×	×	×	×	×	×	×		
8	Зарубљена полусфера	×	×	×	×		×	×		

Појам геометријског примитива прво је дефинисан у аналитичкој геометрији, да би на истим основама касније био примењен у инжењерском моделирању. У координатној метрологији овај појам представља базу за дефинисање - моделирање примитива за инспекцију са аспеката геометрије и толеранција. У овом моделирању, геометријски примитив представља најнижи ниво дефинисања толеранције или објекат генерисања тачака мерног сензора на мерном делу. Сваки геометријски примитив је једнозначно одређена локалним координатним системом (O_F, X_F, Y_F, Z_F) и скупом параметара у односу на њега. Ови параметри могу бити следећег типа: већи пречник (D), мањи пречник (D_1) висина (H), висина сегмента (H_1), ширина (a), дужина (b), вектор нормале примитива (\mathbf{n}), вектор пуноће примитива (\mathbf{n}_p). Вектор \mathbf{n} одређује орјентацију примитива у простору. Параметар пуноће \mathbf{n}_p је дефинисан јединичним вектором x -осе примитива. Вектор пуноће дат са $\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ дефинише пун, а $\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ празан примитив. Параметар пуноће и вектор нормале дефинишу правац приступа мерног сензора при генерисању његове путање. KS примитива (O_F, X_F, Y_F, Z_F) је одређен у односу на KS дела (O_W, X_W, Y_W, Z_W) параметрима датим као елементи матрице ${}^W_F T$.

4.4 Дистрибуција мерних тачака

Пример дистрибуције мерних тачака са становишта функције трошкова је дата у [155]. Међутим, у тако моделираној функцији трошкова компонента

трошкова везана за планирање мерне стратегије и дистрибуцију мерних тачака није константа. Наиме, она зависи од потребног времена за планирање инспекције које зависи од тога да ли се процес планирања мерења обавља аутоматски или мануелно.

Приступу дефинисању броја мерних тачака помоћу фази логике су дати у [92, 156]. Према [92] главни критеријуми за дефинисање броја мерних тачака су мерна површина примитива, квалитет толеранције и тачност машине.

С обзиром на тачност *NUMM* и релативно мале габарите мерних делова (мерне површине примитива) за нас је главни критеријум квалитет толеранција. За жељени број мерних тачака и параметре примитива на улазу, на основу модела дистрибуције мерних тачака, који ће бити изложен, аутоматски се на излазу добијају дистрибуиране мерне тачке. При томе жељени број тачака може бити било који број што омогућава између осталог и мерење толеранција облика као што су кружност, цилиндричност итд. Теоријска илустрација метода дистрибуције тачака је извршена за број тачака $N=10$ за све примитиве, док су реална мерења остварена за бројеве тачака препоручене у [157].

Дистрибуција мерних тачака (*DMT*) у овој дисертацији је базирана на *Hammersly*-овој секвенци [158], за израчување координата мерних тачака дуж две осе метролошког примитива датих изразом 4.9.

$$s_i = \frac{i}{N}$$

$$t_i = \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \quad (4.9)$$

где је константа $k = \log_2 N$ и као што је речено N - жељени број мерних тачака, за $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$ и *Mod 2* - математички оператор чији резултат је остатак дељења израза са два. Према *Hammersly*-у координата која одговара x -оси обележава се са s_i , док се по y -оси обележава са t_i .

Првобитно развијен алгоритам се односи на $2D$ примитиве док касније, узимањем у обзир и треће осе алгоритам разматра и $3D$ примитива као што су купа и полусфера. Међутим, појам треће координате творац за $3D$ примитиве уводи посредно преко $2D$ пројектовањем мерних тачака и обележава их као w_i . Обзиром да је приоритет аутоматска дистрибуција мерних тачака,

овај метод се у погледу тачности и опсега толерисања PD у индустрији данас показао као задовољавајући. Са становишта мерне несигурности аутор алгоритма наводи битно унапређење у односу на униформну и случајну расподелу мерних тачака. Секвенца је примењива за дистрибуцију мерних тачака само за основне геометријске примитиве не и за скулпторске површине попут алгоритма изложеног у [159].

Модификовањем *Hammersly*-еве секвенце, у овом поглављу, изведена је дистрибуција мерних тачака за различите геометријске примитиве који учествују у креирању толеранција PD . За дефинисање дистрибуција мерних тачака за један примитив користи се Декартов $KS (O_F, X_F, Y_F, Z_F)$ и поларно-цилиндрични $KS (O'_F, X'_F, Y'_F, Z'_F)$. Координате у Декартовом KS су обележене са $P_i(s_i, t_i, w_i)$, а у поларно-цилиндричном KS $P_i(s'_i, t'_i, w'_i)$. Употреба два типа координата је у складу са KS који се могу користити на $NUMM$ и тако олакшати програмирање при инспекцији.

Обрасци за израчунавање координата тачака су следећи:

- Раван (под б)):

$$\begin{aligned} s_i &= \frac{i}{N} \cdot a \\ t_i &= \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot b \\ w_i &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

где су: $a[mm]$ - вредност ограничења равни по x -оси; $b[mm]$ - вредност ограничења равни по y -оси.

- Круг (под в)):

$$\begin{aligned} s_i &= s'_i \cos(t_i) \\ t_i &= s'_i \sin(t_i) \\ w_i &= 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

При чему је: $s'_i = R$ и $t'_i = \frac{i}{N} \cdot 360^\circ$. Ове вредности представљају вредности координата у поларно-цилиндричном KS .

- Полусфера (под г):

$$\begin{aligned}
 s_i &= \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \cos \left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \\
 t_i &= \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R \right)^2} \cdot \sin \left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ \right) \quad (4.12) \\
 w_i &= \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R
 \end{aligned}$$

где је: $R[mm]$ - полупречник сфере.

- Цилиндар (под д):

$$\begin{aligned}
 s_i &= R \cdot \cos \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i \right) \\
 t_i &= R \cdot \sin \left(-\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} \cdot i \right) \quad (4.13) \\
 w_i &= \left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot h
 \end{aligned}$$

где је: $h[mm]$ - висина цилиндра.

- Купа (под ђ). У поларно-цилиндричним координатама:

$$\begin{aligned}
 s'_i &= \sqrt{\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right) \cdot R} \\
 t'_i &= \frac{i}{N} \cdot 360^\circ \quad (4.14) \\
 w'_i &= (R - s'_i) \frac{h}{R}
 \end{aligned}$$

где је: $R[mm]$ - полупречник основе купе; $h[mm]$ - висина купе. У Декартовим координатама:

$$\begin{aligned}
 s_i &= s'_i \cos t'_i \\
 t_i &= s'_i \sin t'_i \quad (4.15) \\
 w_i &= w'_i
 \end{aligned}$$

- Зарубљена купа (под е)). У поларно-цилиндричним координатама:

$$\begin{aligned}
 s'_i &= R_1 + \sqrt{\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j}\right] \text{Mod} 2\right) \cdot 2^{-(j+1)}\right) \cdot (R - R_1)} \\
 t'_i &= \frac{i}{N} \cdot 360^\circ \\
 w'_i &= (R - s'_i) \frac{h_1}{R_1}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

где је: $R_1[mm]$ - полупречник мање основе купе; $h_1[mm]$ - висина одсечка купе. У Декартовом KS координате се израчунавају као 4.15.

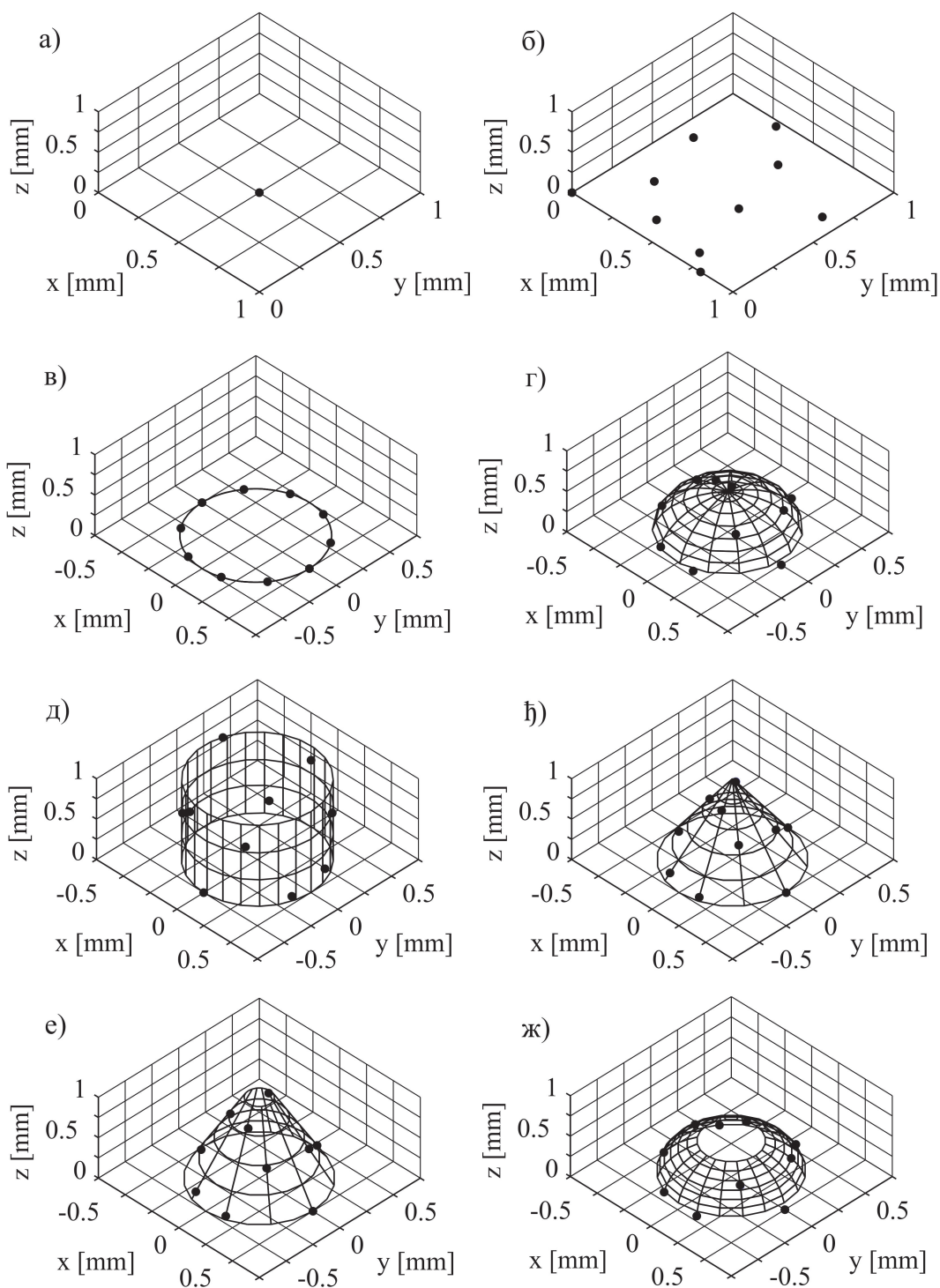
- Зарубљена полусфера (под ж)): s_i, t_i као за полусферу и

$$\begin{aligned}
 s_i &= \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j}\right] \text{Mod} 2\right) \cdot 2^{-(j+1)}\right) \cdot R\right)^2 \cdot \cos\left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ\right)} \\
 t_i &= \sqrt{R^2 - \left(\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j}\right] \text{Mod} 2\right) \cdot 2^{-(j+1)}\right) \cdot R\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{i}{N} \cdot 360^\circ\right)} \\
 w_i &= R_1 + \sqrt{\left(\sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j}\right] \text{Mod} 2\right) \cdot 2^{-(j+1)}\right) \cdot (R - R_1)}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

где је: $h_1[mm]$ - висина одсечка полусфере.

Координате мерних тачака $P_i(x_i, y_i, z_i)$ на бази DMT приказане су на слици 4.4. Дистрибуција је изведена за број мерних тачака $N = 10$ за основне геометријске примитиве као што су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа, зарубљена полусфера. Изложени обрасци за дистрибуцију су подложни промени броја мерних тачака тј. израчунавање се може извршити за било које N . Тако, метод дистрибуције нуди широке могућности инспекције у погледу захтеване тачности PD .

Два су главна разлога за одабир ове стратегије дистрибуције мерних тачака. Први и главни разлог је тачност односно утицај расподеле тачака на тачност мерења. На основу резултата аутора *Lee*, датих у раду [158], изабрана стратегија у овом раду у односу на униформну и случајну стратегију расподеле мерних тачака има већу тачност. До закључка се дошло поређењем *Root Mean Square Error (RMSE)* за различите примитиве.

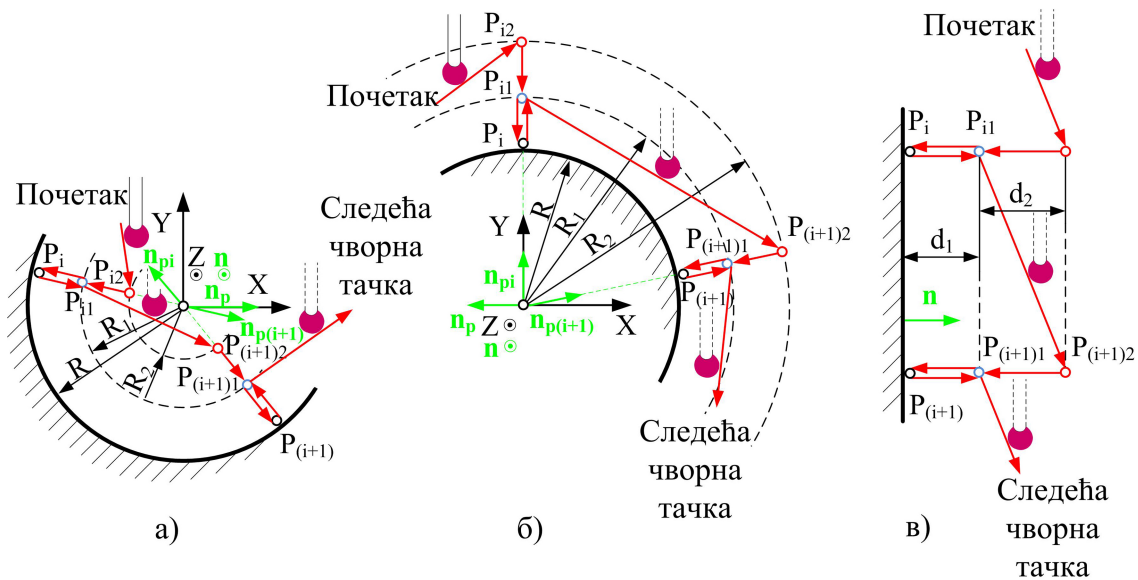


Слика 4.4: Дистрибуција мерних тачака: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; е) купа; ж) зарубљена купа; з) зарубљена полусфера.

Други разлог је аутоматски аспект. Наиме за жељени број мерних тачака и параметре примитива на улазу, аутоматски се на излазу добијају дистрибуиране мерне тачке.

4.5 Анализа приступачности мерног сензора

Из метода *DMT* у преходном поглављу одређене су координате мерних тачака: $P_i(x_i, y_i, z_i)$, $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$, ..., $P_{N-1}(x_{N-1}, y_{N-1}, z_{N-1})$ за $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$, у односу на *KS* примитива O_F, X_F, Y_F, Z_F . Да би се извршила инспекција једног примитива неопходно је спровести анализу приступачности мерног сензора (*APMS*). Она обухвата одређивање још два скупа тачака и то $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ за $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$, као и дефинисање вектора пуноће примитива иако је исти већ уведен. Скуп тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ представља тачке у којима се прелази из брзог у спори ход *NUMM*. Растојање које пипак пређе између i -те тачке, $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_i(x_i, y_i, z_i)$ је представљено са d_1 - пут спорог хода, а растојање између i -те тачке $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ и $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ је d_2 - пут брзог хода. Овим приступом дефинисања скупова тачака и ходова спроводи се *APMS* тј. избегава колизија између једног примитива *PD* и мерног пипка. Код инспекције *PD* уочавају се три карактеристична случаја за дефинисање скупова тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$. Они су показани на слици 4.5.



Слика 4.5: Принцип генерисања тачака P_{i1} и P_{i2} на основу тачака P_i : а) конкавна цилиндрична површина; б) конвексна цилиндрична површина; в) равна површина.

Као што је речено вектор пуноће примитива је уведен као параметар у

виду вектора за пун и шупаљ примитив. Правац вектора пуноће је дефинисан тако да се поклапа са правцем x -осе примитива, а смер у односу на x -осу може бити позитиван или негативан што дефинише пуноћу примитива. Процедура одређивања скупова ових тачака за конкавну цилиндричну површину (под а)) и конвексну цилиндричну површину (под б)) се разликује само у смеру вектора \mathbf{n}_p . У првом случају, за шупаљ примитив $\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, а у другом за пун примитив $\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. За ова два типа површина односно примитива процедура одређивања је следећа:

Корак 1: Формирање вектора: $P_i\vec{O} = (x_0 - x_i)\vec{i} + (y_0 - y_i)\vec{j} + (z_0 - z_i)\vec{k}$, где је центар круга одређен са $O(x_0, y_0, z_0)$.

Корак 2: Формирање вектора: $\mathbf{n}_{pi} = \frac{P_i\vec{O}}{|P_iO|}$.

Корак 3: Формирање вектора: $P_i\vec{P}_{i1} = \mathbf{n}_{pi} \cdot d_1 = x_{P_iP_{i1}}\vec{i} + y_{P_iP_{i1}}\vec{j} + z_{P_iP_{i1}}\vec{k}$ и $P_i\vec{P}_{i2} = \mathbf{n}_{pi} \cdot d_2 = x_{P_iP_{i2}}\vec{i} + y_{P_iP_{i2}}\vec{j} + z_{P_iP_{i2}}\vec{k}$, где је за конкавну површину: $d_1 = R - R_1$ и $d_2 = R - R_2$, а за конвексну: $d_1 = R_1 - R$ и $d_2 = R_2 - R$.

Корак 4: Израчунавање потребних координата тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ за равну површину, ако се има у виду да је \mathbf{n} већ преузет из *IGES* датотеке, се састоји од формирања вектора: $P_i\vec{P}_{i1}$ и $P_i\vec{P}_{i2}$ где се константе d_1 и d_2 усвајају у зависности од пречника пипка. Тражене координате тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ се потом израчунавају као

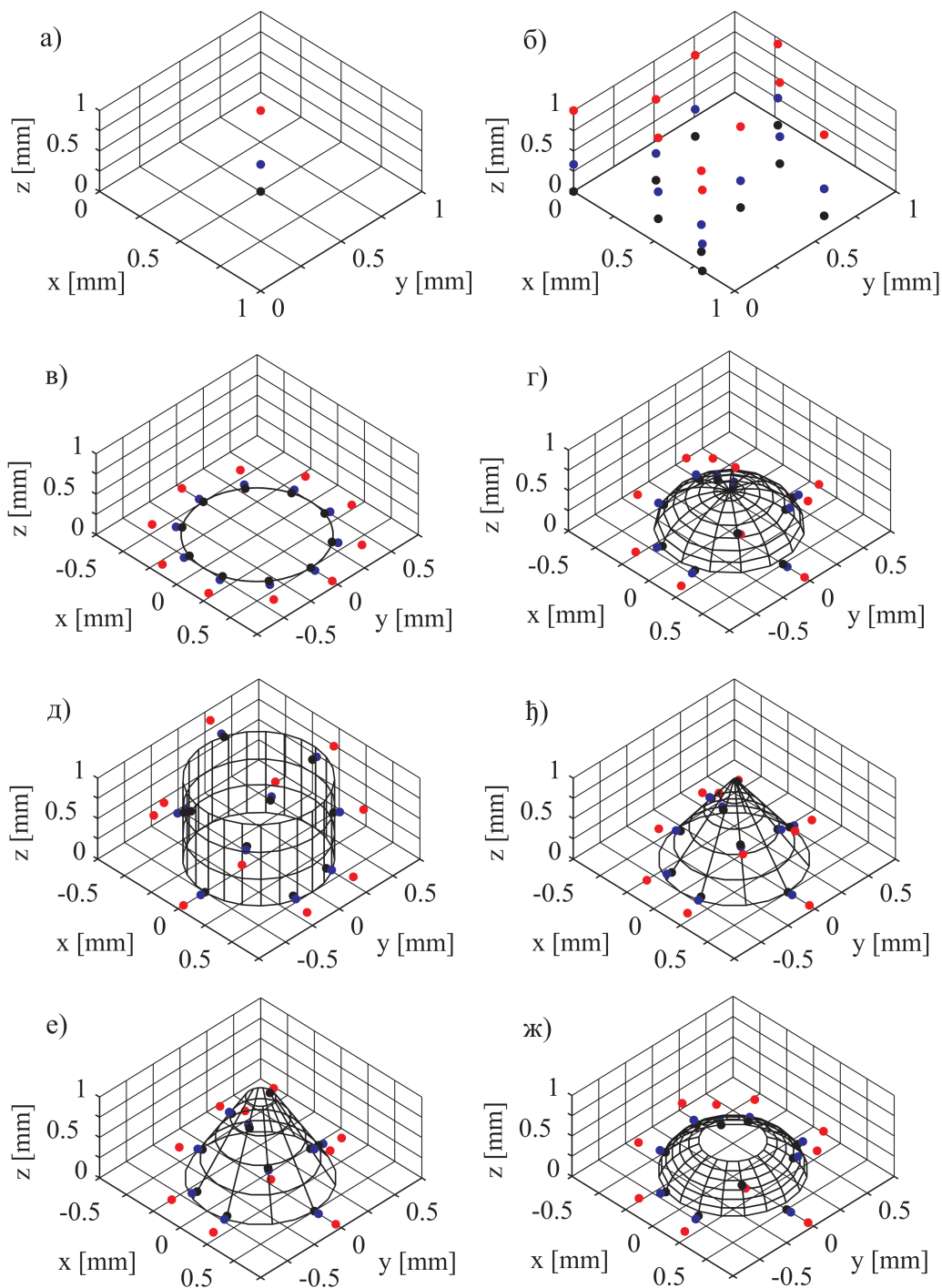
$$\begin{aligned} x_{i1} &= x_{P_iP_{i1}} + x_i \\ y_{i1} &= y_{P_iP_{i1}} + y_i \\ z_{i1} &= z_{P_iP_{i1}} + z_i \end{aligned} \tag{4.18}$$

док се координате тачака $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ израчунавају као

$$\begin{aligned} x_{i2} &= x_{P_iP_{i2}} + x_i \\ y_{i2} &= y_{P_iP_{i2}} + y_i \\ z_{i2} &= z_{P_iP_{i2}} + z_i \end{aligned} \tag{4.19}$$

Координате мерних тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_i(x_i, y_i, z_i)$ на бази анализе приступачности обележене су плавом и црвеном бојом и приказане су на слици

4.6. Дистрибуција је изведена за број мерних тачака $N = 10$ за основне геометријске примитиве као што су тачка, раван, круг, полусфера, цилиндар, купа, зарубљена купа, зарубљена полусфера.



Слика 4.6: Дистрибуција тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_i(x_i, y_i, z_i)$ на основу $P_i(x_i, y_i, z_i)$: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; ђ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера.

Укупан пређени пут мерног пипка приликом мерења N -тачака се може израчунати као

$$D_{tot} = \sum_{i=0}^{N-1} (|P_{i2}\vec{P}_{i1}| + 2 \cdot |P_{i1}\vec{P}_i| + |P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}|) \quad (4.20)$$

где је $|P_{i2}\vec{P}_{i1}|$ брзи ход и $2 \cdot |P_{i1}\vec{P}_i|$ двоструко пређен спори ход за i -ту тачку, ако и $|P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}|$ дужина пута при прелазу пипка из предходне, i -те у наредну $(i + 1)$ -ту чворну тачку. Векторски облик ове једначине је

$$\vec{D}_{tot} = \sum_{i=0}^{N-1} (P_{i2}\vec{P}_{i1} + 2 \cdot P_{i1}\vec{P}_i + P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}) \quad (4.21)$$

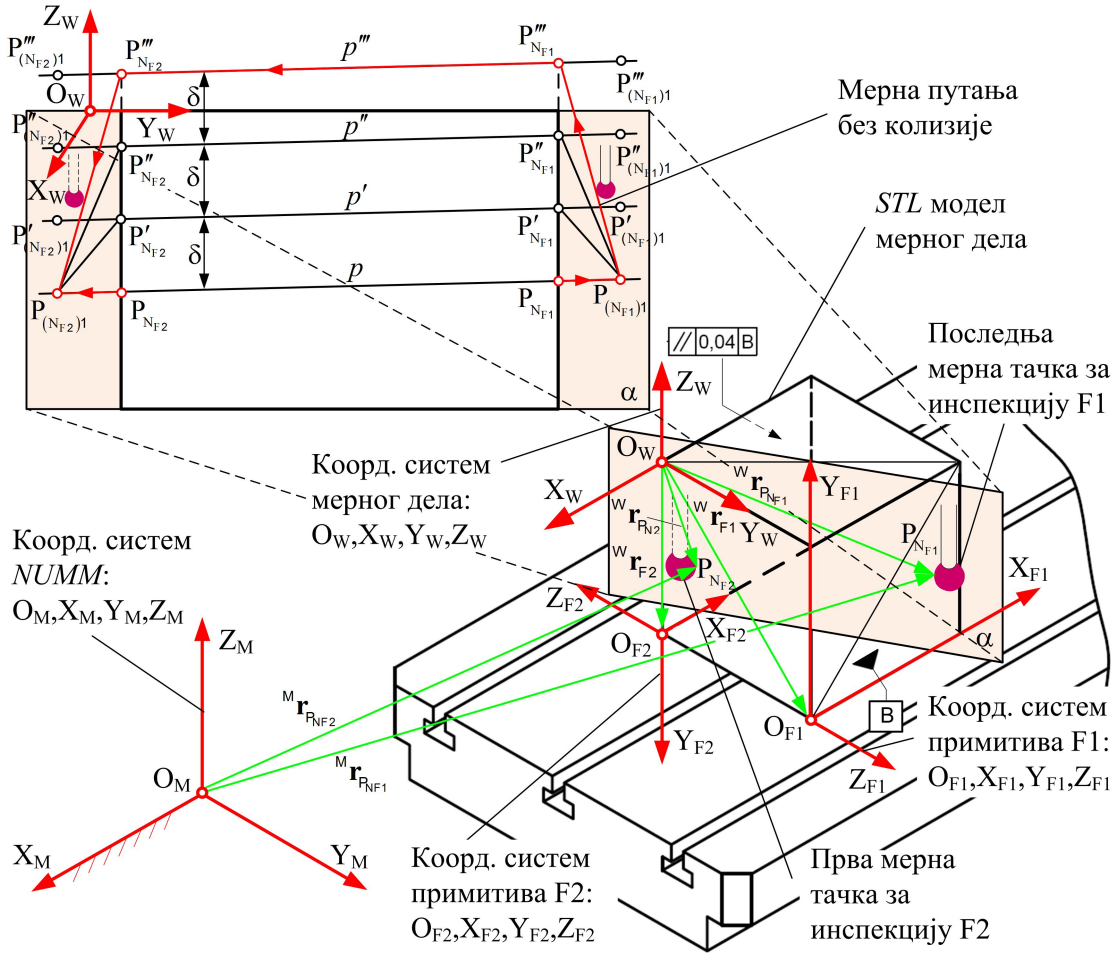
и представља иницијалну путању мерног сензора при инспекцији PD на $NUMM$ за један примитив. Ова путања ће касније служити као основа за оптимизацију применом колоније мрава.

4.6 Избегавање колизије

Познато је да се $3D$ геометрија може представити у STL (*STereo Lithography*) формату. Укратко, овај начин представљања геометрије се састоји из апроксимације номиналне или CAD геометрије дела са неким бројем троуглова при чему се сваки од њих описује координатама три темена. Збир површина троуглова представља апроксимирану површину мерног дела. У контексту планирања путање на $NUMM$ овај формат се користи само за генерисање дела мерне путање који има задатак да избегне препреку приликом преласка пипка са једног на други примитив, не и за описивање примитива.

На основу STL модела представљања геометрије PD , његових толеранција, координате последње тачке $P_{(N_{F1})1}$ за инспекцију $F1$ (предходни примитив) и координата прве тачке $P_{(N_{F2})1}$ за инспекцију $F2$ (наредни примитив) на слици 4.7 представљен је упрошћени принцип избегавања колизије. Принцип се састоји од итеративног померања праве p , која првобитно пролази кроз тачке $P_{(N_{F1})1}$ и $P_{(N_{F2})1}$, за вредност δ [mm] по z -оси по тако одређеној процедури све до онда до када права не пресеца запремину

PD. Померање праве се врши транслацијом за наведену вредност. Проблем проналаска пресечних тачака између праве *p* и запремине *PD* се своди на проблем проналаска пресечне тачке између површине ограничене троуглом и дужи која спаја тачке $P_{(NF_1)1}$ и $P_{(NF_2)1}$ и припада правој *p*.



Слика 4.7: Принцип избегавања колизије при кретању пилка са једног примитива на други

За сваки троугао *STL* датотеке формира се једначина равни којој припада. Ако су темена $\Delta T_1 T_2 T_3$ процедура формирања равни:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (4.22)$$

започиње формирањем вектора нормале као: $\vec{n} = T_1 \vec{T}_2 \times T_1 \vec{T}_3 = A\vec{i} + B\vec{j} + C\vec{k}$, из ког произилазе константе *A*, *B* и *C*. Константа *D* израчунава се уз помоћ скаларног производа: $D = -\vec{n} \cdot \vec{r}_1$, где је $\vec{r}_1 = O\vec{T}_1$. Затим следи формирање

једначине праве p кроз две тачке $P_{(NF_1)1}$ и $P_{(NF_2)1}$ на основу векторског облика једначине праве:

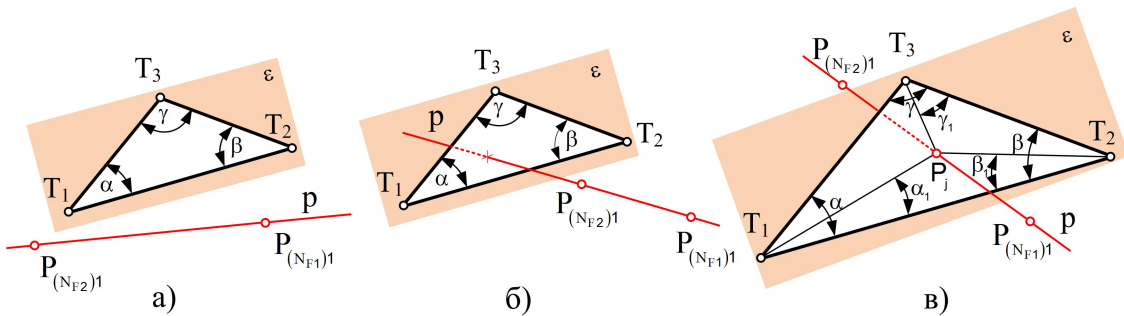
$$\vec{M} = \vec{P} + t \cdot \vec{p} \quad (4.23)$$

где је: $\vec{p} = P_1\vec{P}_2$, $\vec{P} = O\vec{P}_1$. Пројектовањем једначине 4.23 на осе Декартовог KS следи једначина праве p у параметарском облику:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + t \cdot p_x \\ y &= y_0 + t \cdot p_y \\ z &= z_0 + t \cdot p_z \end{aligned} \quad (4.24)$$

Уколико постоји пресек праве и равни то је тачка $P_j(x_j, y_j, z_j)$, где је j -број пресечних тачака. Њене координате се добијају решавањем система једначина кога образују 4.22 и 4.23.

Обзиром да је $\Delta T_1 T_2 T_3$ представљен са равни и да је дуж $\overline{P_{(NF_1)1} P_{(NF_2)1}}$ представљена као део праве p потребно је проверити да ли се пресечна тачка P_j налази на дужи $\overline{P_{(NF_1)1} P_{(NF_2)1}}$ и да ли припада делу равни ограниченом $\Delta T_1 T_2 T_3$ (4.8).



Слика 4.8: Пресек дужи и троугла

Овај услов је испуњен уколико је параметар $t \in (0, 1)$ и уколико су испуњени следећи услови:

$$\begin{aligned} \alpha &\leq \alpha_1 \\ \beta &\leq \beta_1 \\ \gamma &\leq \gamma_1 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Потребни углови се израчунавају као:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arccos\left(\frac{T_1\vec{T}_2 \cdot T_1\vec{T}_3}{|T_1\vec{T}_2| \cdot |T_1\vec{T}_3|}\right), \alpha_1 = \arccos\left(\frac{T_1\vec{T}_2 \cdot T_1\vec{P}_j}{|T_1\vec{T}_2| \cdot |T_1\vec{P}_j|}\right) \\ \beta &= \arccos\left(\frac{T_2\vec{T}_1 \cdot T_2\vec{T}_3}{|T_2\vec{T}_1| \cdot |T_2\vec{T}_3|}\right), \beta_1 = \arccos\left(\frac{T_2\vec{T}_1 \cdot T_2\vec{P}_j}{|T_2\vec{T}_1| \cdot |T_2\vec{P}_j|}\right) \\ \gamma &= \arccos\left(\frac{T_3\vec{T}_2 \cdot T_3\vec{T}_1}{|T_3\vec{T}_2| \cdot |T_3\vec{T}_1|}\right), \gamma_1 = \arccos\left(\frac{T_3\vec{T}_2 \cdot T_3\vec{P}_j}{|T_3\vec{T}_2| \cdot |T_3\vec{P}_j|}\right)\end{aligned}\quad (4.26)$$

Ако постоји пресек праве p и било ког троугла STL модела PD итеративним поступом се одређују тачке: $P_{NF_1}, P_{NF_2}; P'_{NF_1}, P'_{NF_2}; P''_{NF_1}, P''_{NF_2}; \dots; P^j_{NF_1}, P^j_{NF_2}$. Разлика између наредне и предходне тачке је у вредности z - координате. Оне се разликују за вредност параметра корекције $\delta[mm]$. Параметар корекције је константа за један PD . Поступак се понавља све док не буде пресека између праве и свих троуглова STL модела. Последње формиране тачке итеративног поступка P'''_{NF_1} и P'''_{NF_2} представљају тачке у којима при преласку мерног пипка неће доћи до колизије. Са смањењем броја троуглова принцип избегавања колизије даје брз одзив тј. координате тачака без колизије, а готово да не утиче на повећање времена процеса мерења.

4.7 Планирање путање мерног сензора

Планирање путање мерног сензора ($PPMS$) при инспекцији PD на $NUMM$ зависи од његове геометријске и метролошке комплексности. Геометријска комплексност се односи на распоред и величину мерних површина, њихове приступачности за мерни пипак итд. Метролошка комплексност се првенствено своди на облике и квалитет толеранција, који се појављују на једном PD , као и њихов број. У координатној метрологији као што је мерење на $NUMM$, поменути врсте комплексности се не могу одвојено посматрати већ везано. Заједнички елемент у тој вези је објекат додира. Његов положај и оријентација су геометријске карактеристике, а облик толеранцијске зоне, вредности које ограничавају зону, референтни елемент итд. су толеранцијске карактеристике.

$PPMS$ представља један нови приступ инспекцији PD дефинисањем

објеката додира са геометријско-толеранцијског становишта. Геометријске информације објеката додира су дефинисане са *MPI* и преузете су из *IGES* датотеке. Основа за њих је *CAD* модел *PD*. Интеграција геометријских и толеранцијских информација се одвија у бази знања датај у [160]. Уз помоћ ове интеграције дефинисане су релације између објеката мерења и толеранција *PD*.

На основу дефинисане повезаности толеранција и геометрије *PD* и у предходним поглављима дефинисаних *DMT* и *IK*, *PPMS* као излаз даје координате тачака са њиховим тачним редоследом за планирање путање. Поред датих мерних тачака дате су и чворне тачке кроз које пролази мерни пипак како не би дошло до колизије. Излаз може бити и тачно дефинисана секвенца инспекције примитива [161].

Чињеница да се планирање инспекције *PD* на *NUMM* врши из три међусобно ортогонална правца користи се за дефинисање праваца приступа мерног пипка при *PPMS*. Поређењем ових праваца са правцима вектора нормала конфигуришу се мерни пипци. Дакле *PPMS* поред *DMT* и принципа избегавања колизије, садржи и анализу приступачности мерног пипка свим примитивима из којих се састоји *PD*.

5 ОПТИМИЗАЦИЈА ПЛАНИРАНЕ МЕРНЕ ПУТАЊЕ ПРИМЕНОМ ОПТИМИЗАЦИОНОГ АЛГОРИТМА НА БАЗИ КОЛОНИЈЕ МРАВА

5.1 Уводне напомене

У овом поглављу је представљена оптимизација путање мерног сензора при инспекцији *PD* на *NUMM*. Модел оптимизације је базиран на математичком моделу који дефинише иницијалну путању представљену скупом тачака са дефинисаним редоследом за пролазак пипка без колизије и решењу проблема трговачког путника, *Traveling Salesman Problem (TSP)*, применом колоније мрава. Математички модел је развијен, анализиран и дат у четвртом поглављу, тако да ће се у овом поглављу направити само кратак осврт на њега у циљу довођења у везу са оптимизациом мерне путање.

Проблем проналажења најкраћег пута мерног пипка при планирању инспекције *PD* на *NUMM* се, у литератури, своди на решење *TSP*. За решење *TSP* користе се технике вештачке интелигенције, *Artificial Intelligence (AI)* као што су генетски алгоритми, *Genetic Algorithm (GA)*, неуронске мреже, *Neural Networks (NN)* и у последње време теорије ројева, *Swarm Theories (ST)*. У овом поглављу примењен је алгоритам кретања колоније мрава, *Ants Colony (AC)*, за проналажење најкраћег пута тј. оптимизоване путање. Оптимизована путања је поређена са оствареном путањом при *on – line* програмирању *NUMM ZEISS UMM500* и мерном путањом добијеном у модулу за *CMM* инспекцију у лиценцираном софтверу *Pro/ENGINEER* верзије *Wildfire4.0 (PTC Creo)*.

NUMM су широко примењиве за инспекцију готово свих типова

толеранција у производној индустрији [61]. Њихова главна карактеристика је универзалност примене како у погледу инспекције различитих типова толеранција тако и различитих типова површина на машинским деловима као што су зупчаници, лопатице турбина, ротациони делови, призматични делови итд. Захтев тржишта за минималним временом производње намеће захтев за минималним временом инспекције на *NUMM*. Време инспекције је готово директно пропорционално дужини пута мерног пипка на коју утичу фактори као што су геометријска комплексност дела, број толерација, квалитет и тип толеранција итд. Свака уштеда или скраћење у дужини мерне путање тј. оптимизација утиче на смањење укупног времена мерења и самим тим на трошкове инспекције, као и смањење укупног времена израде производа, а тиме и на бржи пласман на тржиште што представља један од главних изазова данашњице.

AC је широко прихваћена оптимизациона техника на бази теорије ројева развијена од стране аутора *M. Dorigo* и детаљно је представљена у [162–165]. У области координатне метрологије основа за њену примену је *TSP*. Примери двају решења *TSP* су дати у [166, 167]. Осим *AC* технике за добијање оптималне путање користе се генетски алгоритми [32, 34] и неуронске мреже [30, 61, 168], као и оптимизациони алгоритам [169]. Припрема података за генерисање оптималне путање може бити заснована на инжењерској онтологији [33, 170] и бази знања [160, 171], при чему база знања повезује геометрију и прописане толеранције *PD*. Холистички приступ [172] дефинисању података је развијен да омогући трансфер података између различитих група и департмана у једном предузећу, а главни циљ му је повећање мерних квалификација група запослених и висок квалитет производа.

Системи планирања инспекције базирани на примитивима, *Feature-Based Systems (FBS)*, за дефинисање иницијалне путање су представљени у [92, 93, 98]. Уз помоћ њих описује се геометрија дела и на основу базе знања доводи у везу са толеранцијама. За примитив који учествује у креирању толеранције, генерише се оптимална путања сензора. Тренутно стање толеранција у интелигентним производним системима су разматрани у [173].

Аутоматски концепт планирања инспекције је представљен у [62, 70,

174—176] и може бити основа за развој и имплементацију оптимизационих модела. Стање развоја планирања инспекције је дато у [91], а једно предвиђање будућности производне метрологије у [37].

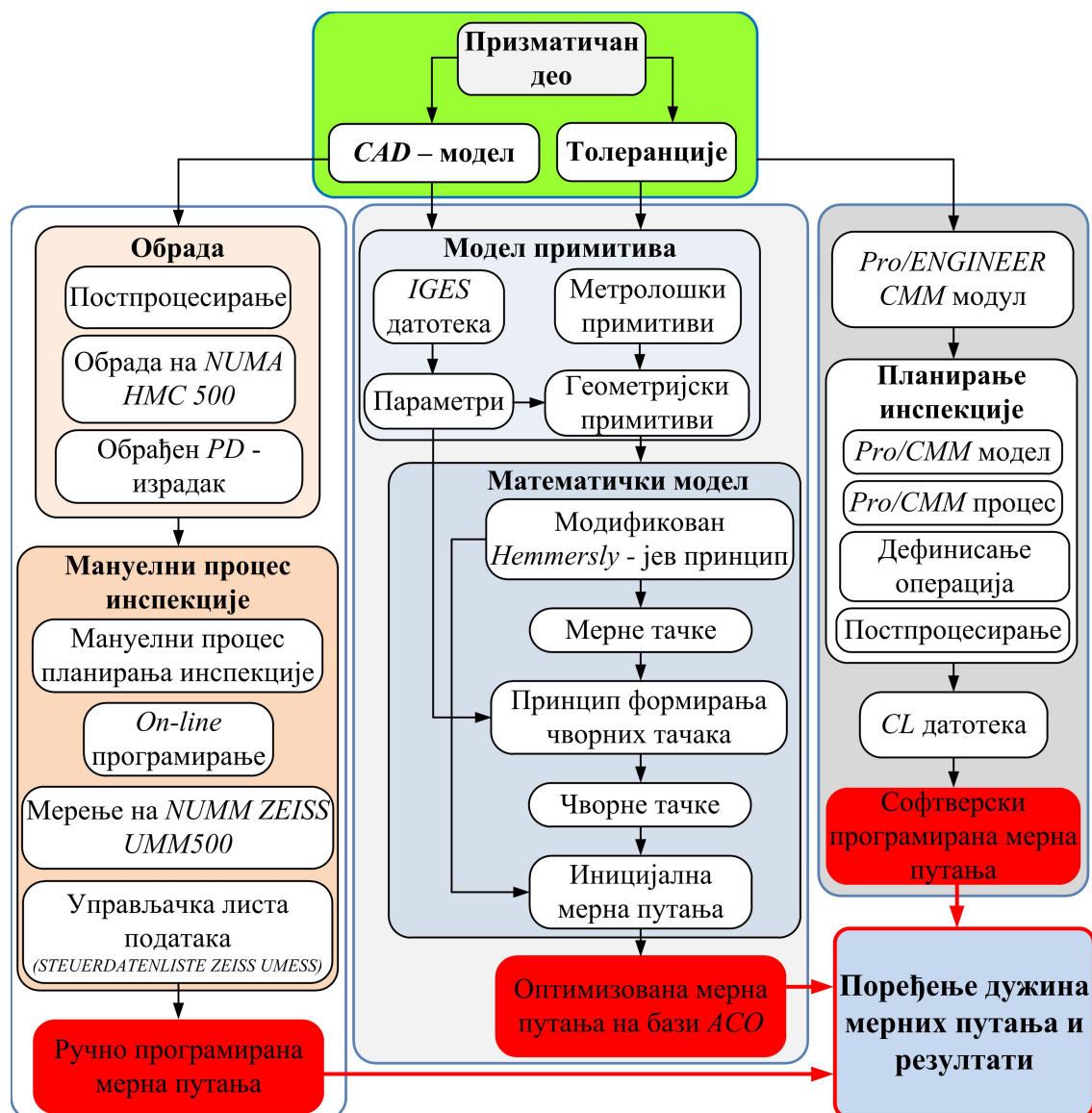
Истраживања спроведена у овом поглављу представљају једну од првих примена *АС* у домену координатне метрологије за оптимизацију мерне путање при мерењу *PD* на *NUMM*. Предност оптимизације на бази колоније мравца, *Ants Colony Optimization (ACO)* је једноставна имплементација захваљујући развијеном математичком моделу који проблем своди на *TSP*, а који омогућава примену *АС*. Посебно, је истакнута примена за инспекцију призматичних делова високе геометријске и метролошке варијантности средње и високе класе тачности мера у малосеријској и појединачној производњи. С друге стране, аутоматско генерисање оптималне путање на бази *3D (CAD)* модела дела је такође предност у односу на до сада развијене методе оптимизације. Примена развијеног модела се може извршити и на хибридне координатне мерне системе [177], као и на виртуелне мерне машине [42] са једним заједничким циљем, а то је минимално време мерења односно трошкови инспекције.

Поглавље се састоји из неколико целина као што је модел податак, математички модел и *ACO* модел. Основа *ACO* модела су потребни подаци преузети из *IGES* фајла *CAD* модела *PD* и математички модел који на излазу даје скуп тачака између којих се тражи најкраће растојање или оптимална путања мерног пипка. Оптимална путања се потом пореди са *on – line* програмираном путањом на мерној машини *ZEISS UMM500* и путањом генерисаном у *Pro/ENGINEER*-у при истим параметрима. За потребе експеримента, као што је дато у предходном поглављу, произведена су два *PD*.

5.2 Модел потребних података за оптимизацију

Модел података потребних да се примени *ACO* и изврши поређење састоји се из три дела и показан је на слици 5.1. Први део су потребни подаци да би се добила мерна путања као резултат *on – line* програмирања мерне машине. У овај скуп података, са једне стране, спадају подаци везани за пројектовање технолошких процеса за оба дела, постпроцесирање и генерисање *G* - кода

за нумерички управљану машину алатку (*NUMA*) *LOLA HMC 500* за већ *3D* моделиране делове у софтверу *Autodesk Inventor Profesional 2011*, као и сам процес обраде делова расположивим алатима у Заводу за машине алатке, Машинског факултета у Београду. С друге стране, спадају подаци о мануелном процесу планирања инспекције, ручном програмирању машине, процесу мерења на *NUMM ZEISS UMM 500* и управљачка листа података.



Слика 5.1: Модел података

Подаци о мануелном процесу планирања инспекције се налазе на обрасцима и стандардизовани су за лабораторију у којој је извршено мерење (*High Precision Measurement Room – Nanometrology Laboratory*). Обрасци садрже податке о координатним системима мерења, конфигурацији мерних

пипака, ознакама примитива који учествују у креирању толеранција и самим тим у инспекцији итд. Подаци о ручном програмирању су подаци који се налазе унутар управљачке јединице, а добијају се меморисањем путање мерног пипка који се покреће активирањем ручица за одговарајућу осу. Подаци о процесу мерења се у овом контексту односе на мерну путању, не на извештај о мерењу анализиран у предходном поглављу. Мерна путања је представљена у облику од тачке до тачке и налази се у листи управљачких података.

Други део су потребни подаци да би се добио скуп тачака или иницијална путања и применила техника *ACO*. Ови подаци су засновани на моделу примитива и математичком моделу и резултат су спроведених истраживања у овој дисертацији. Служе за поређење са осталим подацима ради утврђивања нивоа унапређења. Трећи део су подаци неопходни за аутоматско генерисање путање пипка у софтверу *Pro/ENGINEER*.

5.2.1 Модел примитива

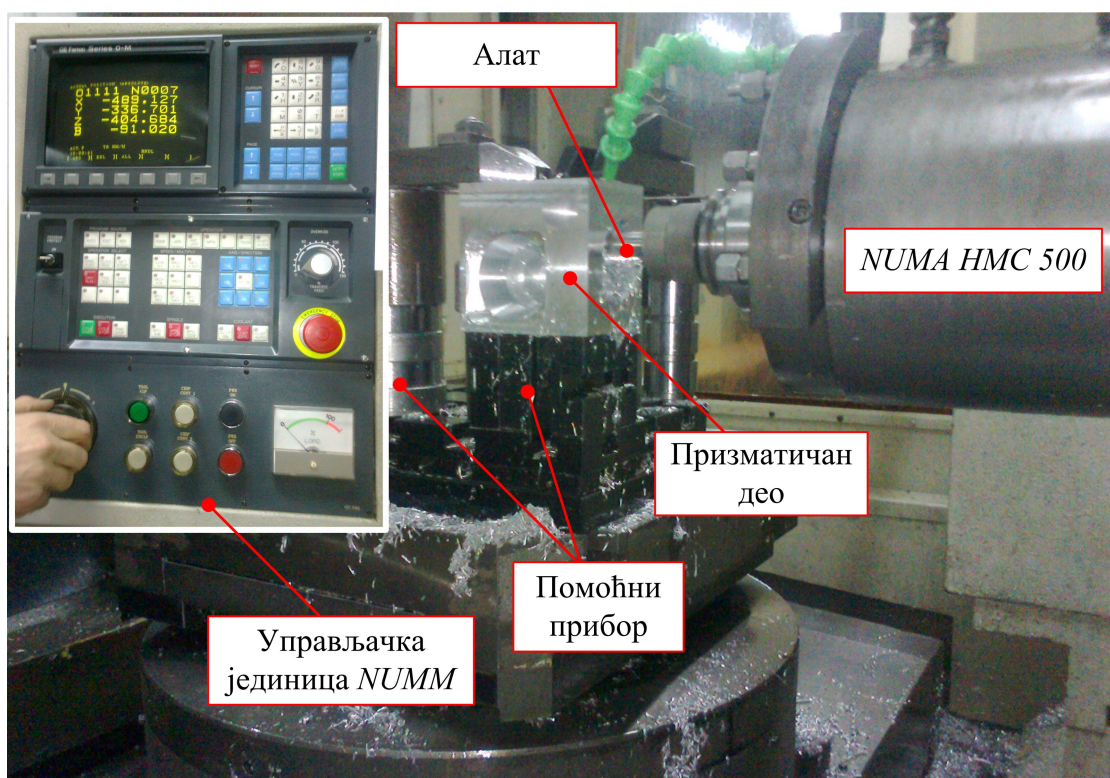
Појам геометријског примитива се везује за дефинисање мерне путање без колизије на нивоу једног примитива и њено представљање у облику од тачке до тачке. Један или више геометријских примитива чини метролошки примитив који се директно везује за неки облик толеранције. Нпр. толеранција паралелности две равни садржи два геометријска примитива, а то су равни. При том метролошки примитив је дефинисан са два геометријска примитива и податком о растојању између ове две равни. Другим речима, метролошки примитив представља мост између толеранција и геометрије примитива.

Модел примитива је базиран на основним геометријским примитивима и њиховим параметрима представљеним у [160] и четвртм поглављу овог рада. Сваки геометријски примитив је једнозначно одређен координатним системом (O_F, X_F, Y_F, Z_F) и скупом параметара у односу на њега. Ови параметри могу бити следећег типа: пречник (D, D_1) , висина (H, H_1) , ширина (a) , дужина (b) , вектор нормале примитива (\mathbf{n}) , вектор пуноће примитива (\mathbf{n}_p) . Вектор \mathbf{n} одређује оријентацију примитива у простору. Параметар пуноће \mathbf{n}_p је дефинисан јединичним вектором X -осе примитива. Вектор пуноће $\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ дефинише пун, а $\mathbf{n}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ празан примитив. Параметар пуноће и вектор нормале дефинишу правац приступа пипка мерног сензора при генерисању

његове путање. Уз помоћ поменутих параметара, као што је речено, сваки примитив је једнозначно одређен у односу на његов координатни систем (O_F, X_F, Y_F, Z_F) . У односу на KS мерног предмета, примитив је одређен матричном једначином 4.4, а у односу на KS мерне машине 4.6.

5.2.2 Обрада радног предмета

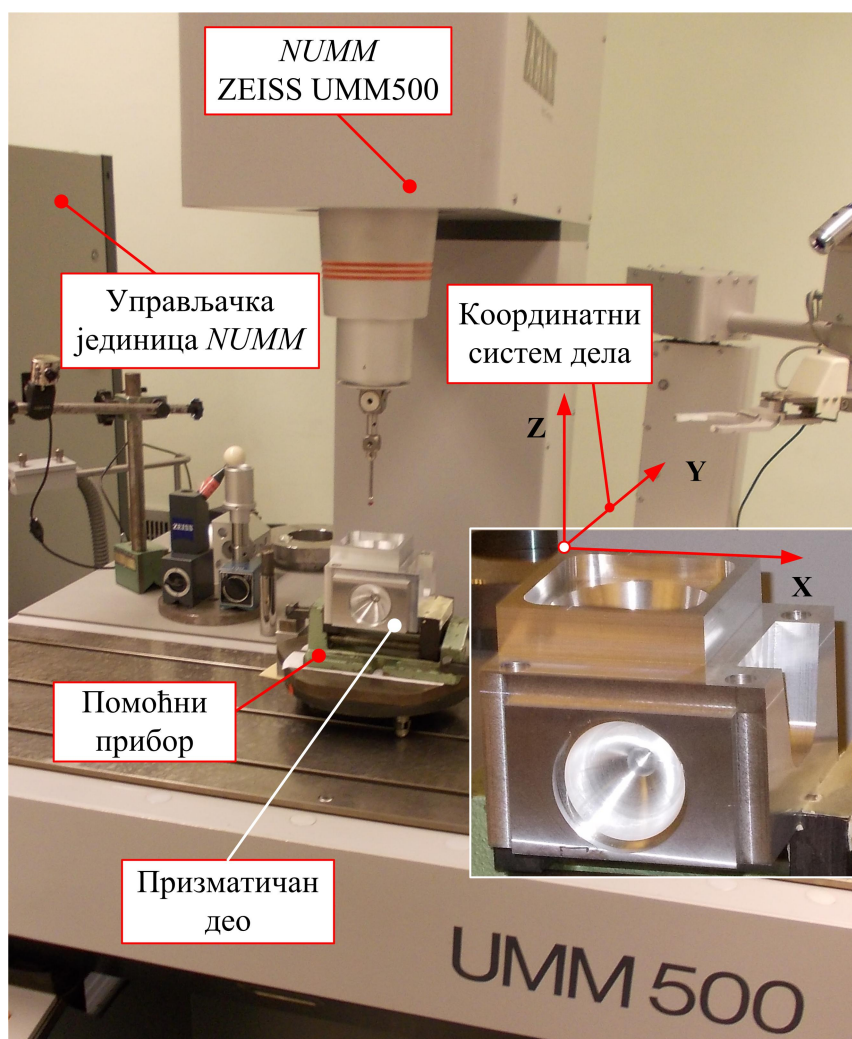
Да би се добила путања мерног сензора као резултат *on-line* програмирања путање пипка, као што је то детаљно описано у предходном поглављу, обрада је извршена на четвороосном $(X'YZB')$ обрадном центру (хоризонтална бушилица-глодалица) "LOLA HMC 500" (слика 5.2). Димензије полазног материјала су $95 \times 95 \times 95$ [mm], квалитет обраде $N7$ и материјал је алуминијум. Коришћени алати су вретенаста глодала, алати за простругивање унутрашњих цилиндричних површина и лоптасто глодало за полусферну површину. Обрађени радни PD се састоје из свих геометријских примитива обухваћених моделом примитива и потребних за тестирање модела оптимизације применом технике ACO .



Слика 5.2: Обрада радног предмета

5.2.3 NUMM on-line мерна путања

Након осврта на процес обраде неопходно је укратко осврнути се и на експерименталну поставку процеса мерења на *NUMM*. Експериментална инсталација за мерење *PD* показана је на слици 5.3. Мерење дела је извршено у једном стезању. Помоћни прибор коришћен за причвршћавање *PD* је машинска стега. Експеримент је извршен на мерној машини *ZEISS UMM500* са основним техничким карактеристикама датим у табели 6.3.



Слика 5.3: Експериментална поставка мерења *PD*

Као што је речено, процес инспекције се састоји из припремног процеса и процеса мерења. Припремни процес обухвата: 1) постављање мерног дела са анализом помоћног прибора; 2) конфигурисање мерних пипака; 3) калибрацију мерних пипака уз помоћ мерне кугле; 4) уравнивање *PD*. Координате тачака

on – line мерне путање су преузете из управљачке листе података тзв. *STEUERDATENLISTE ZEISS UMESS* за оба мерна дела. Између осталих података (нпр. режими мерења, брзине и убразања) управљачка листа садржи податке о координатама тачака кроз које прође мерни сензор за *on – line* програмирану мерну путању. Познавајући структуру записа ове листе података преузете су координате тачака путање и формирана је *on – line, point-to-point* мерна путања ради поређења са осталима. Коришћени метод програмирања (*on – line*) у овом подпоглављу не представљају никакву новину, већ служи за добијање једног облика мерне путање као полазне основе за поређење са другим мерним путањама, што је дато у резултатима поређења.

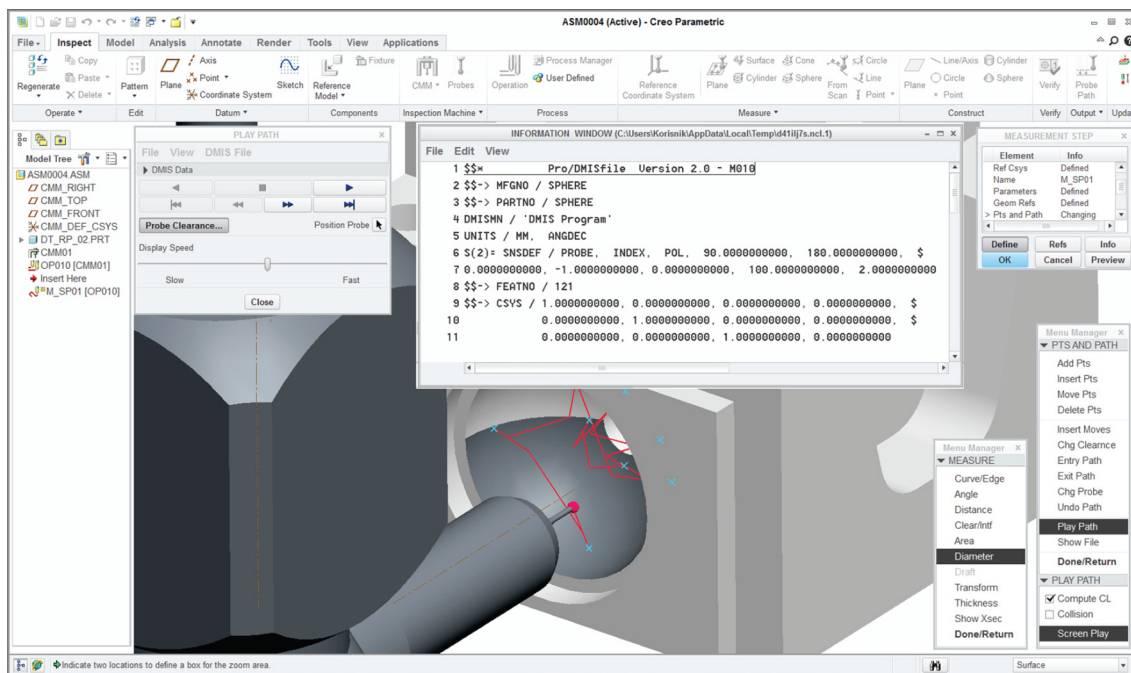
5.2.4 Генерисање мерне путање уз помоћ софтвера

За добијање мерне путање у софтверу коришћен је *Manufacturing* модул и у оквиру њега *CMM* подмодул у лиценцираном софтверу *Pro/ENGINEER*, верзија *Wildfire 4.0 (PTC Creo)*.

Координатни систем мерног предмета при инспекцији у софтверу се поклапа са координатним системом мерног предмета при инспекцији на мерној машини. На слици 5.4 показана је путања при инспекцији пречника полусфере као и уводни део генерисане *CL* датотеке. *CL* датотеку генерише софтвер као излазни извештај који садржи податке о кретању мерног сензора. На основу познавања структуре записа *CL* фајла, из њега су преузете координате тачака кроз које пролази мерни сензор и формирана је софтверски програмирана мерна путања. Да би поређење између оптималне и софтвером генерисане путање било меродавно неопходно је у софтверу подесити параметре као што су *APPROACH_DISTANCE*, *PULLOUT_DIST*, *MEAS_APPR_DIST*, *MEAS_PULLOUT_DIST*, итд., тако да су њихове вредности у складу са параметрима математичког модела (d_1 , d_2 итд.). Подешавања су урађена у дијалогу *Measurement step* под опцијом *Parameters*.

5.3 Математички модел за оптимизацију

Математички модел дефинише дистрибицију два скупа тачака: 1) скуп мерних тачака и 2) скуп чворних тачака који се састоји из два подскупа.



Слика 5.4: Прозор инспекције у Pro/ENGINEER-у за зарубљену полусферу са CL фајлом

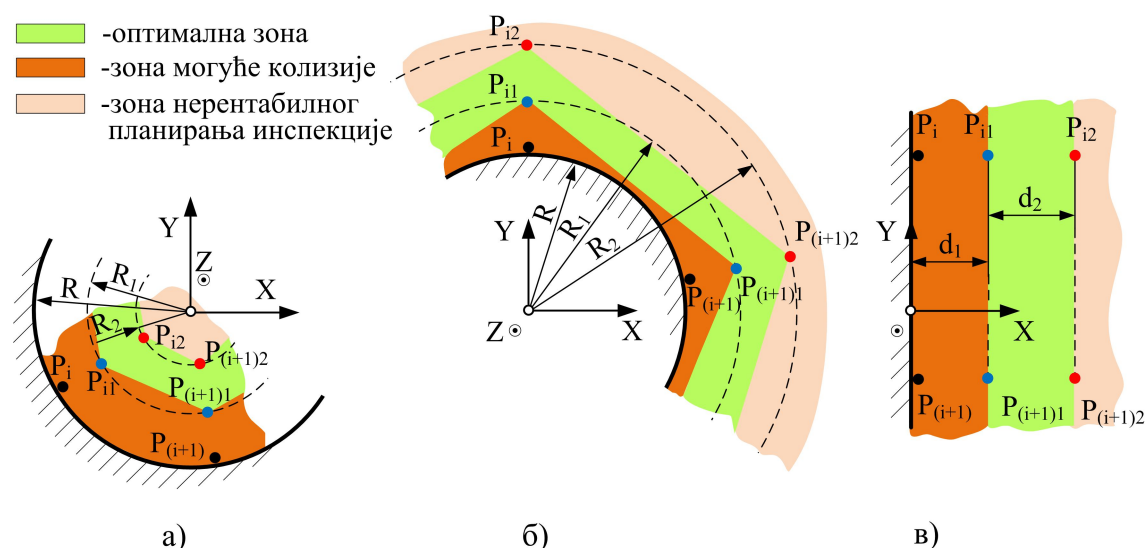
Математички модел дистрибуције мерних тачака, као што је речено, је базирана на *Hammersly* –овој секвенци [158] за израчување координата дуж две осе примитива датих једначином 4.9. Модификовањем једначине 4.9, изведена је дистрибуција мерних тачака за различите геометријске примитиве као што су раван, круг, полусфера, цилиндар, зарубљена купа и зарубљена полусфера. Координате мерних тачака су представљене у Декартовом KS и обележене су по творцу са $P_i(s_i, t_i, w_i)$. Обрасци за израчунавање координата мерних тачака за напред наведене примитиве су дати једначинама 4.10 - 4.17. Као што је речено, скуп чворних тачака се састоји из два подскупа $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$, при чему је $i = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$. Скуп тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ представља тачке у којима се прелази из брзог у спори ход. Растојање које пипак пређе између i -те тачке, $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_i(x_{i1}, y_i, z_i)$ је представљено са d_1 - пут спорог хода, а растојање између и-те тачке $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ је d_2 - пут брзог хода. Код инспекције PD уочавају се три карактеристична случаја за дефинисање скупова тачака $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$. Процедура одређивања скупова ових тачака за конкавну цилиндричну површину и конвексну цилиндричну површину се разликује само у смеру вектора \mathbf{n}_p . У првом случају \mathbf{n}_p је одређен једначином

$\mathbf{n}_p = [-1 \ 0 \ 0]$, а у другом $\mathbf{n}_p = [1 \ 0 \ 0]$. За ова два типа површина процедура одређивања наведених скупова тачака је дата у четири корака у подпоглављу 4.5. За равну површину, $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$, се састоји од формирања вектора $P_i\vec{P}_{i1}$ и $P_i\vec{P}_{i2}$ где се константе d_1 и d_2 усвајају у зависности од пречника пипка. Тражене координате се потом израчунавају као 4.18 и 4.19.

Скупови тачака P_{i1} и P_{i2} су дефинисани за сваки од геометријских примитива у зависности од њихових параметара. У сврхе оптимизације ови скупови тачака разграничавају три зоне (слика 5.5) при инспекцији једног примитива на:

- зону могуће колизије између мерног пипка и PD ,
- оптималну зону,
- зону нерентабилног планирања инспекције.

Повезивањем тачака $P_{i1}(s_{i1}, t_{i1}, w_{i1})$ за $i = 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$ добија се изломљена линија која разграничава зону могуће колизије и оптималну зону, док линија формирана повезивањем $P_{i2}(s_{i2}, t_{i2}, w_{i2})$ за $i = 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$ представља границу између оптималне зоне и зоне нерентабилног планирања инспекције.



Слика 5.5: Приказ три зоне колизије за три карактеристична случаја површина примитива

Величине ових зона зависе од типа примитива за инспекцију, његових параметара као што су R , R_1 , H , H_1 , итд. и од вредности усвојених константи d_1 и d_2 . Такође у зависности од типа примитива, зоне могу бити површинске и запреминске. Нпр. код круга зоне су површинске, док код осталих примитива зоне су запреминске.

5.4 Модел оптимизације применом колоније мрава

Мерна путања се може приказати као скуп тачака дефинисан математичким моделом кроз које пипак пролази приликом инспекције примитива. Примена колоније мрава у контексту координатне метрологије је заснован на решењу проблема *TSP* где скуп градова које трговачки путник треба да обиђе најкраћим путем одговара скупу тачака најкраће путање кретања мерног пипка. Дакле, скупу градова одговара скуп тачака, а трговачки путник је уствари мерни пипак. Обзиром да је потребно при мерењу на *NUMM* избећи колизију између радног предмета и мерног пипка то је потребно развити математички модел дистрибуције тачака за основне геометријске примитиве и модел података за њихово једнозначно описивање што је већ урађено у поглављу четири, а додатно појашњено у предходном подпоглављу.

Развоју оптимизационог модела применом *ACO* предходи и развој алгоритма за дистрибуцију мерних тачака и алгоритма за избегавање колизије који су представљени у [178]. За разлику од рада [179] где се за избегавање препрека тј. избегавање колизије користи алгоритам *A*-звезда, развијена два алгоритма у овој дисертацији дају тачке без колизије које се користе као улаз за *ACO* и добијање оптимизоване путање. Дакле, иницијална путања је без колизије. Препреке као што су ивице, рупе, отвори, итд. се савладавају на два нивоа. Први ниво је генерисање чворних тачака на нивоу једног примитива које обезбеђује да не дође до колизије приликом инспекције једног примитива (нпр. приликом инспекције отвора). Други ниво је генерисање тачака у којима неће доћи до колизије при преласку мерног сензора са једног на други примитив што представља савлађивање препрека као што су напред поменуте, односно запремине мерног предмета. Главна новост је у начину дефинисања иницијалне путање која се потом оптимизује. У раду [179] она није осигурана од колизије

док у овим истраживањима то јесте.

Модел полази од једначине за израчунавање укупног пређеног пута пипка при мерењу N мерних тачака дефинисаних математичким моделом односно једначином 5.1.

$$D_{tot} = \sum_{i=0}^{N-1} (|P_{i2}\vec{P}_{i1}| + 2 \cdot |P_{i1}\vec{P}_i| + |P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}|) \quad (5.1)$$

Део путање пипка $2d_1 = 2 \cdot |P_{i1}\vec{P}_i|$ која одговара прилазу (спором ходу пипка) и повратном ходу пипка због избегавања колизије при инспекцији једног примитива неопходно је искључити из разматрања за могућност оптимизације у смислу скраћења овог дела путање тј. оставити овако како јесте. Ово има смисла јер су вредности d_1 релативно мале (реда величине до 10 [mm]), па као такве не утичу битно на укупну вредност путање. С друге стране, мерне тачке P_{i1} припадају зони могуће колизије, па и из тог разлога је неопходно искључити ове тачке из процеса оптимизације са стриктно управним приступом на површину којој оне припадају, што је већ дефинисано. На овај начин формиран део мерне путање у зони могуће колизије између P_i и P_{i1} додаје се оптимизованом делу путање (оптимална зона) и тако добија укупна оптимална путања без колизије за један примитив. Тако једначина 5.1 постаје 5.2:

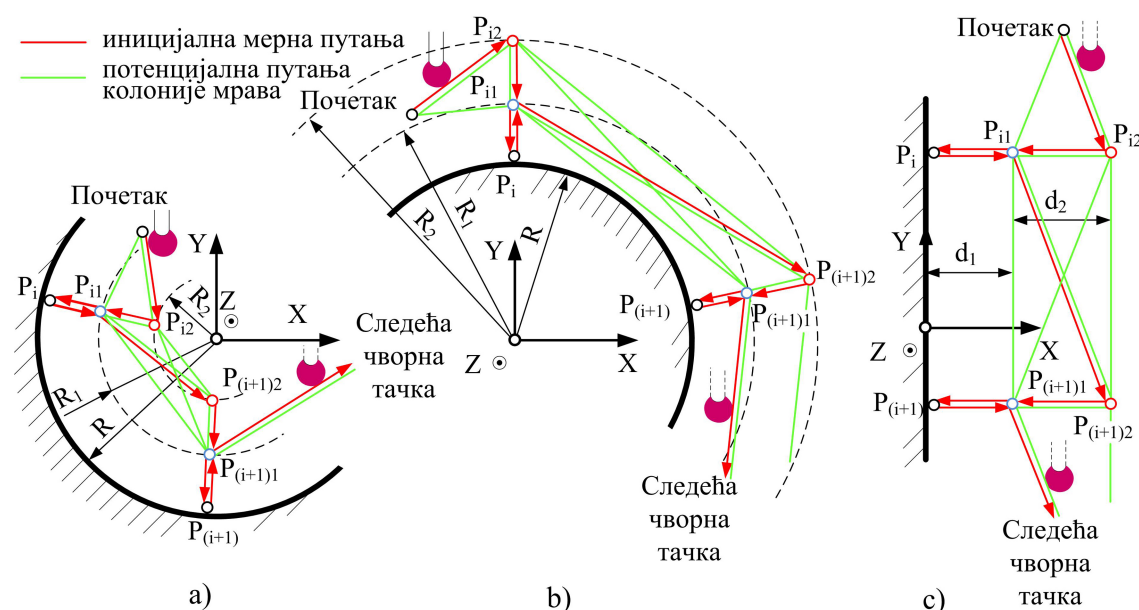
$$D_{tot} = K + \sum_{i=0}^{N-1} (|P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}|) \quad (5.2)$$

где је: $K = N \cdot (2 \cdot d_1 + d_2)$ и $d_2 = |P_{i2}\vec{P}_{i1}|$. Једначина 5.2 представља једначину иницијалне путање и дели се на константан и променљив део. Ако имамо у виду чињеницу да мерни пипак не мора сваки пут прелазити променљиву путању $|P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}|$ већ узмемо у обзир друге могућности долазимо до једначине за оптимизацију односно путање колоније мравца 5.3 на основу иницијално дефинисане путање.

$$\begin{aligned} \min(D_{tot}) = & K + \sum_{i=0}^{N-1} (\min(|P_{i1}\vec{P}_{(i+1)2}|) \vee \min(|P_{i1}\vec{P}_{(i+1)1}|)) \\ & \vee \min(|P_{i(i+1)}\vec{P}_{(i+1)2}|) \vee \min(|P_{i2}\vec{P}_{(i+1)1}|) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Приликом дефинисања иницијалне путање стриктним дефинисањем редоследа тачака дефинисана је мерна путања. Да би се оставио простор за оптимизацију, скуповима тачака које припадају зони оптимизације P_{i1} и P_{i2} , дозвољено је случајно посећивање или пролазак мерног пипка поменутиим тачкама. Управо ова чињеница или прилагођавање математичког модела омогућава примену принципа оптимизације на бази колоније мравва. Наиме, принцип ове технике је случајан обилазак свих, у овом случају, тачака и полагање феромона по таквој путањи, а потом проналажење најкраћег пута по критеријуму највећег броја положених феромона дуж пређене путање. Путања која садржи највећи број феромона је најкраћа путања. Број циклуса случајног обиласка и број мравва у колонији се могу бирати.

На слици 5.6, можемо уочити разлику између иницијалне путање и путање колоније мравва за већ поменути три карактеристична случаја.



Слика 5.6: Приказ могуће или потенцијалне путање колоније мравва за три карактеристична случаја површина примитива

Црвеном бојом је обележена иницијална путања са смером кретања стриктно дефинисаним методом дистрибуције, док зеленом бојом је обележена могућа или потенцијална путања колоније мравва. Разлика између потенцијалне и оптимизоване путање је у томе што потенцијална повезује сваку са сваком тачком у оптималној зони, док оптимизована путања представља само један

део потенцијалне и то део који најкраћим путем повезује тачке P_{i_1} и P_{i_2} .

5.4.1 Проблем трговачког путника

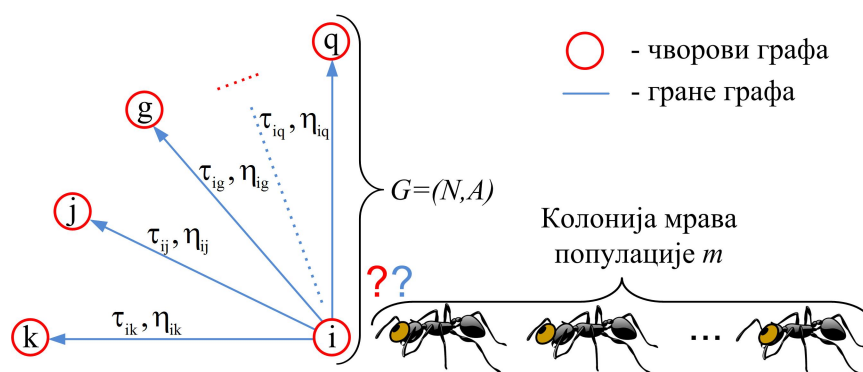
TSP је проблем трговачког путника који полазећи из почетног града жели пронаћи најкраћи пут приликом обиласка датог скупа градова и повратка назад у почетни град, посећујући том приликом сваки град искључиво једном.

Према [163] TSP се може представити помоћу графа $G = (N, A)$, где је N скуп чворова графа који представљају градове које путник обилази, и A представља гране графа које повезују градове. Свакој грани $(i, j) \in A$ је додељена вредност (дужина) d_{ij} , која представља растојање између градова i и j , при чему важи $i, j \in N$. TSP може бити асиметричан и симетричан. У општем случају асиметричног TSP , растојање између једног пара чворова i и j је зависно од правца прелажења гране и тад важи $d_{ij} \neq d_{ji}$. Код симетричног TSP важи $d_{ij} = d_{ji}$. Такође, према истом аутору циљ TSP је пронаћи минимално растојање *Hamilton*-овом циркулацијом графа, где је *Hamilton*-ова циркулација затворена путања посете сваког од $n = |N|$ чворова графа G искључиво једном, тако да је оптимално решење TSP пермутација π чвора $1, 2, \dots, n$ таква да је растојање $f(\pi)$ минимално, где је $f(\pi)$ дато као

$$f(\pi) = \sum_{i=1}^{n-1} d_{\pi(i)\pi(i+1)} + d_{\pi(n)\pi(1)} \quad (5.4)$$

5.4.2 ACO алгоритам за TSP

ACO алгоритам за решење TSP може бити примењен конструисањем графа $G = (C, L)$ где је скуп L потпуно повезан са скупом C идентично графу за представљање TSP , где је $C = N$ и $L = A$ (слика 5.7) при чему скупу стања проблема одговара скуп свих могућих парцијалних путања и ограничења Ω које обезбеђује да мрави прелазе или конструишу само оствариве путање које одговарају пермутацијама индекса градова. По тако конструисаним путањама колонија мравца полаже феромоне и образује тзв. феромонску путању. Феромонске путање су повезане са гранама графа преко функције τ_{ij} која представља тежњу посете граду j директно после посете граду i .



Слика 5.7: Упрошћен приказ кретања колоније мрава унутар графа G

Нови параметар је хеуристичка информација која се израчунава као $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ и представља хеуристичку тежњу одласка из града i директно у град j и обрнуто пропорционална је растојању између два града. Феромонска путања се приказује у виду феромонске матрице чији елементи су τ_{ij} . Аналогно уз помоћ хеуристичке матрице чији су елементи η_{ij} , показују се хеуристичке информације.

Упрошћено, путања колоније мрава се конструише на основу следећа три корака:

- према одређеном критеријуму изабрати почетни град где ће се колонија позиционирати,
- користећи τ_{ij} и η_{ij} конструисати могућу путању итеративним додавањем градова које колонија није већ посећивала,
- повратак назад у почетни град.

Након што су сви мрави унутар колоније обишли све градове они могу почети да полажу феромоне у следећем циклусу обиласка. Након сваког циклуса неопходно је освежавати или изнова регистровати број положених феромона. Најкраћу пут садржи највећи број положених феромона.

5.4.3 Генерисање путање колоније мрава

За генерисање путање користи се техника систем мрава, *Ants System* (AS). У њој m вештачких мрава истовремено генеришу путању трговачког путника. Мрави случајно посећују градове у овом случају тачке $P_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$

и $P_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ дефинисане математичким моделом. У сваком кораку генерисања, мрав k примењује вероватноћу правила избора наредне акције названог случајно пропорционално правило како би одлучио која тачка се посећује следећа. Вероватноћа са којом мрав k , тренутно позициониран у тачки i , бира одлазак у тачку j је дата обрасцем 5.5.

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} \quad (5.5)$$

где је: $\eta_{ij} = \frac{1}{D_{ij}}$ - хеуристичка вредност која је на располагању апприори; α и β - параметри који одређују релативни утицај феромонске стазе и хеуристичке информације; N_i^k - је могућа суседна популација мрава посматраног мрава k када се налази у тачки i , тј. скуп тачака које мрав k још није посетио. Према препорукама за метод AS узете су следеће вредности параметара: $\alpha = 1$ и $\beta = 5$.

5.4.4 Ажурирање феромонских путања

Након што су сви мрави генерисали своје путање, неопходно их је ажурирати. То се ради помоћу тзв. евапорације феромона тако што се прво смањује вредност феромона у свим гранама или путањама константним фактором, а затим додају феромони у гранама кроз које су прошли мрави. Евапорација феромона је дата обрасцем 5.6.

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}, \forall (i, j) \in L \quad (5.6)$$

где је $\rho = 1$ - стопа феромонске евапорације. Параметар је у границама $0 < \rho \leq 1$ и користи да се избегне неограничено нагомилавање феромонских путања и омогућава алгоритму да "заборави" лоше, претходно предузете, одлуке. Након евапорације сви мрави полажу феромоне у гране кроз које пролазе на основу обрасца 5.7.

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \forall (i, j) \in L, \quad (5.7)$$

где је: $\Delta\tau_{ij}^k$ - износ положених феромона мрава k у гранама које је посетио приликом формирања феромонских стаза.

$\Delta\tau_{ij}^k$ је дефинисано уз помоћ израза 5.8:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 1/C^k & \text{ако грана } (ij) \text{ припада } T^k \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases} \quad (5.8)$$

где је C^k - дужина путање T^k генерисане од стране k - мрава, израчуната као сума дужина грана које припадају T^k .

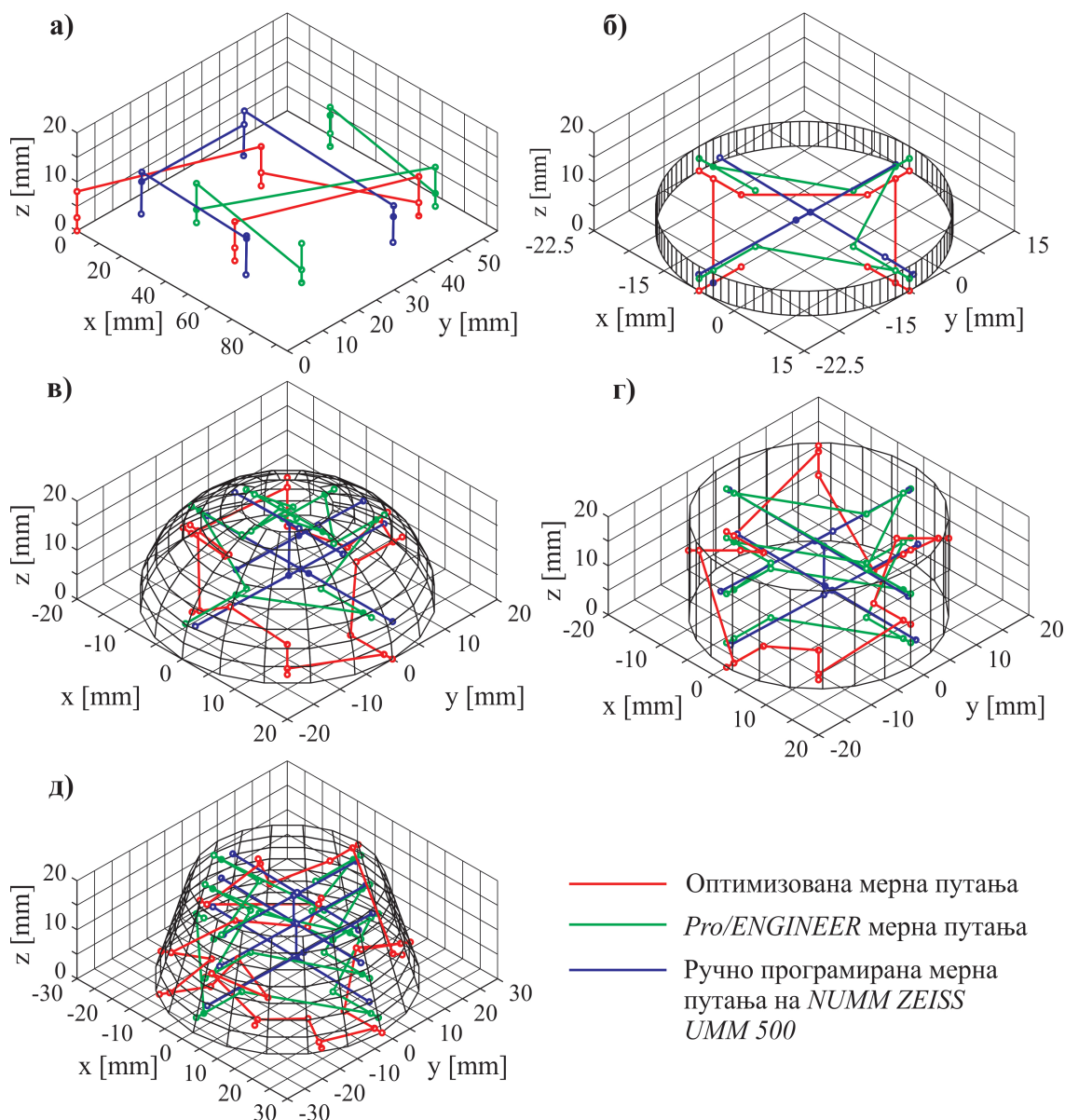
5.5 Резултати оптимизације

Резултати оптимизације се виде кроз поређења дужина три врсте путања показаних на слици 5.8. *On – line* програмирана путања је показана плавом бојом, путања генерисана у софтверу зеленом, док је оптимизирана путања показана црвеном бојом. Основ за поређење су геометријски примитиви који најчешће учествују у креирању толеранција као што су раван, круг, зарубљена полусфера, цилиндар и зарубљена купа. Приликом поређења изузета је путања која се остварује приликом преласка са једног на други примитив за толеранције за чију инспекцију је потребно контролисати два примитива. Наиме, ове путање су у функцији габарита дела и међусобног положаја и оријентације оба примитива за инспекцију. Како се у сва три случаја врши инспекција иста два дела, габарити делова и међусобни положај и оријентација остају исти или су приближно једнаке путање. Дакле, сматра се да главни утицај имају димензије примитива, а да путања која се остварује приликом преласка са једног на други примитив представља најкраће растојање између примитива у зони без колизије. Тако се поређење своди само на поређење путања остварених приликом инспекције једног или више примитива.

Приступ оптимизације преко зона колизије, изнесен у овом поглављу, интересантан је и са становишта дефинисања зависности између дужине путање и запремине примитива што би био један од правца будућих истраживања. За очекивати је да се у поређењу са друга два метода добије неки облик раста уштеде у дужини путање са порастом запремине примитива.

За поређење *on – line* путање и оптимизирана, као што је речено, важно је подесити параметре тако да буду исти у оба случаја. На тај начин се обезбеђује

поузданост поређења.



Слика 5.8: Резултати поређења дужина трију путања за геометријске примитиве: а) раван, б) круг, в) зарубљена полусфера, д) цилиндар, е) зарубљени конус

Параметри разматраних примитива као и њихове вредности су у складу са пројектованим мерама произведеног *PD*: а) раван: $a=95$ [mm], $b=59$ [mm], $N=4$, $d_1=2.6666$ [mm], $d_2=8$ [mm]; б) круг: $R=22,5$ [mm], $N=4$, $d_1=3$ [mm], $d_2=9$ [mm]; в) полусфера: $R=20$ [mm], $H_1=0,65$ [mm], $N=8$, $d_1=1,6$ [mm], $d_2=8$ [mm]; д) цилиндар: $R=17,5$ [mm], $H=20$ [mm], $N=8$, $d_1=1,4$ [mm], $d_2=7$ [mm]; е) зарубљена купа: $R=27$ [mm], $H=76$ [mm], $H_1=56$ [mm], $N=12$, $d_1=2,16$ [mm], $d_2=10,8$ [mm]. Вредности параметара примитива су одабрани на делу услед

ограничења производних и мерних ресурса (машина алатка, мерна машина, алати, прибори, пипци, итд.).

Анализа режима мерења као што су брзина и убразање су занемарени у овим истраживањима. Анализиране су само дужине мерних путања остварене на наведена три начина (*on – line* програмирана, софтверска и оптимизирана применом *ACO*). Главни разлог за занемаривање је остављена могућност да се за сва три начина мерења, и том приликом остваривања мерне путање, наведени режими мерења дефинишу унапред тако да у сва три случаја буду исти.

За добијање оптималне путање коришћена је колонија са $m=500$ мрава и број итерација 100.

Ознаке величина неопходних за приказ резултата су следеће: d_m – дужина путање при *on – line* програмирању *NUMM*, d_s – дужина софтверски програмиране мерне путање, d_o – оптимизирана дужина применом *ACO*, I_s – процентуално унапређење оптимизоване у односу на софтверску путању, I_m – процентуално унапређење оптимизоване у односу на *on – line* програмирану путању. Реално поређење обезбеђује полазна основа, а то је да су режими мерења исти у сва три случаја што је подесиво и да су параметри (d_1 , d_2 , *APPROACH_DISTANCE*, *PULLOUT_DIST*, *MEAS_APPR_DIST*, *MEAS_PULLOUT_DIST*) подешени тако да буду исти у сва три случаја. Дужина *on – line* путање је преузета из управљачке листе података за *NUMM ZEISS UMM 500*, дужина софтверске путање је преузета из генерисаног *CL* фајла у софтверу *Pro/ENGINEER*, док је оптимизирана дужина најкраћи пут добијен уз помоћ *ACO*. Софтверска путања је преузета на основу анализе структуре *CL* датотеке која за излаз има тачке кроз које модел пипка пролази. Приказ вредности величина d_m , d_s и d_o , као и вредности унапређења I_s и I_m су дате у табели 5.1.

Односи вредности дужина мерних путања d_o/d_s су мањи од 87,19 % за разматране примитиве, што представља скраћење мерне путање применом модела оптимизације *ACO* за 12,81 %. С друге стране, односи вредности дужина мерних путања d_o/d_m су мањи од 78,40 %, што представља скраћење мерне путање за 21,60%.

Као што је познато у координатној метрологији дужина мерне путање је

директно пропорционална времену мерења, с тога наведене вредности скраћења мерне путање скраћују укупно време инспекције једног призматичног мерног дела на *NUMM*. Тако је корист модела јако израженија са повећањем броја толеранција и геометријске комплексности призматичних делова са средњим и високим квалитетом тачности мера.

Табела 5.1: Резултати поређења три врсте мерних путања

Резултати	Примитиви				
	Раван	Круг	Зарубљена полусфера	Цилиндар	Зарубљени конус
$d_m [mm]$	203.3896	154.3540	244.8584	290.9837	507.0366
$d_s [mm]$	202.6522	126.4417	183.6755	228.9870	440.1399
$d_o [mm]$	159.4604	110.2462	159.0962	172.2142	307.6091
$p_s = d_o/d_s [\%]$	78.68	87.19	86.61	75.20	69.88
$p_m = d_o/d_m [\%]$	78.40	71.42	64.97	59.18	60.66
$I_s = 100 - p_s [\%]$	21.32	12.81	13.39	24.80	30.12
$I_m = 100 - p_m [\%]$	21.60	28.58	35.03	40.82	39.34

5.6 Закључне напомене

У овом поглављу представљена *ACO* мерне путање при инспекцији призматичних делова на *NUMM*. Оптимизација је заснована на предходно развијеном математичком моделу за дистрибуцију мерних и чворних тачака путање и решењу *TSP* уз помоћ *AC*.

Оптимална мерна путања је поређена са *on – line* програмираном мерном путањом и аутоматски генерисаном мерном путањом у софтверу *Pro/ENGINEER* (*CMM* модул) за два посебно произведена призматичана дела за ове потребе. Резултати поређења оптимизоване путање и *on – line* програмиране путање показују минимум 20 % мање вредности дужине оптимизоване путање, док у поређењу са *Pro/ENGINEER* путањом, показује минимум 10 % мање вредности дужине оптимизоване путање при исто сетованим параметрима.

Поред наведених конкретних резултата предност *ACO* је проста имплементација захваљујући развијеном математичком моделу који мерну путању своди на скуп тачака, а проблем оптимизације на *TSP*. Излаз *ACO* је оптимизована, од тачке до тачке, мерна путања за мерење основних

геометријских примитива. Слично програмирању машина алатки, применом G -кода, добијени излаз се практично може користити за *off – line* програмирање *NUMM* задавањем оптимизоване путање у облику *point-to-point* и интегрисањем у мерни протокол за конкретну *NUMM*.

Сprovedена истраживања представљају један део истраживања у области развоја интелигентног система планирања инспекције *PD* као одговор на индустријске захтеве као што су висока геометријска варијантност и брз пласман производа на тржиште. Циљ је смањење укупног времена производње кроз смањење времена потребног за инспекцију и одржавање сталног-захтеваног нивоа квалитета инспекције кроз аутоматизацију активности које обавља планер инспекције.

Ограничење развијеног приступа је примена само за *PD*, не и делове са слободним површинама за инспекцију, јер је метод оптимизације развијен само за основне геометријске примитиве из којих се састоје *PD*.

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВЕРИФИКАЦИЈА РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА ПЛАНИРАЊА ИНСПЕКЦИЈЕ И РЕЗУЛТАТИ

6.1 Уводне напомене

У циљу верификације развијеног модела планирања инспекције призматичних делова на *NUMM* и симулације путање, ради визуелне провере колизије између мерног сензора и радног предмета, најпре је написан програм у *Matlab* софтверу. Поред верификације и симулације један од главних циљева написаног програма је и генерисање мерног протокола и листе управљачких података на излазу, а који се потом користе у процесу планирања експеримента и као улаз за експериментална мерења.

6.2 Симулација путање мерног пипка

Као што је речено, симулација инспекције *PD* има за циљ визуелну проверу мерне путање са становишта колизије за дати радни предмет и његове задате толеранције. Базирана је на напред развијеном моделу планирања инспекције и на излазу даје мерни протокол и листу управљачких података, која између осталог садржи податке о координатама мерних тачака и тачака међупозиција. Симулација је развијена уз помоћ три алгоритма, и то:

- алгоритама за дистрибуцију мерних тачака,
- алгоритама за избегавање колизије,
- алгоритама за планирање путање мерног сензора.

6.2.1 Алгоритам за дистрибуцију мерних тачака (ADMT)

ADMT се састоји из пет корака $S1$, $S2$, $S3$, $S4$ и $S5$ датих на слици 6.1.

Корак $S1$ се односи на учитавање улазних параметара алгоритма. Као што је речено, део ових параметара као што су a , b , R , R_1, H , H_1 , \mathbf{n}_p , \mathbf{n}_{pi} и T су преузети из *IGES* датотеке *CAD* модела *PD*, док се N - број мерних тачака задаје у зависности од облика и квалитета задатих толеранција. Константа d_2 се бира у зависности од запремине примитива, а потом се преко ње израчунава константа d_1 . Примера ради за цилиндар полупречника $R = 17.5[mm]$ и висине $H = 20[mm]$, обрасци за израчунавање константи су $d_2 = 0.4 \cdot R$ и $d_1 = 0.2 \cdot d_2$. Такође, у овом кораку се уносе кључне речи *plane*, *circle*, *cylinder*, *cone*, *cone_zar*, *sphere*, и *sphere_zar* неопходне за позивање подрутине у трећем кораку алгоритма односно процедуре *KEYWORD*. Њима су обухваћени сви геометријски примитиви представљени развијеним моделом планирања инспекције и њихови називи одговарају називима примитива раван, круг, цилиндар, купа, зарубљена купа, сфера и зарубљена сфера респективно.

Процедура <i>ADMT</i>
<p>S1:Учитати параметре: $N; a; b; R; R_1; H; H_1; \mathbf{n}_p; \mathbf{n}_{pi}; T; d_2;$ keyword=input(plane; circle; cylinder, cone; cone_zar; sphere; sphere_zar).</p>
<p>S2:Израчунати: $k = \log_2 N$</p>
<p>S3:Позвати процедуру <i>KEYWORD</i></p>
<p>S4: Хомогене координате: $\{P = [s \ t \ w \ h]^T\}$ $\{P_1 = [s_1 \ t_1 \ w_1 \ h]^T\}$ $\{P_2 = [s_2 \ t_2 \ w_2 \ h]^T\}$</p>
<p>S5: Трансформисане координате: $\{P^{tran} = T \cdot P\}$ $\{P_1^{tran} = T \cdot P_1\}$ $\{P_2^{tran} = T \cdot P_2\}$</p>

Слика 6.1: Процедура *ADMT* дистрибуције мерних тачака

У $S2$ израчунава се константа k која фигурише у обрасцу у следећем кораку, а која је преузета из *Hammersley* - евог обрасца тако да у модификованом обрасцу задржава значење као у изворном обрасцу зависећи тако од логаритамске функције за основу два и жељеног броја мерних тачака.

У следећем кораку $S3$ израчунавају се координате тачака $P_i(s_i, t_i, w_i)$, $P_{i1}(s_{i1}, t_{i1}, w_{i1})$ и $P_{i2}(s_{i2}, t_{i2}, w_{i2})$, за различите примитиве кроз позивање следећа четири случаја кључних речи:

- *case plane*,
- *case circle*,
- *case cilinder, case cone, case cone_zar*,
- *case sphere, case sphere_zar*.

Сваки од ових случајева се позива преко унапред наведених кључних речи уз помоћ процедуре **KEYWORD** дате на слици 6.2.

У случају позивања кључне речи *case plane* најпре се формирају вектори $P\vec{P}_{i1}$ и $P\vec{P}_{i2}$ (корак $P1$), а потом израчунавају координате мерних тачака P_i на основу модификованог *Hammersley* - евог обрасца и тачака P_{i1} и P_{i2} (корак $P2$).

За случај позивања кључних речи *case circle* најпре се израчунавају координате мерних тачака, потом се на основу задатог вектора \mathbf{n}_p проверава да ли је реч о спољашњој или унутрашњој инспекцији круга и на основу тога формира вектор \mathbf{n}_{pi} . На основу формираног вектора \mathbf{n}_{pi} формирају се вектори $P\vec{P}_{i1}$ и $P\vec{P}_{i2}$ (корак $P1$).

У случају позивања кључних речи *case cilinder, case cone, case cone_zar*, различитим кључним речима позива се исти случај. Ово је последица исте расподеле координата скупова тачака $P_i(s_i, t_i, w_i)$, $P_{i1}(s_{i1}, t_{i1}, w_{i1})$ и $P_{i2}(s_{i2}, t_{i2}, w_{i2})$, тј. коришћења истих образаца за израчунавање њихових координата. Слично предходној кључној речи, код ових кључних речи најпре се израчунавају координате мерних тачака потом проверава да ли је реч о "спољашњој" или "унутрашњој" инспекцији датих примитива и на основу тога формирају вектори $P\vec{P}_{i1}$ и $P\vec{P}_{i2}$ (корак $P1$).

Процедура KEYWORD	
<p>Switch keyword</p> <p>case plane</p> <p>P1: Израчунати: $\overrightarrow{PP_1} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{d}_1$; $\overrightarrow{PP_2} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{d}_2$</p> <p>P2: For ($i = 0 : (N - 1)$) $\{h_i = i + (1 - i)\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">for ($j = 0 : (k - 1)$) \rightarrow</p> <p style="padding-left: 40px;">$\left\{ \sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p style="padding-left: 20px;">Израчунати: s_i, t_i, w_i</p> <p style="padding-left: 20px;">Поставити ($q = s, t, w$) и ($\lambda = 1, 2$)</p> <p style="padding-left: 20px;">$\rightarrow \{q_{\lambda i} = \overrightarrow{PP_\lambda} \cdot \vec{i} + s_i\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p>end</p> <p>case circle</p> <p>P1: For ($i = 0 : (N - 1)$) $\{h_i = i + (1 - i)\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">Израчунати: s_i, t_i, w_i</p> <p style="padding-left: 40px;">If ($\mathbf{n}_p \cdot \vec{i} = -1$) $\left\{ s_{ni} = \frac{s_i}{R} \right\}$</p> <p style="padding-left: 40px;">$\left\{ t_{ni} = \frac{t_i}{R} \right\} \left\{ w_{ni} = \frac{w_i}{R} \right\}$</p> <p style="padding-left: 40px;">else $\left\{ s_{ni} = -\frac{s_i}{R} \right\}$</p> <p style="padding-left: 40px;">$\left\{ t_{ni} = -\frac{t_i}{R} \right\} \left\{ w_{ni} = -\frac{w_i}{R} \right\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p style="padding-left: 20px;">Израчунати: $\{n_{pi} = [s_{ni} \ t_{ni} \ w_{ni}]^T\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">$\{\overrightarrow{PP_1} = \mathbf{n}_{pi} \cdot \mathbf{d}_1\} \{\overrightarrow{PP_2} = \mathbf{n}_{pi} \cdot \mathbf{d}_2\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">Поставити ($q = s, t, w$) и ($\lambda = 1, 2$)</p> <p style="padding-left: 20px;">$\rightarrow \{q_{\lambda i} = \overrightarrow{PP_\lambda} \cdot \vec{i} + s_i\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p>end</p> <p>case cylinder</p> <p>case cone</p> <p>case cone_zar</p> <p>P1: For ($i = 0 : (N - 1)$) $\{h_i = i + (1 - i)\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">for ($j = 0 : (k - 1)$)</p> <p style="padding-left: 40px;">$\left\{ \sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right\}$</p>	<p>end</p> <p>Израчунати: $s_i, t_i, w_i,$</p> <p>$\{\overrightarrow{O_i} = [0 \ 0 \ w_i]\}$</p> <p>If ($\mathbf{n}_p \cdot \vec{i} = -1$)</p> <p style="padding-left: 20px;">$\left\{ s_{ni} = \frac{s_i}{R} \right\} \left\{ t_{ni} = \frac{t_i}{R} \right\} \{w_{ni} = 0\}$</p> <p>else</p> <p style="padding-left: 20px;">$\left\{ s_{ni} = -\frac{s_i}{R} \right\} \left\{ t_{ni} = -\frac{t_i}{R} \right\} \{w_{ni} = 0\}$</p> <p>end</p> <p>$\{n_{pi} = [s_{ni} \ t_{ni} \ w_{ni}]^T\} \{\overrightarrow{PP_1} = \mathbf{n}_{pi} \cdot \mathbf{d}_1\}$</p> <p>$\{\overrightarrow{PP_2} = \mathbf{n}_{pi} \cdot \mathbf{d}_2\}$</p> <p>Поставити ($q = s, t, w$) и ($\lambda = 1, 2$)</p> <p>$\rightarrow \{q_{\lambda i} = \overrightarrow{PP_\lambda} \cdot \vec{i} + s_i\}$</p> <p>end</p> <p>end</p> <p>case sphere</p> <p>case sphere_zar</p> <p>P1: For ($i = 0 : (N - 1)$) $\{h_i = i + (1 - i)\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">for ($j = 0 : (k - 1)$)</p> <p style="padding-left: 40px;">$\left\{ \sum_{j=0}^{k-1} \left(\left[\frac{i}{2^j} \right] \text{Mod} 2 \right) \cdot 2^{-(j+1)} \right\}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p>Израчунати: $s_i, t_i, w_i, \{\overrightarrow{O_i} = [0 \ 0 \ 0]\}$</p> <p>If ($\mathbf{n}_p \cdot \vec{i} = -1$)</p> <p style="padding-left: 20px;">$\left\{ s_{ni} = \frac{s_i}{R} \right\} \left\{ t_{ni} = \frac{t_i}{R} \right\} \{w_{ni} = 0\}$</p> <p>else</p> <p style="padding-left: 20px;">$\left\{ s_{ni} = -\frac{s_i}{R} \right\} \left\{ t_{ni} = -\frac{t_i}{R} \right\} \{w_{ni} = 0\}$</p> <p>end</p> <p>$\{n_{pi} = [s_{ni} \ t_{ni} \ w_{ni}]^T\} \{\overrightarrow{PP_1} = \mathbf{n}_{pi} \cdot \mathbf{d}_1\}$</p> <p>$\{\overrightarrow{PP_2} = \mathbf{n}_{pi} \cdot \mathbf{d}_2\}$</p> <p>Поставити ($q = s, t, w$) и ($\lambda = 1, 2$)</p> <p>$\rightarrow \{q_{\lambda i} = \overrightarrow{PP_\lambda} \cdot \vec{i} + s_i\}$</p> <p>end</p> <p>end</p>

 Слика 6.2: Процедура **KEYWORD** дистрибуције мерних тачака

За кључне речи *case sphere* и *case sphere_zar* процедура је иста као код предходно наведених кључних речи с тим да је разлика у w_i - координати тачке O_i . Наиме због избегавања колизије на нивоу примитива које заступају ове кључне речи z - координата има вредност нула, а не вредност w_i као у предходном случају. Ова измена обезбеђује да мерни сензор приликом инспекције примитива као што су сфера и зарубљена сфера увек прилази управно на мерну површину што отклања могућност колизије на нивоу једног од ових примитива.

У кораку *S4* формирају се хомогене координате. Сва три скупа тачака се записују у матричном облику приказаном уз помоћ система матричних једначина 6.1. Ово је неопходно јер развијени метод планирања инспекције разматра примитиве и са становишта позиције и становишта оријентације. Прелазак на хомогене координате омогућава трансформације између *KS* као што су *KS* радног дела, *KS* мерног сензора, *KS* мерне машине итд. и одређивање положаја и оријентације примитива у односу на њих.

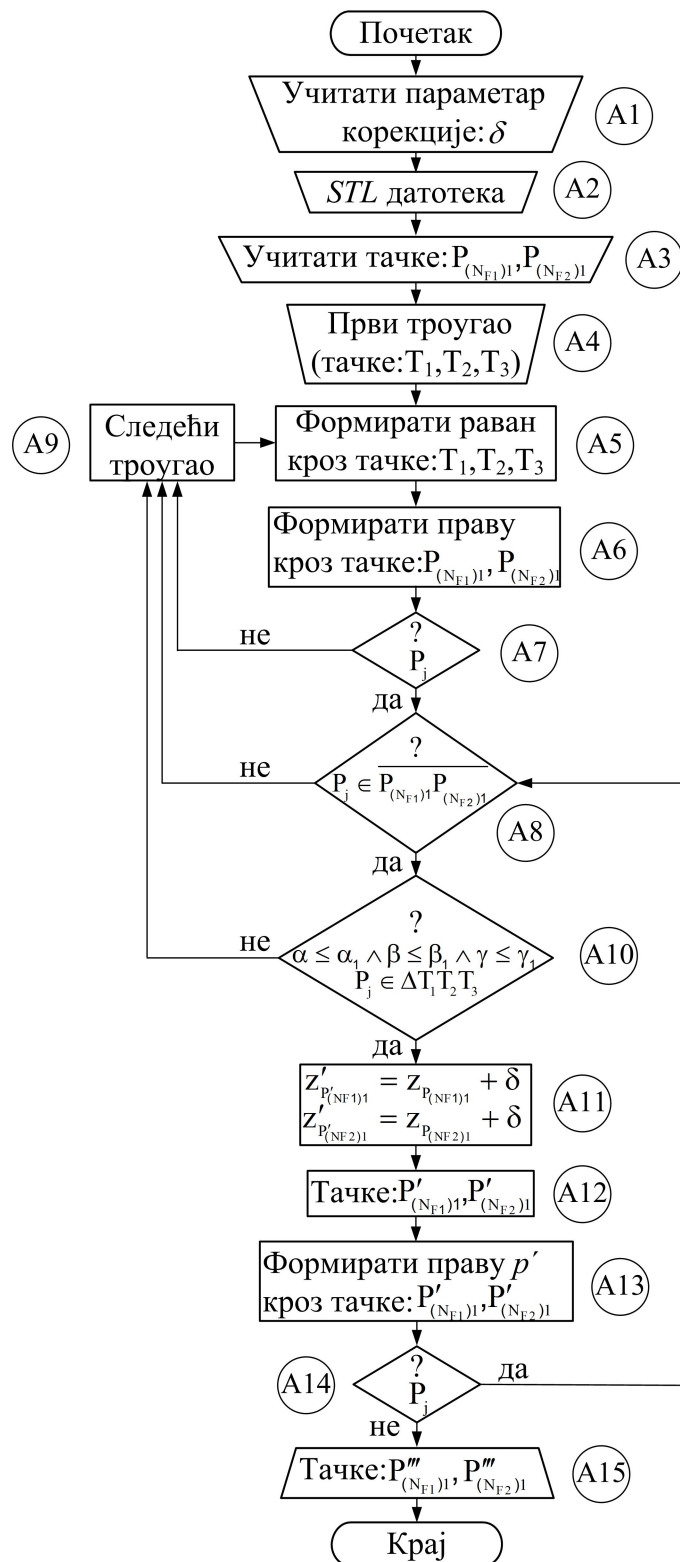
$$\begin{aligned} P &= [s \quad t \quad w \quad h]^T \\ P_1 &= [s_1 \quad t_1 \quad w_1 \quad h_1]^T \\ P_2 &= [s_2 \quad t_2 \quad w_2 \quad h_2]^T \end{aligned} \tag{6.1}$$

Запис у хомогеним координатама омогућава да се множењем са матрицом T (са лева) изврши њихова трансформација из *KS* примитива (O_F, X_F, Y_F, Z_F) у *KS* мерног дела (O_W, X_W, Y_W, Z_W), што је учињено у кораку *S5*.

6.2.2 Алгоритам за избегавање колизије (AIK)

Алгоритам за избегавање колизије је базиран на напред изложеном принципу избегавања колизије. Као што је речено принцип, па и сам *AIK* је заснован на *STL* моделу представљања геометрије *PD*, његових толеранција, координатама последње тачке $P_{(N_{F1})1}$ за инспекцију предходног примитива и координата прве тачке $P_{(N_{F2})1}$ за инспекцију наредног примитива. Алгоритам је итеративан и састоји се из перманентног пресецања запремине радног дела, представљеног у *STL* формату, са одговарајућом дужи до тренутка када више

нема пресека између запремине и дужи. Не постојање пресека између дужи и запремине је показатељ не постојања колизије између мерног сензора и радног предмета. Комплетан алгоритам *AIK* је показан на слици 6.3.



Слика 6.3: Алгоритам за избегавање колизије

Улазни параметри алгоритма су вредност параметра корекције по z -оси означеног са $\delta[mm]$ (корак (A1)), STL датотека експортирана на основу CAD модела PD (корак (A2)) и координате тачака $P_{(NF_1)1}$ и $P_{(NF_2)1}$ (корак (A3)). Учитавањем координата темена првог троугла $\Delta T_1 T_2 T_3$ (корак (A4)), формира се једначина равни кроз те три тачке (корак (A5)). Истовремено се формира једначина праве p кроз учитане тачке $P_{(NF_1)1}$ и $P_{(NF_2)1}$ (корак (A6)). Потом се проверава да ли постоји пресечна тачка P_j , $j \in \{0, 1, 2, 3, \dots, q\}$, између формиране равни и праве (корак (A7)), и да ли она припада дужи $\overline{P_{(NF_1)1}P_{(NF_2)1}}$ (корак (A8)). Уколико не постоји P_j или постоји али не припада дужи $\overline{P_{(NF_1)1}P_{(NF_2)1}}$ учитавају се темена следећег троугла (корак (A9)). Ако постоји P_j и припада дужи проверава се да ли је пресечна тачка у делу површине равни која је ограничена троуглом (корак (A10)). Даље се проверавају услови: $\alpha \leq \alpha_1$ и $\beta \leq \beta_1$ и $\gamma \leq \gamma_1$, такође дати у кораку (корак (A10)). Ако нису испуњена сва три наведена услова тачка не припада делу равни ограниченом троуглом. Тада се учитава нови троугао (корак (A9)). Ако је испуњен услов то значи да се тачка налази у површини ограниченој троуглом ($P_j \in \Delta T_1 T_2 T_3$) и да је потребно извршити корекцију z – координата учитаних тачака по обрасцу 6.2, како не би дошло до колизије између PD и мерног пипка (корак (A11)).

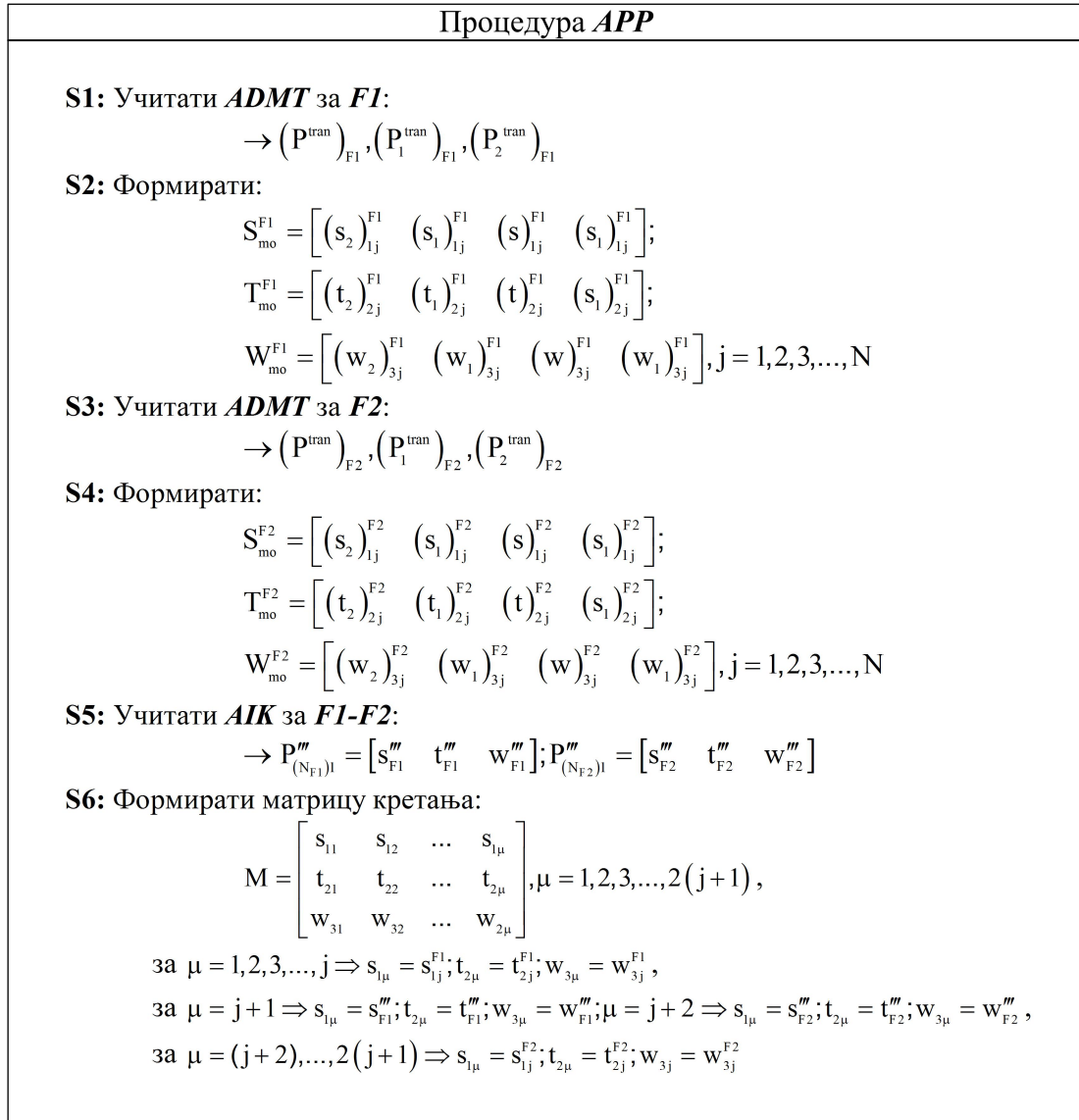
$$\begin{aligned} z'_{P_{(NF_1)1}} &= z_{P_{(NF_1)1}} + \delta \\ z'_{P_{(NF_2)1}} &= z_{P_{(NF_2)1}} + \delta \end{aligned} \quad (6.2)$$

После описане корекције формирати тачке $P'_{(NF_1)1}(x_{P_{(NF_1)1}}, y_{P_{(NF_1)1}}, z'_{P_{(NF_1)1}})$ и $P'_{(NF_2)1}(x_{P_{(NF_2)1}}, y_{P_{(NF_2)1}}, z'_{P_{(NF_2)1}})$ (корак (A12)) као и праву p' која их садржи (корак (A13)). Проверити да ли постоји нова пресечна тачка P_j између p' и учитане равни (корак (A14)). Ако постоји поновити предходно описани поступак провере да ли се P_j налази на дужи и површини ограниченој троуглом. Ако не постоји кориговане тачке $P'_{(NF_1)1}$ и $P'_{(NF_2)1}$ усвојити као тачке у којима неће доћи до колизије при преласку са једног на други примитив при инспекцији једног облика толеранције (корак (A15)). За пример показан приликом илустрације

принципа избегавања колизије, AIK три пута коригује z -координату и усваја тачке $P_{(N_{F1})1}'''$ и $P_{(N_{F2})1}'''$.

6.2.3 Алгоритам за планирање путање мерног сензора (APP)

APP базиран на $ADMT$ и AIK показан је на слици 6.4. Састоји се из шест корака. У првом кораку $S1$ учитава се $ADMT$ за примитив $F1$ и као излаз добијају се матрице: $(P^{tran})_{F1}$, $(P_1^{tran})_{F1}$ и $(P_2^{tran})_{F1}$. У другом кораку $S2$ формирају се три матрице врста: S_{mo}^{F1} , T_{mo}^{F1} и W_{mo}^{F1} , чији редослед елемената одговара смеру кретања мерног сензора. Корак $S3$ и $S4$ су аналогни са $S1$ и $S2$, с тим да се односе на податке за примитив $F2$.



Слика 6.4: Процедура планирања путање мерног сензора

Израз из предходна четири корака су матрице са тачно дефинисаним кретањем мерног сензора за $F1$ и $F2$ одвојено. Неопходно је још позвати AIK у кораку $S5$ и добити $P'''_{(NF1)1}$ и $P'''_{(NF2)1}$ за комплетирање путање без колизије за инспекцију $F1$ и $F2$. Матрица M у кораку $S6$ даје све координате тачака, укључујући и тачке из $S5$, у правилно постављеном редоследу тако да обезбеђује кретање мерног сензора без колизије.

6.2.4 Генерисање мерног протокола и управљачке листе података

Развијени модел симулације путање мерног сензора на излазу даје мерни протокол и управљачку листу података за оба тест радна PD . Пример дела управљачке листе података је показан на слици 6.5. Мерни протокол се даље користи за *on-line* програмирање мерне машине $ZEISS\ UMM\ 500$, генерисање програма за ову машину, процеса мерења и верификације развијеног модела планирања инспекције.

```

=====
                        STEUERDATENLISTE      ZEISS  UMESS
WERKSTUECKNAME:   WP-1par
DATEINAME:       CNC_____53B
STEUERDATENZEILEN: 297                      SOLLWERTZEILEN: 0
=====

```

NR	X	Y	Z	Funktion	SKZ	AKZ	PKZ	StKZ	ADR
	Dialog								
NR	Nennmass	o.Tol	u.Tol	Funktion	SKZ	AKZ	PKZ	StKZ	
NR	Bezeichnung			Funktion	SKZ	AKZ	PKZ	StKZ	ADR
1	-39.3000	0.5000	-0.5000	LFZ SOLLW S2	1	0	9919	0	
2		0 0 0	0 0	SOLLWERTE SN	0	2	1459	0	
3		0.0000	0.0000	LFZ SOLLW SN	0	0	9919	0	
4	31491				14528	0	8224	2 8224	
5	wp1			PROTOKOLLKOPF	0	8	1610	1650	
6	ZEICHNUNGS NR			FZ P-KOPF	0	0	9911	0	
7	AUFTRAGS NR			FZ P-KOPF	0	0	9911	0	
8	LIEFERANT/KUNDE			FZ P-KOPF	0	0	9911	0	
9	ARBEITSGANG			FZ P-KOPF	0	0	9911	0	
10				FZ P-KOPF	0	0	9911	0	
11				LFZ P-KOPF	0	0	9919	0	
12	34.4735	62.7517	21.1390	ZW-POS	0	11110	0	1101	
13				FLAECHE	0	0	1103	1410	
14	34.9983	5.3066	21.4279	ZW-POS	0	11110	0	1101	
15	13.4146	5.1101	21.4796	ZW-POS	0	11110	0	1101	
16	13.3693	5.0201	3.9978	ANTASTUNG -Z	0	11107	0	1103	
17	13.3897	5.0573	11.0016	ZW-POS	0	11110	0	1101	
18	88.2909	5.7406	10.8213	ZW-POS	0	11110	0	1101	

Слика 6.5: Део управљачке листе података радног дела бр. 1

6.3 План експеримента

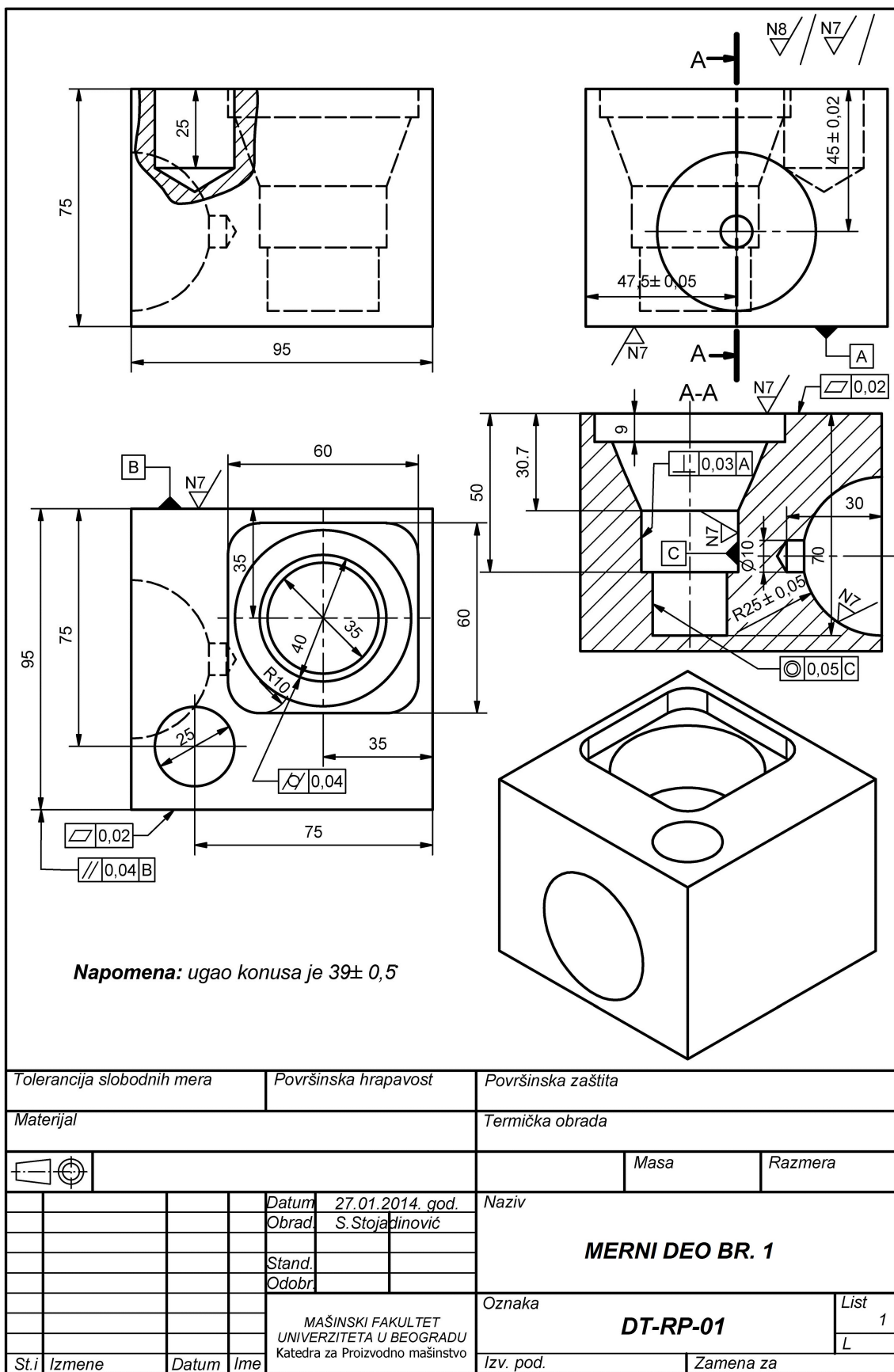
План експеримента обухвата све активности неопходне за припрему и процес мерења тест делова. У њих спадају пројектовање и обрада радних предмета, затим калибрација машине *ZEISS UMM 500* на бази артефакта према *ISO 10360* и план мерења који садржи све податке за писање програма мерења.

6.3.1 Пројектовање делова

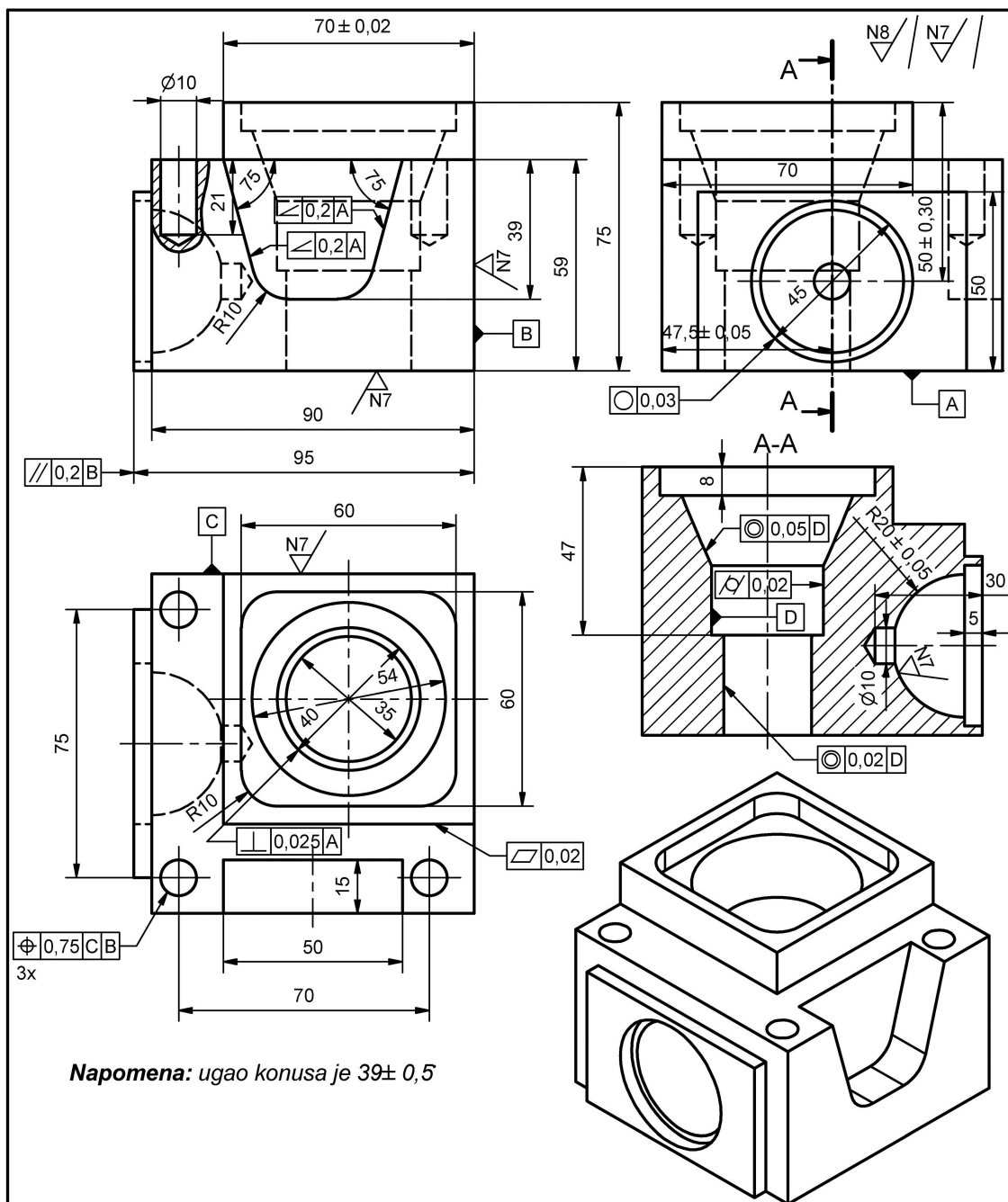
За верификацију развијеног модела планирања инспекције пројектована су два тест *PD*. Цртеж првог једноставнијег тест радног предмета показан је на слици 6.6. Део је пројектован тако да садржи све геометријске примитиве које је обухватио развијени модел и знатног броја стандардних облика толеранција (табела 6.1). Цртеж другог комплекснијег тест призматичног дела показан је на слици 6.7. Основна разлика у односу на први тест радни предмет је у броју толеранција, повишеном квалитету толеранција и геометријској комплексности која је код другог тест радног предмета израженија. Такође, други део садржи нове облике толеранција који се тестирају.

Табела 6.1: Тестирани облици толеранција

Толеранције	Карактеристика	Цилиндр. тол. зона	Тол. зона између две равни или осе	Тестирано
Толеранције облика	Правост	да	да	не
	Равност	не	да	да
	Кружност	да	не	да
	Цилиндричност	да	не	да
	Профил линије	-	-	не
	Профил површине	-	-	не
Толеранције правца	Паралелност	не	да	да
	Управност	не	да	да
	Нагиб	не	да	да
Толеранције положаја	Положај	да	да	да
	Концентричност и коаксијалност	да	не	да
	Симетричност	да	да	не
Толеранције бацања	Бацање	-	-	не
	Укупно бацање	-	-	не



Слика 6.6: Радионички цртеж мерног дела бр.1

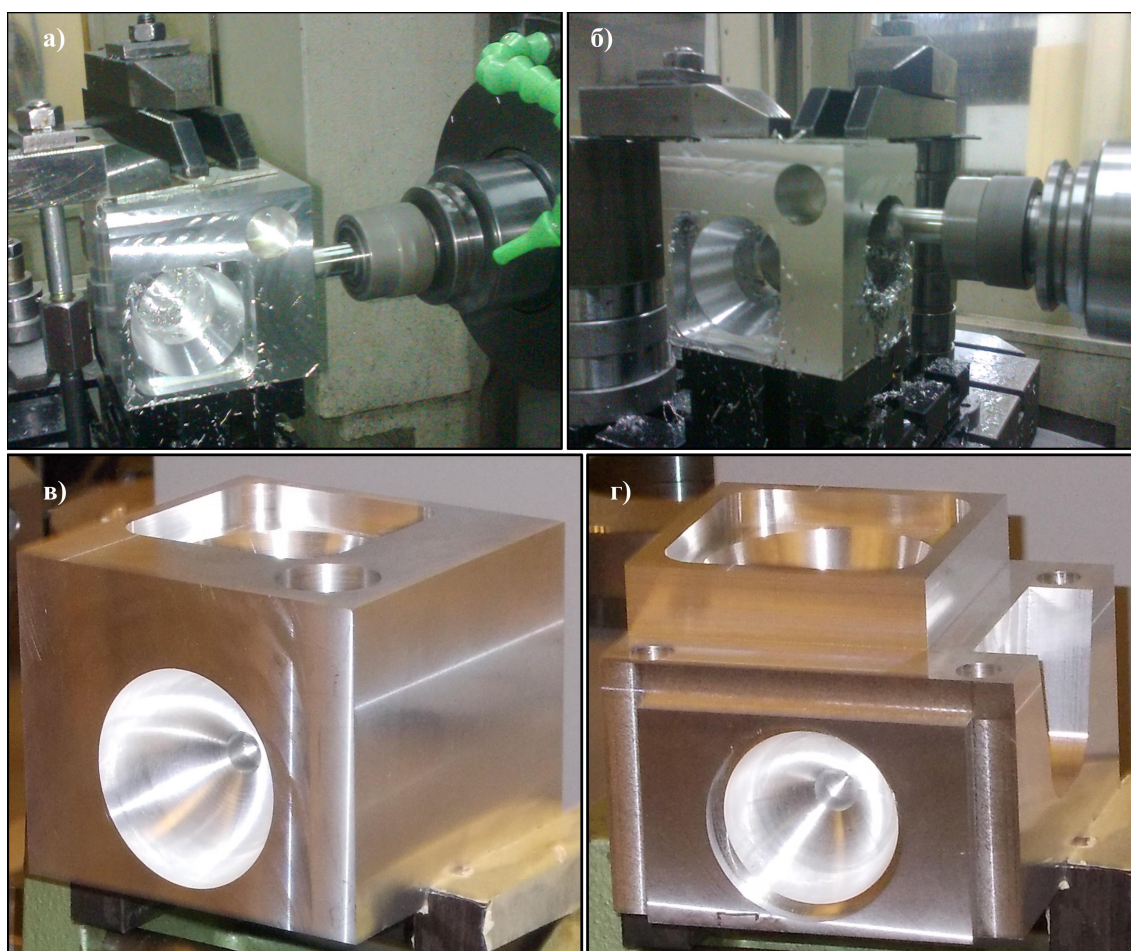


Tolerancija slobodnih mera		Površinska hrapavost		Površinska zaštita	
Materijal				Termička obrada	
				Masa	Razmera
		Datum 27.01.2014. god.		Naziv MERNI DEO BR. 2	
		Obrad S.Stojadinović			
		Stand.			
		Odobr.			
		MAŠINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU Katedra za Proizvodno mašinstvo		Oznaka DT-RP-02	List 1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izv. pod.	Zamena za

Слика 6.7: Радионички цртеж мерног дела бр.2

6.3.2 Обрада делова

С обзиром да су пројектована два тест *PD* за потребе експерименталне верификације неопходно је обрадити тако пројектоване делове. Обрада је извршена у Заводу за машине алатке Машинског факултета у Београду на обрадном центру *LOLA HMC 500* у квалитету обрађених површина *N7* и *N8*. Обрада је најпре извршена на првом, технолошки, геометријски и метролошки једноставнијем делу (слика 6.8 под в)), а потом и на другом комплекснијем делу (слика 6.8 под г)).

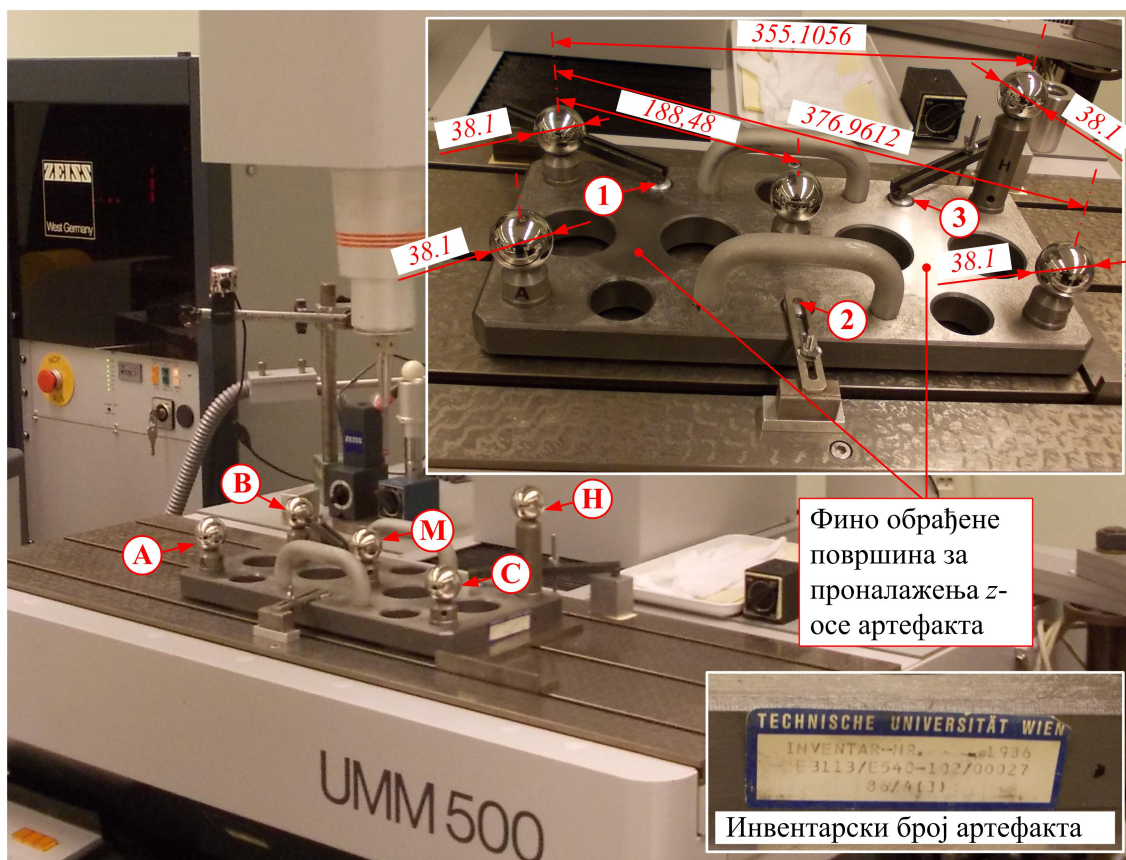


*Слика 6.8: Обрада делова на обрадном центру LOLA HMC 500: а) и б) захвати грубе и фине обраде глодањем полусфере лоптастим глодалом пречника $\phi 18$ [mm]; в) израдак једноставнијег *PD*; г) израдак сложенијег *PD*.*

6.3.3 Калибрација машине ZEISS UMM 500 према ISO 10360-2

Пре процеса инспекције пројектованих и обрађених тест делова проверена је тачност машине на бази артефакта домаће производње (слика 6.9) према

стандарду ISO 10360-2 [180].



Слика 6.9: Артефакт за калибрацију мерне машине

Артефакт је пројектован и развијен на Техничком Универзитету у Бечу, *Vienna University of Technology (TUW)*. Постављање и стезање артефакта на радни сто машине се врши преко три тачке обележене са позицијама 1, 2 и 3. Услови калибрације су температура $T = 20^{\circ}$, коришћење хигијенске опреме као што су папуче, рукавице итд., као и прописано растојање од артефакта приликом мерења због нарушавања прописаног интензитета температурског поља. На артефакту је могуће тестирати тачност машине за дужинске мере, пречник, управност и паралелност. Састоји се из пет кугли интерно означених *A*, *B*, *C*, *H* и *M*, пречника $D = 38.1[mm]$ обрађених у квалитету *N2*. Приликом мерења коришћен је постојећи протокол мерења као и програм за мерну машину. Део резултата мерења поновљених 5 пута показан је на слици 6.10. Посматрајући податке за растојање између кугли *B-H* ($355,1056 [mm]$), *B-C* ($376,9612 [mm]$) и *B-M* ($188,48 [mm]$), дате на обрасцу на слици 6.10, може се закључити да стандардно одступање измерених резултата није више од $0,2 [\mu m]$

што представља ниво тачности ове машине.

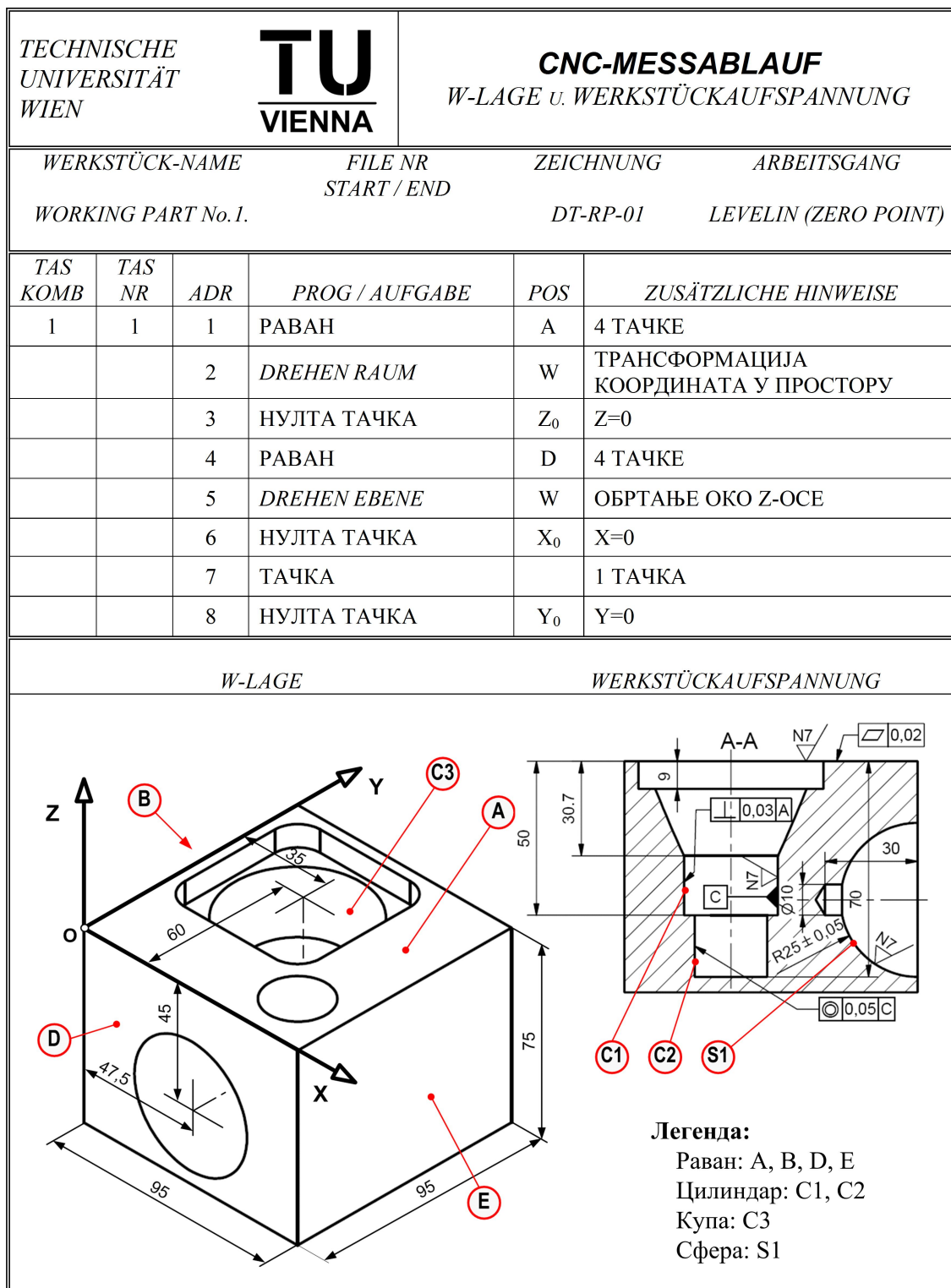
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN		TU VIENNA		Prüfprotokoll <i>Ermittlung der Meßunsicherheit</i>				
Prüfmittel: Prüfkörper d. TU			KMG:			Bearbeiter		Blatt von
Adr.- Nr.	Pos. Bez.	Nennmaß	1. Messung	2.	3.	4.	5. Messung	Streuung in μm
4	КУГЛА А	38,1	38,0984	38,0984	38,0983	38,0983	38,0984	0,1
5	КУГЛА В	38,1	38,0996	38,0995	38,0994	38,0992	38,0993	0,2
10	КУГЛА М	38,1	38,0983	38,0983	38,0983	38,0983	38,0983	0
11	КУГЛА С	38,1	38,0988	38,0986	38,0987	38,0987	38,0986	0,1
12	КУГЛА Н	38,1	38,0988	38,0987	38,0988	38,0987	38,0987	0,1
15	ВН RD	355,1056	355,1024	355,1028	355,1027	355,1027	355,1027	0,2
	ВН WX		9,7262	9,7262	9,7262	9,7262	9,7262	0
	ВН WY		89,9792	89,9793	89,9793	89,9793	89,9793	0
	ВН WZ		80,2738	80,2738	80,2738	80,2738	80,2738	0
16	ВН X		349,9982	349,9986	349,9985	349,9986	349,9985	0,2
	ВН Y		0,1291	0,1282	0,1283	0,1281	0,1282	0,4
	ВН Z		59,9912	59,9912	59,9911	59,9909	59,9911	0,1
19	BC RD	376,9612	376,8863	376,8868	376,8867	376,8868	376,8867	0,2
	BC WX		21,7813	21,7814	21,7814	21,7814	21,7814	0
	BC WY		111,7813	111,7814	111,7814	111,7814	111,7814	0
	BC WZ		90,0008	90,0008	90,0008	90,0008	90,0008	0
20	BC X		349,9794	349,9795	349,9795	349,9795	349,9794	0,1
	BC Y		139,849	139,85	139,8498	139,85	139,85	0,4
	BC Z		0,0053	0,0052	0,0053	0,0055	0,0052	0,1
23	BM RD	188,48	188,475	188,4754	188,4751	188,4753	188,4753	0,2
	BM WX		21,7749	21,775	21,775	21,775	21,775	0
	BM WY		111,7749	111,775	111,775	111,775	111,775	0

Слика 6.10: Део резултата мерења артефакта

Исто се може закључити приликом анализе резултата за пречнике кугли, код којих вредност стандардне девијације ни у једном случају не прелази 0,2 [μm]. Имајући у виду габарите тест делова ово даље имплицира на сасвим задовољавајућу димензионалну тачност и тачност инспекције пречника. Анализом преосталих резултата долази се до истог заљкучка за толеранције управности и паралелности.

6.3.4 План инспекције делова

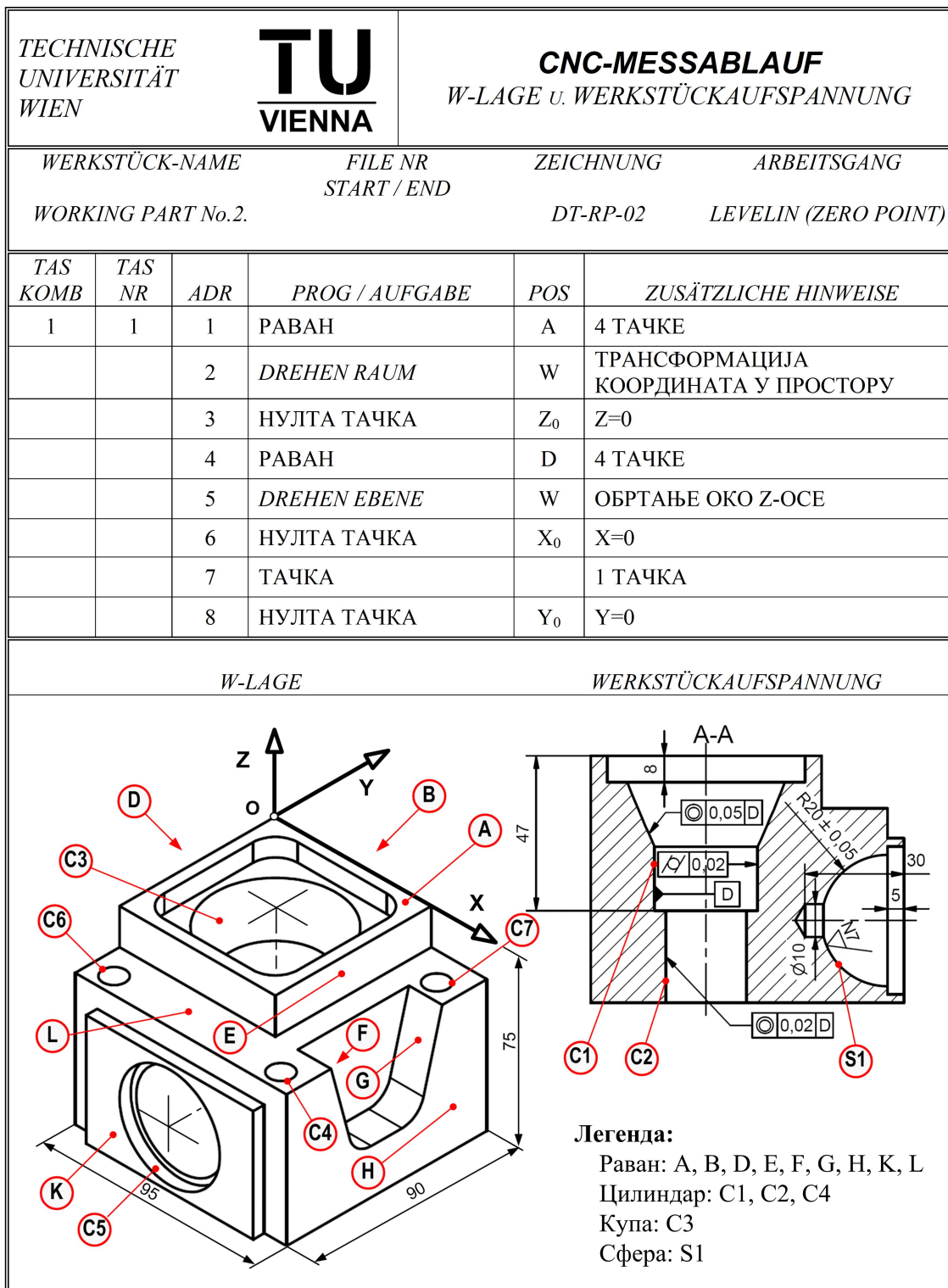
План инспекције садржи све неопходне помоћне податке за писање програма за мерну машину. За лабораторију у којој је извршено мерење ови подаци се чувају на интерном обрасцу. На примеру оба тест дела дат је образац са потребним подацима на сликама 6.11 и 6.12.



Слика 6.11: Припрема за мерење дела бр.1

За тест PD који се мере показани су KS , обележени су геометријски примитиви чија инспекција се планира и неке од мера као што су координате центра сфере, положај осе цилиндара и конуса, као и подаци и команде за

NUMM за уравнивање мерног дела. Уравнивање се састоји од фиксирања Z -осе преко равни A , затим фиксирања X -осе преко равни D . Оса Y и координатни почетак се формира додиром у једној тачки равни A .



Слика 6.12: Припрема за мерење дела бр.2

6.4 Кратак осврт на лабораторију

Инспекција делова је извршена на Техничком Универзитету у Бечу у Нанометролошкој лабораторији за високо прецизна мерења, *High Precision Measurement Room - Nanometrology Laboratory* (слика 6.13).



Слика 6.13: Нанометролошка лабораторији за високо прецизна мерења

Лабораторија се налази у подруму главне зграде на Техничком Универзитету у Бечу. Одвојена је механички и структурно (концептом "соба у соби") зидом дебљине 30 [cm] који је вибрационо изолован од околине. Састоји се из простора лабораторије где је смештена мерна опрема, контролне собе и предсобља. Простор са мерном опремом је под контролисаним утицајем околине на мерење у погледу температуре (температурски услов, конвекција и зрачење), вибрација, влажности ваздуха и загађења. Кроз поуздан рад клима уређаја континуално се надзиру параметри као што су температура, влажност ваздуха, проток ваздуха и присуство честица у лабораторији. Основне карактеристике лабораторије су дате у табели 6.2.

Табела 6.2: Техничке карактеристике лабораторије [181]

Дужина у [m]	L=12
Ширина у [m]	B=5.8
Висина у [m]	H=2.8
Површина у [m ²]	P=70
Запремина у [m ³]	195
Однос циркулације ваздуха по сату	25 промена
Процент свежег ваздуха	18
Референтна температура	20°C ± 0.1°C
Релативна влажност	45% ± 5
Филтрација ваздуха	99,97 % свих честица већих од 0,3[μm]
Изолација вибрација - максималне подземне амплитуде на фреквенцијама већим од 5 [Hz]	0,5 [μm]

6.5 Инспекција делова

Процес инспекције у нашем експерименту се састоји из припремног процеса и процеса мерења. Припремни процес обухвата:

- постављање мерног дела са анализом помоћног прибора,
- конфигурирање мерних пипака,
- калибрација мерних пипака уз помоћ мерне кугле,
- уравнивање *PD*.

Процес мерења је заснован на мерном протоколу добијеном као излаз из процеса симулације и управљачкој листи података (*STEUERDATENLISTE ZEISS UMESS*) која се такође добија као излаз. Мерење оба дела је извршено у једном стезању и конфигурацији пипака показаним на сликама 6.14 и 6.15. На основу генерисаног мерног протокола извршено је програмирање *NUMM*. Развијени модел користи подлогу расположивог софтвера *UMESS* као евалуациони критеријум мерног процеса. Експериментална инсталација за мерење првог *PD* показана је на слици 6.14, а другог *PD* на слици 6.15.



Слика 6.14: Експериментална инсталација за мерење дела бр.1



Слика 6.15: Експериментална инсталација за мерење дела бр.2

Помоћни прибор коришћен за причвршћавање PD је машинска стега. Помоћни прибор коришћен да се радни делови доведу у достизиви радни простор пипака без њихове колизије са радним столом $NUMM$ је раван мерни сталак ослоњен на сто $NUMM$ у три тачке. Експеримент је извршен на мерној машини $ZEISS UMM 500$ са основним техничким карактеристикама датим у табели 6.3. Развијени метод се може имплементирати и на друге $NUMM$ и софтвере који их прате. То сведоче и пробна мерења која смо извели на машини чији произвођач је DEA и софтверу $PC - DMIS$.

Табела 6.3: Техничке карактеристике $NUMM$

Број оса:	3(X,Y,Z)
Радни простор у [mm]:	
X	500
Y	200
Z	300
Аутоматска измена сензора:	да
Максимална маса мерног предмета у [kg]:	150
Резолуција [μm]:	0,1
Софтвер:	ZEISS UMESS
MPE у [μm]:	0,4+L/600
Тачност у [μm]:	0,2

6.6 Резултати мерења

За означене примитиве дате у плану инспекције делова, у табели 6.4 дати су резултати мерења за оба PD . Као што се то може видети у табелама мерење је поновљено пет пута и израчуната је стандардна девијација.

Резултати аутоматске инспекције два тест PD показују да су све толеранције дела у цртежом прописаним границама. Ово потврђује да је изложени модел још један успешан приступ аутоматској инспекцији PD и добра основа за развој интелигентног приступа планирању инспекције PD . Комплексна геометрија PD се мења скупом тачака чији редослед дефинише путању без колизије. Представљање путање мерног пипка скупом тачака оставља могућност њене оптимизације.

Табела 6.4: Резултати мерења тест делова

Тест део	РБ	Толеранције			Резултати мерења						
		Назив	Ознака	Вред. у [mm]	1.	2.	3.	4.	5.	Дев. у [μm]	
PD 1	1	Равност	A	0,02	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,1
	2	Равност	E	0,02	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0
	3	Пречник	S1	±0,1	50,0851	50,0855	50,0852	50,0856	50,0855	50,0855	0,2
	4	X-позиција	S1	±0,05	47,4611	47,461	47,4607	47,4611	47,4611	47,4611	0,2
	5	Z-позиција	S1	±0,02	45,0148	45,0148	45,0146	45,0145	45,0146	45,0146	0,1
	6	Управност	A,C1	0,03	0,0014	0,0024	0,0023	0,0022	0,0023	0,0023	0,4
	7	Цилиндричност	C1	0,04	0,009	0,0089	0,0091	0,009	0,009	0,009	0,1
	8	Коаксијалност	C1,C2	0,05	0,0474	0,0458	0,0456	0,0455	0,0462	0,0462	0,8
	9	Угао	C3	±0,5	39,2991	39,2991	39,2995	39,2982	39,2991	39,2991	0,5
	10	Паралелност	B,E	0,04	0,035	0,0346	0,035	0,0348	0,035	0,035	0,2
PD 2	11	Растојање		±0,02	70,0111	70,0111	70,0112	70,0111	70,0106	70,0106	0,2
	12	Равност	E	0,02	0,0072	0,0069	0,0071	0,0071	0,0072	0,0072	0,1
	13	Управност	A,C1	0,025	0,0143	0,0142	0,0142	0,0143	0,0148	0,0148	0,3
	14	Угао	A,G и A,F	0,2	15	15	15	15	15	15	0,0
	15	Пречник	S1	±0,1	40,093	40,0936	40,0934	40,0936	40,0928	40,0928	0,4
	16	X-позиција	S1	±0,05	47,5022	47,5026	47,5025	47,5021	47,501	47,501	0,6
	17	Z-позиција	S1	±0,3	49,7926	49,7926	49,7927	49,7925	49,7927	49,7927	0,1
	18	Паралелност	B,K	0,2	0,1366	0,1369	0,136	0,1361	0,1369	0,1369	0,4
	19	Цилиндричност	C1	0,02	0,0042	0,0043	0,0041	0,004	0,0041	0,0041	0,1
	20	Угао	C3	±0,5	39,2986	39,2985	39,2983	39,2991	39,2992	39,2992	0,4
	21	Кружност	C5	0,03	0,0094	0,0092	0,0092	0,0101	0,0096	0,0096	0,4
	22	Позиција	C7,L	0,75	0,6175	0,6277	0,6332	0,6201	0,6125	0,6125	8,2
	23	Позиција	C6,L	0,75	0,5067	0,5021	0,5219	0,5073	0,5032	0,5032	8,0
	24	Позиција	C4,L	0,75	0,6471	0,6483	0,6416	0,6481	0,6424	0,6424	3,2
	25	Коаксијалност	C1,C2	0,02	0,0068	0,008	0,008	0,0091	0,0092	0,0092	1,0
	26	Коаксијалност	C1,C3	0,05	0,0409	0,041	0,0408	0,0406	0,053	0,053	5,4

На основу вектора примитива и вектора пуноће примитива могуће је конфигурисати мерне пипке аутоматски и тако смањити припремно време мерења.

Експеримент је обухватио три врсте мерења. Прво мерење је извршено *on – line* програмирањем *NUMM*, друго на основу програма дефинисаног *CAD* софтвером (*Pro/ENGINEER*) и треће мерење по протоколу дефинисаном моделом који је развијен у овом раду. Резултати поређења по критеријуму минималног пређеног пута мерног сензора, за поједине примитиве, су дати у табели 6.5. При томе, као што је речено, потребне величине су обележене као: d_s – дужина мерне путање генерисане софтвером; d_m – дужина ручно програмиране мерне путање; d_o – дужина оптимизоване мерне путање; I_1 унапређење путање дефинисане моделом у односу на софтверску путању; I_2 – унапређење путање дефинисане моделом у односу на ручно програмирану мерну путању и I_3 – унапређење оптимизоване путање у односу на иницијалну путању дефинисану моделом планирања инспекције.

Табела 6.5: Резултати поређења

Резултати	Примитиви				
	Раван	Круг	Зарубљена полусфера	Цилиндар	Заруб. конус
$d_m[mm]$	203.3896	154.3540	244.8584	290.9837	507.0366
$d_s[mm]$	202.6522	126.4417	183.6755	228.9870	440.1399
$d_o[mm]$	159.4604	110.2462	159.0962	172.2142	307.6091
$D_{tot}[mm]$	163.9298	119.1512	180.7477	179.7520	312.2379
$P_s = D_{tot}/d_s[\%]$	80,89	94,23	98,40	78,50	70,94
$P_m = D_{tot}/d_m[\%]$	80,60	77,19	73,82	61,77	61,58
$P_o = d_o/D_{tot}[\%]$	97,27	92,53	88,02	95,81	98,52
$I_1 = 100 - P_s[\%]$	19,11	5,77	1,60	21,50	29,06
$I_2 = 100 - P_m[\%]$	19,40	22,81	26,18	38,23	38,42
$I_3 = 100 - P_o[\%]$	2,73	7,47	11,98	4,19	1,48

Мерење времена инспекције је релативно комплексно и могла би се остварити слично примени *RTM* метода код индустријских робота. Из тог разлога, у овим истраживањима времена су мерена посредно и то кроз дужину мерне путање. С обзиром да је дужина мерне путање приближно директно пропорционална времену мерења то се вредности дужине путање приближно односе и на скраћење потребног времена мерења PD . Тако резултати дати у табели 6.5, приближно се односе и на скраћење времена мерења.

7 ЗАКЉУЧАК

Развој интелигентних система за планирање инспекције је императив и предуслов за развој нове генерације технолошких система и дигиталног квалитета заснованог на глобалном интероперабилном моделу производа. Интероперабилни модел интегрише *CAD-CAM-CAI* информације у дигиталном окружењу и представља основу за виртуелну симулацију и планирање инспекције на бази знања за призматичне делове на нумерички управљаним мерним машинама.

NUMM је базни елемент флексибилне аутоматизације у производној метрологији и представља незаобилазан фактор у инспекцији призматичних делова. Интезивна истраживања која се данас спроводе, односе се на решавање проблема интелигентног планирања инспекције на *NUMM*, као предуслова за развој интелигентних мерних машина, с једне стране, и смањење времена мерења с обзиром на данас све више изражену геометријску и функционалну варијантност производа.

Инспекција на мерним машинама је базирана на комплексној софтверској подршци за различите класе метролошких задатака (толеранција). Спровођење униформног плана инспекције на њима представља специјални проблем, који зависи од метролошке комплексности призматичних делова, интуиције и искуственог знања оног ко планира инспекцију. Елиминација интуиције, представљање знања, поновна употреба и дељење знања кроз развој интелигентног концепта планирања инспекције способног да у датом тренутку донесе одлуку, представља решење наведеног проблема. При развоју интелигентног концепта акценат је на генерисању оптималне путање мерног сензора као фундаменталног дела инспекције призматичних делова. У општем

смислу концепт обухвата:

- развој онтолошке базе знања кроз дефинисање ентитета и правила на основу којих ће се она претраживати у циљу припреме геометријских информација и њиховог повезивања и интеграције са стандардним облицима толеранција посредно, увођењем метролошких примитива и њиховог свођења на геометријске примитиве.
- развој глобалног плана инспекције у којем се дефинише оптимална секвенца инспекције метролошких примитива кроз анализу приступачности мерног сензора и груписање примитива по правцима приступа.
- развој локалног плана инспекције који ће генерисати број и позицију мерних тачака тј. дистрибуцију за све метролошке примитиве и оптималну путању мерног сензора за тако дистрибуиране тачке.

Актуелност планираних истраживања се огледа у неколико истраживачких тема које се односе на: метролошку интероперабилност, интелигентну производну метрологију и дигиталне технолошке системе. Значај покретања истраживања и мотивација је у оствареним резултатима у оквиру истраживачких пројекта покренутих у *SAD* од стране Националног института за стандарде и технологију и водећих Европских метролошких лабораторија, а која се односе се на истраживања развоја интелигентног концепта планирања инспекције призматичних делова у циљу смањења укупног времена мерења на *NUMM* кроз смањење компоненте времена потребног за планирање инспекције. Сва ова истраживања имају за циљ да организују и ефикасно користе знања (искуствена, интуитивна) и закључивања на основу њих, а ради спровођења униформног плана инспекције с обзиром на релативно високу метролошку комплексност и варијантност производа.

Круцијални проблем у планирању инспекције призматичних делова је повезивање толерисаних мера призматичних делова са основним геометријским примитивима према *GD&T* (Geometric and Dimensional Tolerancing), *PMI* (Product Manufacturing Information), *IPIM* (Integrated Product Information Model) и премошћавање јаза између парцијално успешно развијена два

приступа развоју *CAIPP* система, а то су геометријски и толеранцијски. Који од примитива или групе примитива ће бити мерен и када, такође је отворен проблем чије решење успоставља везу између идеалне и реалне геометрије призматичних делова са метролошког аспекта. Истраживања у овој дисертацији су допринос решењу предходно наведена два проблема у циљу реализације дуго очекиваног концепта интелигентног планирања инспекције призматичних делова на *NUMM*.

Имајући у виду напред изложено, обим, домен и актуелне правце истраживања, потврђене су следеће хипотезе на којима су првобитно и базирана истраживања:

- развијена је инжењерска онтологија за домен координатног мерења и база знања заснована на њој за дефинисање веза између геометрије и прописаних толеранција призматичних делова,
- моделирањем примитива за инспекцију, стандардни облици толеранција су сведени на основне геометријске примитиве и тако успостављена директна веза између толеранција и геометријских примитива,
- развијен је глобални план инспекције или модел планирања путање мерног сензора,
- проширена је постојећа *Hammersly* - ева метода за дистрибуцију мерних тачака и добијени су модификовани обрасци за дистрибуцију мерних тачака за основне геометријске примитиве и њихове параметре узимајући у обзир три врсте спољашњих и унутрашњих мерних површина, и то равне, цилиндричне конвексне и цилиндричне конкавне,
- развијен је алгоритам за генерисања оптималне путање мерног сензора дефинисањем зона колизије и решењем проблема трговачког путника применом колоније мрава.

Према постављеним и потврђеним хипотезама, научни доприноси истраживања у овој дисертацији су онтолошка база знања, развијени модел планирања инспекције, модел оптимизације на бази колоније мрава и експериментална верификације модела планирања и оптимизације.

На основу спроведене анализе тренутног стања методологија за развој инжењерске онтологије предложен је метод развоја инжењерске онтологије на концептуалном нивоу у циљу развоја нове методологије за развој инжењерске онтологије. Осим за поновну употребу и дељење знања једног домена, развијени метод дефинише развој онтологије за потребе изградње базе знања као једне од основних компоненти интелигентног система за инспекцију призматичних делова на *NUMM*. Дефинисањем инжењерске онтологије уз помоћ представљеног метода дефинише се скуп термина, који пресликан у домен изградње база знања представља ентитете и релације између ентитета. Класе инжењерске онтологије су ентитети базе знања, а релације између ентитета су особине инжењерске онтологије. Експлицитна примена метода је поновна употреба, дељење података и логичка структура базе знања за интелигентну инспекцију призматичних делова на *NUMM*.

Резултат предложеног метода је итеративан процес развоја онтологије за домен координатне метрологије у пет корака. Имплементација метода у софтверу Protégé извршена је на примеру једног мерног дела и показује да је сасвим оправдан представљени приступ развоја инжењерске онтологије за домен координатне метрологије и инспекцију призматичних делова на *NUMM*.

Генерисање и примена униформног плана инспекције на *NUMM* представља специјални проблем, који зависи од метролошке комплексности призматичних делова, интуиције и искуственог знања оног ко планира инспекцију. Спроведена истраживања дају модел базе знања за планирање инспекције на *NUMM* у циљу решавања овог проблема и развоја интелигентног система за планирање инспекције. Резултат овог приступа је и дефинисање припадности геометријских карактеристика појединим облицима толеранција кроз претраживање графа модела базе знања. Претраживањем графа, општи облици толеранција дефинисани стандардом се повезују са геометријским карактеристикама тако да је могуће дефинисати метролошке секвенце и планирати путању мерног сензора.

Интелигентни приступ планирању инспекцији на мерним машинама је отворен истраживачки простор који интегришући метролошку и геометријску сложеност призматичних делова, интуицију и знање планера инспекције на

излазу даје протокол мерења или листу података за управљање мерном машином. Спроведена истраживања у овој дисертацији дају развој једног новог интелигентног концепта планирања инспекције призматичних делова у циљу смањења времена мерења и повећању аутономности процеса планирања инспекције на основу аутоматског генерисања протокола мерења, оптимизацији путање мерног пипка применом колоније мрава, анализи приступачности односно аутоматском конфигурисању мерних пипака. У ширем смислу истраживања су усмерена на развој глобалног и локалног плана инспекције призматичних делова на мерним машинама. Резултати експеримента показују да је развијени концепт један успешан приступ интелигентној инспекцији и добар основ за даље усавршавање у повећање аутономности. Концепт обједињава комплексне анализе садржане у развијеном моделу планирања инспекције као што су математички модел инспекције призматичних делова, модел примитива за инспекцију, дистрибуција мерних тачака, анализа приступачности мерног сензора, избегавање колизије и планирање путање мерног сензора. Симулација процеса мерења је базирана на моделу планирања инспекције и омогућава визуелну проверу путање мерног пипка и генерисање протокола мерења. Примена и корист од модела је јако изражена у случају инспекције геометријски комплексних призматичних делова са великим бројем толеранција и израженој геометријској варијантносној у појединачној производњи.

Оптимална мерна путања је поређена са *on – line* програмираном мерном путањом и аутоматски генерисаном мерном путањом у софтверу *Pro/ENGINEER* (CMM модул) за два посебно произведена призматичана дела за ове потребе. Резултати поређења оптимизоване путање и *on – line* програмиране путање показују минимум 20 % мање вредности дужине оптимизоване путање, док у поређењу са *Pro/ENGINEER* путањом, показује минимум 10 % мање вредности дужине оптимизоване путање при исто сетованим параметрима. Поред наведених конкретних резултата предност *ACO* је проста имплементација захваљујући развијеном математичком моделу који мерну путању своди на скуп тачака, а проблем оптимизације на *TSP*. Излаз из *ACO* је оптимизована, од тачке до тачке, мерна путања за мерење

основних геометријских примитива. Слично програмирању машина алатки, применом G -кода, добијени излаз се практично може користити за *off – line* програмирање $NUMM$ задавањем оптимизоване путање у облику *point-to-point* и интегрисањем у мерни протокол за конкретну $NUMM$..

Спроведена истраживања представљају један одговор на индустријске захтеве као што су висока геометријска варијантност и брз пласман производа на тржиште у циљу смањења укупног времена производње кроз смањења времена потребног за инспекцију и одржавање сталног-захтеваног нивоа квалитета инспекције кроз аутоматизацију активности које обавља планер инспекције.

Ограничење развијеног приступа је примена само за призматичне делове, не и на делове са слободним површинама за инспекцију, јер је модел планирања инспекције и модел оптимизације развијен само за основне геометријске примитиве из којих се састоје призматични делови.

8 БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

NUMM је веома флексибилна машина која омогућава инспекцију широког спектра толеранција *PD*. Међутим, њена флексибилност утиче на тешко оцењивање мерне несигурности, јер се за различите мерне задатке разликују и мерне несигурности. Из тог разлога, за развијени модел планирања инспекције у овој дисертацији, неопходно је развити нови модел оцењивања мерне несигурности. Основа за његов развој је стандард ISO 15530-3 [182], као и рад [43]. При томе, оцењивање мерне несигурности за представљени модел може бити моделирано коришћењем модела виртуелне мерне машине представљене у [43]. Услов моделирања је прилагођавање или модификовање модула који симулира резидуалне и случајне грешке, новом радном простору (500x300x200 [mm]) и типу носеће структуре.

Развијени модел планирања инспекције се може проширити и на слободне површине кроз развој онтолошке структуре у циљу повезивања геометрије и толеранција овог типа површина, као и модела оптимизације. На тај начин би се проширио домен инспекције на знатан удео машинских делова који се производе данас.

Будућа истраживања се могу односити и на развој модела машинског учења и његовог тестирања. На овај начин би се трасирао пут ка развоју концепта интелигентне мерне машине.

9 ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: <http://www.imeko.org/>.
- [2] S. J. Albus (1993) A Reference Model Architecture for Intelligent Systems Design, Intelligent Systems Division, Manufacturing Engineering Laboratory, National Institute of Standards,Technology, Gaithersburg.
- [3] Y. Zhao, X. Xu, T. Kramer, F. Proctor, J. Horst (2011) Dimensional metrology interoperability and standardization in manufacturing systems, *Computer Standards and Interfaces*, 33(6):541–555.
- [4] F. Zhao, J. R. Brown, R. T. Kramer, X. Xu (2011) *Information Modeling for Interoperable Dimensional Metrology*, Springer-Verlag, London.
- [5] E. Westkamper (2007) *Digital Manufacturing In The Global Era*, In Pedro F. Cunha,Paul G. Maropoulos (Eds.): *Digital Enterprise Technology, Perspectives,Future Challenges*, Springer, Stuttgart.
- [6] URL: http://cordis.europa.eu/fp7/ict/micro-nanosystems/docs/fof-beyond-2013-workshop/westkaemper-manufuture_en.pdf 20(accessed%20July%202013).
- [7] URL: <http://www.steptools.com/library/stepnc/> 20(accessed%20December%202013).
- [8] R. Laguionie, M. Rauch, J. Y. Hascoet, S. H. Suh (2011) An eXtended manufacturing Integrated System for feature – based manufacturing with STEP-NC, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(9):785–799.

- [9] URL: http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/ppp-factories-of-the-future-strategic-multiannual-roadmap-info-day_en.pdf (accessed%20August%202013).
- [10] N. Durakbasa, J. Bauer, G. Bas (2012) Developments in High Precision Metrology for Advanced Manufacturing, Proceedings of the ICMEM, 210–215,
- [11] M. N. Durakbasa, P. O. Herbert, G. Bas, P. Demircioglu, M. Cakmakci, A. Hornikova (2012) Novel Developments in Dimensional Nanometrology in the Context of Geometrical Product Specifications and Verification (GPS), Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, 6(2):22–25.
- [12] N. H. Hansen, K. Carneiro, H. Haitjema, D. L. Chiffre (2006) Dimensional Micro and Nano Metrology, Annals of the CIRP, 55(2):721–743.
- [13] M. Kalajdzic (2014) Tehnologija masinogradnje, Masinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- [14] L. Jiing-Yih, C. Kuo-Jen (2007) Localization of parts with irregular shape for CMM inspection, Int. J. Adv. Manuf. Technol, 32:1188–1200.
- [15] C. Z. Lin, Z. C. Lin (2000) IDEF0 Model of the Measurement Planning for a Workpiece Machined by a Machining Centre, Precision Engineering, 16:656–667.
- [16] V. Majstorovic, J. Hodolic (1998) Numericki upravljane merne mašine, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [17] X. Wu, G. Zhang (1997) Development of a modern co-ordinate measuring machine, Nanotechnology and Precision Engineering, 114:186–190.
- [18] A. Weckenmann, P. Kraemer, J. Hoffmann (2007) Manufacturing metrology – State of the Art and Prospects, Proceedings of the 9th International symposium on Measurement and Quality Control, 21–27, Manufacturing Engineering Section, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.
- [19] M. N. Durakbasa, H. P. Osanna (2009) Quality in Industry, Abteilung Austauschbau und Messtechnik, Wien, Austria.

- [20] G. J (1998) Theory and Algorithms for Coordinate Metrology, Doctoral dissertation, The Hong Kong University of Science, Technology, Department of Electrical, Electronic Engineering, Hong Kong.
- [21] K. Lubke, Z. Sun, G. Goch (2012) Three-dimensional holistic approximation of measured points combined with an automatic separation algorithm, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61:499–502.
- [22] H. A. ElMaraghy, P. H. Gu (1987) Expert System for Inspection Planning, *Annals of the CIRP*, 36(1):85–89.
- [23] A. Limaïem, A. H. ElMaraghy (1998) Automatic Path Planning for Coordinate Measuring Machine, *Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, 887–892, Leuven, Belgium.
- [24] H. Zhao, J. P. Kruth, N. V. Gestel, B. Boeckmans, P. Bleys (2012) Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe, *Measurement*, 45:1057–1066.
- [25] S. Ravishankar, H. N. V. Dutt, G. B (2010) Automated inspection of aircraft parts using a modified ICP algorithm, *Int J Adv Manuf Technol*, 46:227–236.
- [26] H. C. Chang, L. A. C. (2010) Automatic inspection of turbine blades using 5-axis coordinate measurement machine, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(12):1071–1081.
- [27] H. C. Chang, A. C. Lin (2011) Five-axis automated measurement by coordinate measuring machine, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 55:657–673.
- [28] H. T. Yau, C. H. Menq (2005) Automated CMM Path Planning for Dimensional Inspection of Dies and Molds Having Complex Surface, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 35(6):861–876.
- [29] C.-H. Chang, C. A. Lin (2011) Five-axis automated measurement by coordinate measuring machine, *Int J Adv Manuf Technol*, 55:657–673.
- [30] C. G. Lu, D. Morton, P. Myler, M. H. Wu (1995) An Artificial Intelligent (AI) Inspection Path Management for Multiple Tasks Measurement on Coordinate Measuring Machine (CMM): An Application of Neural Network Technology, *Proceedings of the 95 Engineering Management Conference*, 353–357, IEEE, Singapore.

- [31] T. H. Yau (1991) The Development of an Intelligent Dimensional Inspection Environment Using Coordinate Measuring Machines, Doctoral dissertation, The Ohio State University, Columbus.
- [32] C. G. Lu, D. Morton, M. H. Wu, P. Myler (1999) Genetic Algorithm Modelling and Solution of Inspection Path Planning on a Coordinate Measuring Machine (CMM), *Int J Adv Manuf Technol*, 15:409–416.
- [33] S. Stojadinovic, V. Majstorović (2012) Towards the Development of Feature – Based Ontology for Inspection Planning System on CMM, *Journal of Machine Engineering*, 12(1):89–98.
- [34] Q. Liangsheng, X. Guanhua, W. Guohua (1998) Optimization of the measuring path on a coordinate measuring machine using genetic algorithms, *Measurement*, 22:159–170.
- [35] U. Roy, Y. Xu, L. Wang (1994) Development of an intelligent inspection planning system in an object oriented programming environment, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 7(4):240–246.
- [36] G. X. Zhang, S. G. Liu, X. H. Ma, J. L. Wang, Y. Q. Wu, Z. Li (2002) Towards the Intelligent CMM, *Annals of the CIRP*, 51(1):437–442.
- [37] P. H. Osanna (1997) Intelligent production metrology - A powerful tool for intelligent manufacturing, *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 4(114):162–168.
- [38] C. F. Kuang, C. L. Ming (1998) Intelligent planning of CAD – directed inspection for coordinate measuring machine, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11(1-2):43–51.
- [39] L. A. Gerhardt, K. Hyun (1995) View planning applied to coordinate measuring machine (CMM) measurement, *Proceedings IEEE Conference on Industrial Automation and Control Emerging Technology Applications*, 540–544, IEEE, Taipei.
- [40] N. S. Spitz, G. A. A. Requicha (1999) Hierarchical Constraint Satisfaction for High-Level Dimensional Inspection Planning, *Proceedings of the 1999 IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning*, 374–380, IEEE, Porto.

- [41] Y. Hu, Q. Yang, X. Sun (2012) Design, Implementation, and Testing of Advanced Virtual Coordinate-Measuring Machines, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 5(61):1368–1376.
- [42] J. Śladek, A. Gąska, M. Olszewska, R. Kupiec, M. Krawczyk (2013) Virtual coordinate measuring machine built using lasertracer system and spherical standard, *Metrol. Meas. Syst.*, 20(1):77–86.
- [43] J. Śladek, A. Gaska (2012) Evaluation of coordinate measurement uncertainty with use of virtual machine model based on Monte Carlo method, *Measurement*, 45(1):1564–1575.
- [44] F. Aggogeri, G. Barbato, M. E. Barini, G. Genta, R. Levi (2011) Measurement Uncertainty Assessment of Coordinate Measuring Machines by Simulation and Planned Experimentation, *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology*, 4:51–56.
- [45] H. Kunzmann, T. Pfeifer, R. Schmitt, H. Schwenke, A. Weckenmann (2005) Productive Metrology - Adding Value to Manufacture, *Annals of the CIRP*, 54(2):155–168.
- [46] J. Beg, S. S (2002) An Object Oriented Planner for Inspection of Prismatic Parts – OOIPIP, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 19:905–916.
- [47] J.-Y. Lin, K. Damodharan, C. Shakarji (2001) Standardised Reference Data Sets Generation for Coordinate Measuring Machine (CMM) Software Assessment, *Int J Adv Manuf Technol*, 18:819–830.
- [48] N. Taniguchi (1983) Current status in, and future trends of, ultra precision machining and ultrafine materials processing, *Annal of the CIRP*, 32(2):573–582.
- [49] X. Zhao, P. M. T. Kethara, G. R. Wilhelm (2006) Modeling and representation of geometric tolerances information in integrated measurement processes, *Computer in Industry*, 57(4):319–330.
- [50] D. P. Stefano, F. Bianconi, D. L. Angelo (2004) An approach for feature semantics recognition in geometric models, *Computer-Aided Design*, 36:993–1009.

- [51] J.-Y. Lin, R. Mahabaleshwarkar, E. Massina (2001) CAD-based CMM dimensional inspection path planning – a generic algorithm, *Robotica*, 19:137–148.
- [52] F. Zhou, C. T. Kuo, H. S. Huang, Z. C. H (2002) Form Feature and Tolerance Transfer from a 3D Model to a Set-up Planning System, *Int J Adv Manuf Technol*, 19:88–96.
- [53] C. B. Jiang, D. S. Chiu (2002) Form tolerance – based measurement point determination with CMM, *Journal of Intelligent manufacturing*, 13:101–108.
- [54] O. W. Salomons, H. J. Poerink Jonge, F. J. Haalboom, F. Slooten, F. J. A. M. Houten, H. J. J. Kals (1996) A computer aided tolerancing tool I: Tolerance specification, *Computers in Industry*, 31:161–174.
- [55] O. W. Salomons, F. J. Haalboom, H. J. Poerink Jonge, F. Slooten, H. F. J. A. M (1996) A computer aided tolerancing tool II: Tolerance analysis, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31:175–186.
- [56] N. M. A. Mohib, A. H. ElMaraghy (2010) Tolerance-based localization algorithm: form tolerance verification application, *Int J Adv Manuf Technol*, 47:581–595.
- [57] Q. Ge, B. Chen, P. Smith, H. C. Menq (1992) Tolerance specification and comparative analysis for computer-integrated dimensional inspection, *International Journal of Production Research*, 30(9):2173–2197.
- [58] M. W. Cho, T. I. Seo (2002) Inspection Planning Strategy for the On-Machine Measurement Process Based on CAD/CAM/CAI Integration, *Int J Adv Manuf Technol*, 19:607–617.
- [59] V. S. Bhaskar Sathi, P. V. M. Rao (2009) STEP to DMIS: Automated Generation of Inspection Plans from CAD Data, *Proceedings of the 5th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering Bangalore*, 519–524, India, August 22-25.
- [60] F. Zhao, X. Xu, S. Xie (1998) STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24:200–216.

- [61] Y. C. Hwang, Y. C. Tsai, A. C. Chang (2004) Efficient inspection planning for coordinate measuring machines, *Int J Adv Manuf Technol*, 23:732–742.
- [62] A. V. Albuquerque, W. F. Liou, R. O. Mitchell (2000) Inspection point placement and path planning algorithms for automatic CMM inspection, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, 13(2):107–120.
- [63] J. Barreiro, S. Martinez, J. E. Labarga, E. Cuesta (2005) Validation of an information model for inspection with CMM, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45:819–829.
- [64] R. M. McCaleb (1999) A Conceptual Data Model of Datum Systems, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104(4):349–400.
- [65] M. Vogel, N. Ebinger, M. Rosenberger, L. Lin (2010) A novel strategy for cost-efficient measurements with coordinate measurement machines, *Journal of Physics*, 238:1–6.
- [66] D. Flack (2001) *CMM Measurement Strategies*, National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom.
- [67] G. Hermann (2008) Advanced techniques in the programming of coordinate measuring machines, *Proceedings of the 6th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, 327–330, IEEE, Herlany.
- [68] D. I. Legge (2001) *Off-line Programming of Coordinate Measuring Machine*, licentiate thesis, Division of manufacturing engineering, Lulea University of Technology,, Lulea.
- [69] J. W. Lee, M. K. Kim, K. K (1994) Optimal Probe Path Generation and New Guide Point Selection Methods, *Engng Applic. Artif. Intell.*, 7(4):439–445.
- [70] P. Gu, K. Chan (1996) Generative Inspection Process and Probe Path Planning for Coordinate Measuring Machines, *Journal of Manufacturing Systems*, 15(4):240–255.
- [71] P. C. Lim, H. C. Menq (1994) CMM feature accessibility path generation, *International Journal of Production Research*, 32(3):597–618.

- [72] F. Prieto, T. Redarce, R. Lepage, P. Boulanger (2002) An Automated Inspection System, *Int J Adv Manuf Technol*, 19:917–925.
- [73] P. N. Juster, H. L. Hsu, D. A. Pennington (1994) *Advances in feature based manufacturing: The selection of surface for inspection planning*, Elsevier.
- [74] Y. J. Lin, P. Murugappan (1999) A new algorithm for determining a collision-free path for a CMM probe, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39:1397–1408.
- [75] C.-Z. Lin, L. S-W (2001) Measurement point prediction of flatness geometric tolerance by using grey theory, *Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 25:171–184.
- [76] S. Kweon, D. J. Medeiros (1998) Part orientations for CMM inspection using dimensioned visibility maps, *Computer-Aided Design*, 30:741–749.
- [77] C. W. Ziemian, D. J. Medeiros (1997) Automated feature accessibility for inspection on a coordinate measuring machine, *Int J Prod Res*, 35(10):2839–2856.
- [78] J. Y. Lin, P. Murugappan (2000) A New Algorithm for CAD-Directed CMM Dimensional Inspection, *Int J Adv Manuf Technol*, 16:107–112.
- [79] A. Limaiem, A. H. ElMaraghy (1997) Automatic Planning for Coordinate Measuring Machines, *Proceedings of the 1997 IEEE, International Symposium on Assembly and Task Planning*, 243–248, Marina del Rey, CA.
- [80] Y. Wu, S. Liu, G. Zhang (2004) Improvement of coordinate measuring machine probing accessibility, *Precision Engineering*, 28:89–94.
- [81] N. S. Spitz, J. A. Spyridi, G. A. A. Requicha (1999) Accessibility Analysis for Planning of Dimensional Inspection with Coordinate Measuring Machines, *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 15(4):714–722.
- [82] J. B. Alvarez, P. Fernandez, C. J. Rico, S. Mateos, M. C. Suarez (2008) Accessibility analysis for automatic inspection in CMMs by using bounding volume hierarchies, *International Journal of Production Research*, 46(20):5797–5826.

- [83] C. J. Rico, G. Valino, S. Mateous, E. Cuesta, C. Suarez M (2002) Accessibility analysis for star probes in automatic inspection of rotational parts, *International Journal of Production Research*, 40(6):1493–1523.
- [84] Y. M. Chiang, F. L. Chen (1999) CMM Probing Accessibility in a Single Slot, *Int J Adv Manuf Technol*, 15:261–267.
- [85] A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs, D. McMurtry (2004) Probing Systems in Dimensional Metrology, *Annals of the CIRP*, 53(2):657–684.
- [86] A. Wozniak, M. Dobosz (2003) Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part I: 3D theoretical model of probe pretravel, *Measurement*, 34(4):273–286.
- [87] J. Jackman, K.-D. Park (1998) Probe orientation for coordinate measuring machine systems using design models, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14:229–236.
- [88] G. Moroni, W. Polini, Q. Semeraro (1998) Knowledge based method for touch probe configuration in an automated inspection system, *Journal of Materials Processing Technology*, 76:153–160.
- [89] M. Y. Chiang, F. L. Chen (1999) CMM Probing Accessibility in a Single Slot, *Int J Adv Manuf Technol*, 15:261–267.
- [90] W. Ziemian, J. D. Medeiros (1998) Automating probe selection and part setup planning for inspection on a coordinate measuring machine, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, 11(5):448–460.
- [91] F. Zhao, X. Xu, S. Xie Q (2009) Computer – Aided Inspection Planning – The state of the art, *Computer in Industry*, 60(7):453–466.
- [92] W. C. Myeong, L. Honghee, S. Y. Gil, C. Jinhwa (2005) A feature – based inspection planning system for coordinate measuring machines, *Int J Adv Manuf Technol*, 26:1078–1087.
- [93] R. T. Kramer, H. Huang, E. Messina, M. F. Proctor, H. Scott (2001) A feature – based inspection and machining system, *Computer – Aided Design*, 33(9):653–669.

- [94] S. G. Zhang, A. Ajmal, J. Wootton, A. Chisholm (2000) A feature-based inspection process planning system for co-ordinate measuring machine (CMM), *Journal of Materials Processing Technology*, 107:111–118.
- [95] K. Takamasu, R. Furutani, S. Ozono (1999) Basic concept of feature-based metrology, *Measurement*, 26:151–156.
- [96] A. Mohib, A. Azab, H. ElMaraghy (2009) Feature-based hybrid inspection planning: A mathematical programming approach, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, 22(1):13–29.
- [97] V. Sundararajan, K. P. Wright (2002) Feature Based Macroplanning Including Fixturing, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, *Transactions of the ASME*, 2:179–191.
- [98] A. Kamrani, A. E. Nasr, A. Al-Ahmari, O. Abdulhameed, H. S. Mian (2014) Feature-based design approach for integrated CAD and computer-aided inspection planning, *Int J Adv Manuf Technol*, 76:2159–2183.
- [99] M. Ramesh, D. Hoi-Yip, D. Dutta (2001) Feature Based Shape Similarity measurement for Retrieval of Mechanical Parts, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, *Transactions of the ASME*, 1:245–256.
- [100] J. J. Shah, D. Anderson, S. Y. Kim, S. Joshi (2001) A Discourse on geometric Feature Recognition From CAD Models, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, *Transactions of the ASME*, 1:41–51.
- [101] G. Hennann (1997) Feature-based off-line programming of Coordinate Measuring Machines, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, 545–548, IEEE, Budapest.
- [102] T. D. Pham, F. K. Martin, P. L. Khoo (1991) A knowledge-base preprocessor for coordinate-measuring machines, *International Journal of Production Research*, 29(4):677–694.
- [103] B. Babic, N. Nesic, M. Z (2008) A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition, *Computers in Industry*, 59:321–337.

- [104] Ž. N. Nešić (2007) Razvoj sistema za tehnološko prepoznavanje i projektovanje tehnoloških procesa za delove koji se izrađuju na obradnim centrima, Magistarska teza,, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet., Beograd.
- [105] S. Kim, S. Chang (1996) The development of the off-line measurement planning system for inspection automation, *Computers ind. Engng*, 30(3):531–542.
- [106] W. M. Cho, H. Lee, S. G. Yoon, H. J. Choi (2004) A computer - aided inspection planning system for on-machining measurement - part II: Local inspection planning, *KSM International Journal*, 18:1358–1367.
- [107] H. Lee, M.-W. Cho, G.-S. Yoon, J.-H. Choi (2004) A Computer-Aided Inspection Planning System for On-Machine Measurement - Part I: Global Inspection Planning, *KSME International Journal*, 8(18):1349–1357.
- [108] F. S. Y. Wong, K. B. Chuah, P. K. Venuvinod (2006) inspection process planning: Algorithmic inspection feature recognition, and inspection case representation for CBR, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22:56–68.
- [109] Y. S. F. Wong, B. K. Chuah, K. P. Venuvinod (2005) Automated extraction of dimensional inspection features from part computer-aided design models, *International Journal of Production Research*, 43(12):2377–2396.
- [110] Y. Li, P. Gu (2004) Free-form surface inspection techniques state of the art review, *Computer-Aided Design*, 36:1395–1417.
- [111] A. H. Hesham, M. A. Youssef, K. M. Shoukry (2012) Automated Inspection Planning system for CMMs, *Proceedings of the International Conference on Engineering and Technology*, 1–6, IEEE.
- [112] URL: <http://www.aiag.org/scriptcontent/index.cfm>.
- [113] X. Xu, S. T. Newman (2003) Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent - a review of the technologies, *Computer in Industry*, 57(2):141–152.

- [114] J. Horst, T. Kramer, K. Stouffer, J. Falco, H. M. Huang, F. Proctor, A. Wavering Distributed Testing of an Equipment-Level Interface Specification, National Institute of Standards, Technology (NIST), Gaithersburg, Maryland, USA.
- [115] F. Ahmed (2013) Interoperability of Product and Manufacturing Information (PMI) Using Ontology (Master thesis), Korea Advanced Institute of Science, Technology, Daejeon, Korea.
- [116] W. R. (2005) AIAG demonstrates metrology interoperability: to save you time and money, The International Dimensional Workshop, AIAG, Nashville.
- [117] S. Stojadinovic, V. Majstorović (2010) Metrology interoperability, Total Quality Management and Excellence, 38(4):83–89.
- [118] R. William (May 2005) AIAG demonstrates metrology interoperability: to save you time and money, The International Dimensional Workshop, AIAG, Nashville.
- [119] URL: <http://www.cam-i.org/standards.html>.
- [120] I++DML Verision 1.6, Dimensional Measurement Equipment Interface, Tutorial,
- [121] Z. Humienny (2009) State of art in standardization in GPS area, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2(1):1–7.
- [122] ISO/FDIS 10303-203: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange – Part 203: Application Protocols: Configuration controlled 3D design, 2007.
- [123] ISO/FDIS 10303-224: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange – Part 224: Application Protocol: Mechanical Product Definition for Process Planning Using Machining Features, 2006.
- [124] STEP Tools, Inc, <http://www.steptools.com>. September 2009.
- [125] ISO/FDIS 10303-214: Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange – Part 214: Application Protocol: Core Data for Automotive Mechanical Design Processes, 2001.

-
- [126] M. Germani, F. Mandorli, M. Mengoni, R. Raffaelli (2010) CAD-based environment to bridge the gap between product design and tolerance control, *Precision Engineering*, 34:7–15.
- [127] Z. Li, V. Raskin, K. Ramani (2008) Developing engineering ontology for information retrieval, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 8:1–13.
- [128] W. R. Swartout, A. Tate (1999) Guest editors' introduction: Ontologies, *IEEE Intelligent Systems*, 14(1):18–19.
- [129] B. Chandrasekaran, J. R. Josephson, V. R. Benjamins (1999) What are ontologies, and why do we need them?, *IEEE Intelligent Systems*, 14(1):20–26.
- [130] P. S. Martinez, J. Barreiro, E. Cuesta, J. B. Alvarez (2011) A new process-based ontology for KBE system implementation: application to inspection process planning, *Int J Adv Manuf Technol*, 57:325–339.
- [131] M. Uschold, M. Gruninger (2004) Ontologies and semantics for seamless connectivity, *SIGMOD Record*, 33(4):58–64.
- [132] C. A. McMahon, A. Lowe, S. J. Culley, M. Corderoy, R. Crossland, T. Shah, D. Stewart (2004) Waypoint: an integrated search and retrieval system for engineering documents, *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 4(4):329–338.
- [133] A. W. Court, D. G. Ullman, S. J. Culley (1998) A comparison between the provision of information to engineering designers in the UK and the US, *International Journal Information Management*, 18(6):409–425.
- [134] L. Zhanjun, C. Maria, R. Karthik (2009) A methodology for engineering ontology acquisition and validation, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 23(1):37–51.
- [135] T. Gruber (1995) Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing, *International Journal of Human–Computer Studies*, 43(5–6):907–928.
-

- [136] M. Uschold, M. King (1995) Towards a methodology for building ontologies, Proceedings of the IJCAI95 Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, Montreal.
- [137] M. Gruninger, S. Fox (1995) Methodology for the design and evaluation of ontologies, Proc. Int. Joint Conf. AI Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, Montreal.
- [138] N. F. Noy, D. L. McGuinness (2001) Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology, Knowledge Systems Laboratory and Stanford Medical Informatics,
- [139] M. Fernandez, G. A. P. Sierra (1999) Building a chemical ontology using METHONTOLOGY and the ontology design environment, IEEE Intelligent Systems, 14(1):37–46.
- [140] J. Nanda, T. W. Simpson, S. R. T. Kumara, S. B. Shooter (2006) A methodology for product family ontology development using formal concept analysis and web ontology language, ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 6(2):1–11.
- [141] S. Ahmed, S. Kim, K. M. Wallace (2007) A methodology for creating ontologies for engineering design, ASME Journal of Computer and Information Science in Engineering Vol. 7, No.2, pp. 132–140, 2007., ASME Journal of Computer and Information Science in Engineering, 7(2):132–140.
- [142] Y. Kalfoglou (2001) Exploring ontologies. Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering, Singapore, 1:863–887.
- [143] H. Matthew A Practical Guide to Building OWL Ontologies Using Protégé 4 and CO-DE Tools, The University Of Manchester, Manchester.
- [144] S. Stojadinovic, V. Majstorović (2011) Metrological primitives in production metrology—ontological approach, Proceedings of the 34th International Conference on Production Engineering, 29–30, Faculty of Mechanical Engineering Nis, Nis, Serbia, 28– 30th September.

- [145] S. Stojadinovic, V. Majstorović (2013) Inspection planning for prismatic parts on CMM based on ontology knowledge base, Proceedings of the 7th International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", 71–76, Faculty of Mechanical Engineering Belgrade, Belgrade, Serbia, 3rd – 7th June.
- [146] URL: <http://www.ksl.stanford.edu/software/ontolingua/> %20(accessed%2001.09.2012.).
- [147] URL: <http://www.daml.org/ontologies/>(accessed%2001.09.2012.).
- [148] M. Uschold, M. Gruninger (1995) Ontologies: Principles, Methods and Applications, Knowledge Engineering Review, 11(2):1–69.
- [149] URL: <http://protege.stanford.edu/>%20(accessed%2001.09.2012.).
- [150] X. Zhao, M. T. Pasupathy Kethara, G. R. Wilhelm (2006) Modeling and representation of geometric tolerances information in integrated measurement processes, Computers in Industry, 57(4):319–330.
- [151] W.-M. Cho, I.-T. Seo (2002) Inspection Planning Strategy for the On-Machine Measurement Process Based on CAD/CAM/CAI Integration, Int J Adv Manuf Technol, 19:607–617.
- [152] D. V. Majstorovic (2003) Inspection planning on CMM based Expert System, Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing System, 1–9, CIRP, Saarbrucken, Germany.
- [153] V. Majstorovic, P. Bojanic, V. Milačić (1995) Expert System for Inspection Planning on CMM, Proceedings of the First World Congress on Intelligent Manufacturing Process and Systems, 120–126, San Juan.
- [154] V. Majstorovic, P. Bojanic, S. Vranes (1997) Intelligent Environment for Product and Process Design, Proceeding of 29th CIRP Conference "Manufacturing Systems", 145–148, CIRP, Osaka.
- [155] G. Moronia, S. Petroa (2013) Inspection strategies and multiple geometric tolerances, Procedia CIRP, 10:54–60.

- [156] S. Ha, I. Hwang, H. M. Rho (2000) A study on the development of knowledge-based inspection planning system for CMM, 2nd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 497–502., CIRP, Capri, Italy.
- [157] BS7172 – Guide to assessment of position, size, and departure from nominal form of geometric feature, the minimum number of points.
- [158] G. Lee, J. Mou, Y. Shen (1997) Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 37(7):917–934.
- [159] H. C. Chang, C. A. Lin (2009) An innovative algorithm for statistic sampling of measured points and simplifying measuring probe orientation for sculpture surfaces, *Int J Adv Manuf Technol*, 41:780–798.
- [160] V. Majstorovic, S. Stojadinovic, T. Sibalija (2015) Development of a knowledge base for the planning of prismatic parts inspection on CMM, *Acta IMEKO*, 42(2):10–17.
- [161] S. Stojadinovic, V. Majstorović (2012) Determining the sequence of inspections of basic geometric primitives on CMM, *Proceedings of the 38th JUPITER Conference*, 5.25–5.30, Faculty of Mechanical Engineering Belgrade, Belgrade, 15 – 16 May.
- [162] M. Dorigo, M. L. Gambardella (1997) Ant colonies for the travelling salesman problem, *BioSystems*, 43:73–81.
- [163] M. Dorigo, T. Stützle (2004) *Ant Colony Optimization*, The MIT Press Cambridge, London.
- [164] C. Blum (2005) Ant colony optimization: Introduction and recent trends, *Physics of Life Reviews*, 2:353–373.
- [165] M. Dorigo, C. Blum (2005) Ant colony optimization theory: A survey, *Theoretical Computer Science*, 344:243–278.
- [166] H. C. Papadimitriou (1997) The Euclidean travelling salesman problem is NP-complete, *Theoretical Computer Science*, 4:237–244.

- [167] F. T. Cheng, W. T. Chun, C. T. Ching (2004) A new hybrid heuristic approach for solving large traveling salesman problem, *Information Sciences*, 166:67–81.
- [168] Y. Shen, S. Moon (1997) Mapping of probe pretravel in dimensional measurements using neural networks computational technique, *Computers in Industry*, 34:295–306.
- [169] G. Moroni, S. Petro (2013) Inspection strategies and multiple geometric tolerances, *Procedia CIRP*, 10:54–60.
- [170] M. S. Stojadinovic, D. V. Majstorovic (2014) Developing engineering ontology for domain coordinate metrology, *FME Transactions*, 42(3):249–255.
- [171] D. V. Majstorovic, M. S. Stojadinovic (2013) Research and development of knowledge base for inspection planning prismatic parts on CMM, 11th International Symposium on Measurement and Quality Control, 46–52., IMEKO, Cracow-Kielce, Poland.
- [172] A. Weckenmann, T. Werner (2010) Holistic qualification in manufacturing metrology by enhancing knowledge exchange among different user groups, *Metrol. Meas. Syst.*, 17(1):17–26.
- [173] G. H. Lemu (2014) Current status and challenges of using geometric tolerance information in intelligent manufacturing systems, *Adv. Manuf.*, 2:13–21.
- [174] N. S. Spitz, G. A. A. Requicha (2000) Multiple-Goals Path Planning for Coordinate Measuring Machines, *Proceedings of the 2000 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, 2322–2327, IEEE, San Francisco.
- [175] B. Yuewei, W. Shuangyu, L. Kai, W. Xiaogang (2010) A Strategy to Automatically Planning Measuring Path with CMM Offline, *Proceedings of the International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 3064–3067, IEEE, Wuhan, China.
- [176] A. H. Hussien, M. A. Youssefy, K. M. Shoukryz (2012) Automated Inspection Planning system for CMMs, *Proceedings of the International Conference on Engineering and Technology*, 1–6, IEEE, Cairo.

- [177] J. Sladek, R. Sitnik, M. Kupiec, P. Błaszczuk (2010) The hybrid coordinate measurement system as a response to industrial requirements, *Metrol. Meas. Syst.*, 17(1):109–118.
- [178] M. S. Stojadinovic, D. V. Majstorovic, D. M. N (2015) A feature – based path planning for inspection prismatic parts on CMM, XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, 1551–1556., IMEKO, Prague, Czech Republic.
- [179] R. Schmitt, H. Zheng, X. Zhao, N. Konig, R. R. Coelho (2009) Application of ant colony optimization to Inspection Planning, *International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*, 71–75., IEEE, Hong Kong, China.
- [180] ISO/TS 10360-2: Geometrical product specifications (GPS) – acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – part 2: CMMs used for measuring linear dimensions (2009).
- [181] URL: <http://aum.ift.tuwien.ac.at/home/>.
- [182] ISO/TS 15530-3: Geometrical product specifications (GPS) – coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – part 3: Use of calibrated workpieces or standards (2011).

Биографија

Општи подаци:

Име и презиме: Славенко М. Стојадиновић
Датум и место рођења: 22.06.1885., Пријепоље
Садашња позиција: Асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет

Образовање:

2009. Студент докторских студија, Универзитет у Београду, Машински факултет
13.11.2009. Одбрањен Дипломски рад, Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство
2004-2009. Дипломирани инжењер машинства Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за производно машинство
2000-2004. Техничка школа у Пријепољу
1992-2000. Основна школа „Милосав Стиковић“ у Ратајској у Пријепољу

Стипендије:

2004-2008. Министарство просвете Републике Србије
2008-2010. Хемофарм фондација, Вршац, Србија
2008-2009. Фонд за младе таленте Министарства омладине и спорта Републике Србије
2009-2010. Министарство за науку и технолошки развој Републике Србије

Награде:

2006. Награда за изванредан успех остварен школске 2005/6. године, на другој години студија, са просечном оценом 9,00

2008. Награда за изванредан успех остварен школске 2007/8. године, на четвртој години студија, са просечном оценом 9,87
2009. Награда за изванредан успех остварен школске 2008/9. године, на петој години студија, са просечном оценом 9,75
-

Професионално искуство:

2010. Асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет
-

Педагошка активност:

Учествује у извођењу наставе на Основним и Мастер академским студијама као асистент на предметима Катедре за производно машинство: Технологија машинске обраде (BSc), Производне технологије и метрологија (BSc), Менаџмент квалитетом (MSc) и Аутоматизација производних процеса (MSc).

Истраживачки рад:

Као истраживач укључен је у три научна пројекта у области производног машинства. Као аутор и коаутор објавио је преко 25 радова у домаћим и међународним часописима и научним скуповима.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани Славенко М. Стојадиновић

број индекса D9/09

Изјављујем

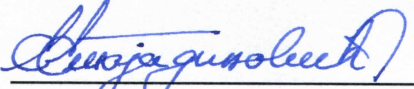
да је докторска дисертација под насловом

Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 12.02.2016. године



Славенко М. Стојадиновић

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Славенко М. Стојадиновић

Број индекса D9/09

Студијски програм Докторске академске студије – Машинско инжењерство

Наслов рада Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова
на мерној машини

Ментор Проф. др Видосав Д. Мајсторовић, Универзитет у Београду, Машински
факултет

Потписани Славенко М. Стојадиновић

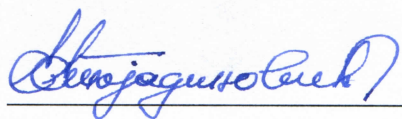
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 12.02.2016. године



S. Stojadinovic

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Интелигентни концепт планирања инспекције призматичних делова на мерној машини

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 12.02.2016. године

