



Универзитет у Београду Машински факултет

КАТЕДРА ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

МОДЕЛИРАЊЕ МЕРНОГ СИСТЕМА И СИМУЛАЦИЈА ИНСПЕКЦИЈЕ У РТС Creo СОФТВЕРУ

Приручник за предмет
„Нумерички управљане мерне машине“

Видоје Касалица,
Београд, 2024. година

1. Увод

Нове тенденције у технолошким системима у погледу обрадних процеса, поставиле су и нове захтеве пред мерну технику. Примена конвенционалних метролошких система и процедура које их подржавају, постала је ограничавајући фактор у смислу флексибилности и тачности мерења. Посебан проблем је брза метролошка идентификација комплексних метролошких задатака, као што су, на пример, толеранције облика и положаја код делова средње и повишене тачности. Поред метролошке идентификације, проблем је и повезивање метролошких база, што има директног утицаја на тачност добијених резултата. У циљу решења ових проблема, у овом раду приказан је један приступ моделирању виртуелне мерне инспекције на бази нумерички управљане мерне машине. У ширем смислу развијени модел интегрисане машинске и рачунарске технологије и примењен је у области метрологије, односно испитивању остварених толеранција на машинском делу помоћу мерне машине. Предности се огледају у томе да није неопходно конструисати скупе прототипове, да се штеди време, избегава колизија и оно најважније у свету индустрије, штеди новац [1].

У оквиру овог семинарског рада, односно приручника за реализацију дела вежби из предмета „Нумерички управљане мерне машине“, биће детаљно описан процес креирања и симулације дигиталне мерне инспекције помоћу софтверског пакета PTC Creo Parametric. За потребе овог рада у CAD/CAM окружењу ће бити моделирани радни комад, помоћни стезни прибор, мерни сензор и мерна машина. Поред креираних модела, акценат ће бити на дефинисању задатих толеранција, појединачних операција мерне инспекције (као и задавање свих неопходних параметара процеса) и успостављању конфигурација углова мерне сонде. Пре пуштања целокупне виртуелне мерне инспекције биће дефинисане кинематских веза између подсистема нумерички управљане мерне машине као и координатни системи свих компонентни релевантни за извршење мерне инспекције.

2. Моделирање мерног дела, мерног прибора, мерног сензора и компоненти троосне мерне машине

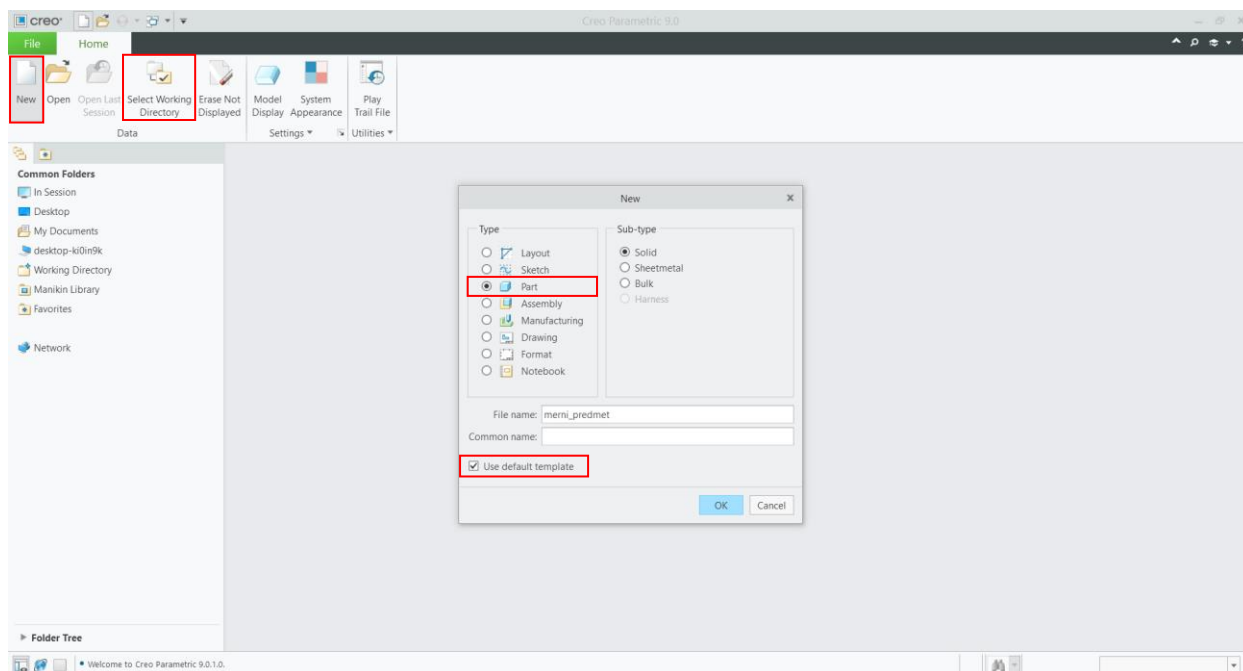
2.1. Моделирање 3D модела мерног дела у софтверу PTC Creo Parametric

Након дефинисања техничког цртежа као основног (иницијалног) документа за било који производни или инспекцијски процес у области машинства, приступа се изради 3D модела мерног дела, за конкретан случај у софтверском пакету PTC Creo Parametric. У овом потпоглављу ће бити приказане основне функције за креирање модела мерног дела. На слици 1, селектована је опција „*Select Working Directory*“ у којој ће бити чувано све што буде рађено у оквиру овог рада. Такође, приказан је и поступак уласка у софтвер и одабир опције „Part“ коју користимо када желимо да креирамо модел. Creo → File → New → Part. У оквиру овог прозора је битно искључити опцију „Use default template“ како бисмо добили могућност избора мерних јединица.

НАПОМЕНА

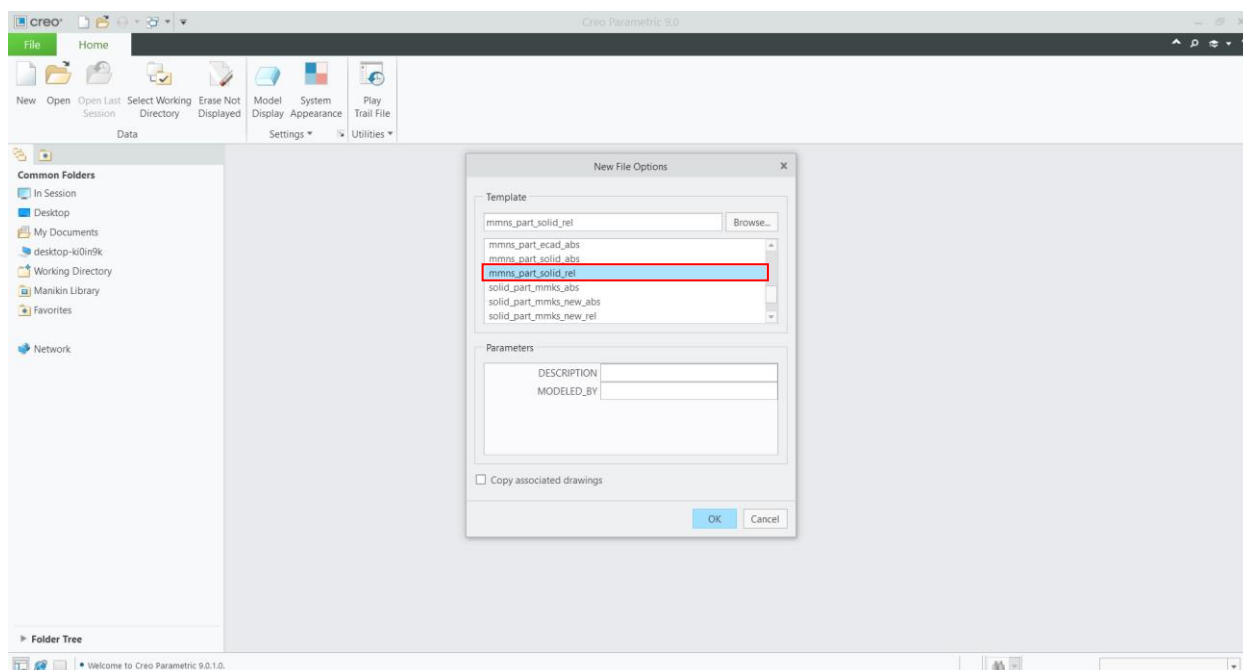
Претпоставка је да ће већина читалаца овог упутства користити нелиценциране верзије софтвера PTC Creo Parametric. Услед недостатка лиценцираног софтвера,

долази до одређених блокада програма пре свега од Windows оперативног система. Уколико будете имали проблем са креирањем новог дела, симулације или система мерних јединица, кораци су следећи. Потребно је изаћи из Creo Parametric софтвера и затим: Windows Security → Virus & threat protection → Virus & threat protection settings → Manage settings → Real-time protection → OFF.



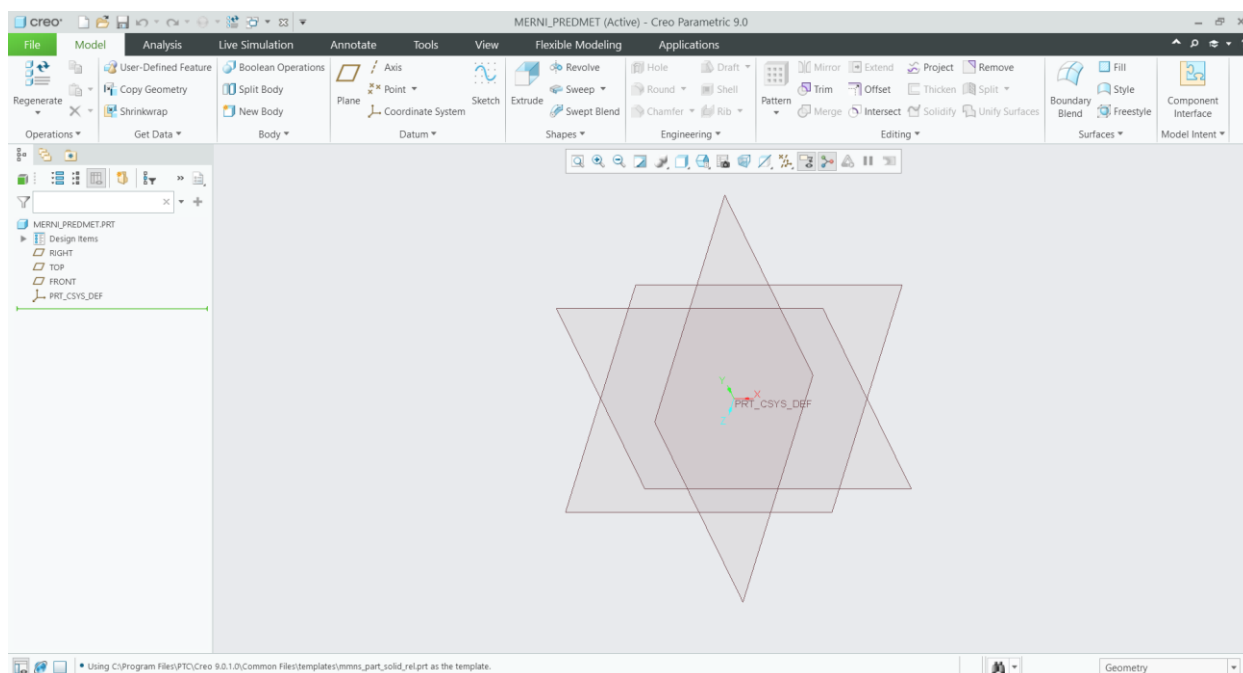
Слика 1. Приказ поступка уласка у модул за креирање мерног дела

На слици 2, даје се приказ избора мерних јединица, што представља важан корак у изради модела. Изабране јединице које се користе за потребе израде овог рада и које су дефинисане нашим стандардима су милиметар/Њутн/секунд (*mmns_part_solid_rel*) у релативном координатом систему мера.



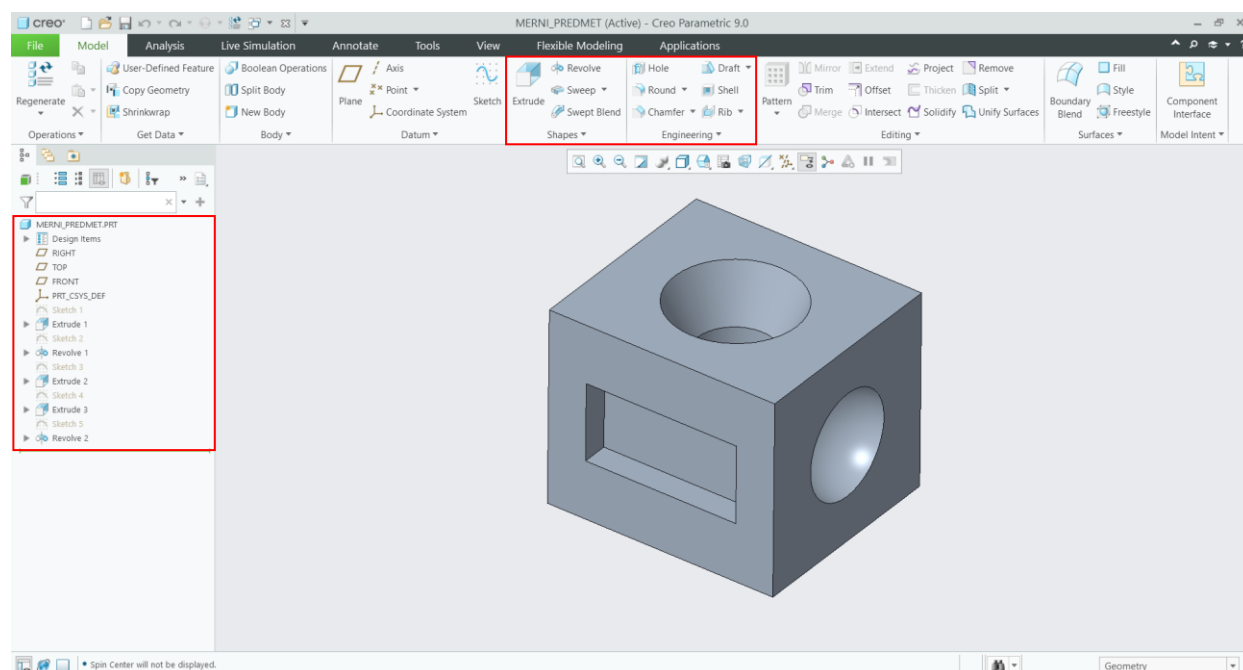
Слика 2. Приказ избора мерних јединица

Након одабира система мерних јединица отвара се прозор за цртање и дефинисање жељеног предмета у PTC Creo софтверског пакета. Одабиром опције „Sketch“ отвара се обавезна платформа за избор равни у којој се започиње креирање модела, *Слика 3*.



Слика 3. Приказ одабира равни, покретањем „Sketch“ опције

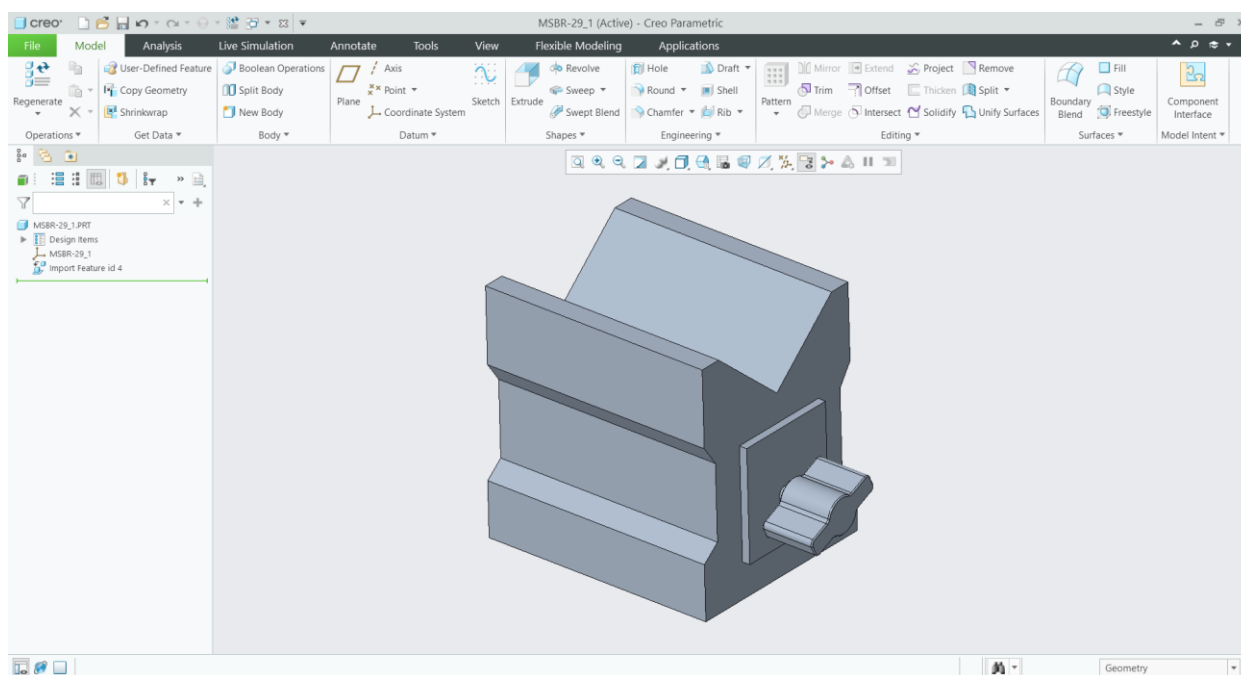
За потребе овог рада креиран је интуитиван модел, што подразумева једноставне димензионе и геометријске захтеве, како би био приказан принцип рада у поменутом софтверу, *слика 4*. Creo нуди могућност да се у оквиру „Model Tree“ прозора види све што је рађено приликом формирања модела. У конкретном случају за формирање модела коришћене су опције: „Extrude“ и „Revolve“.



Слика 4. Приказ коришћених наредби за креирање траженог модела

2.2. Моделирање 3D модела стезног помоћног прибора у софтверу PTC Creo Parametric

Поред мерног дела за овај рад је било потребно концептуално осмислити и формирати стезни прибор који ће испуњавати потребе мерне инспекције, *Слика 5*. Стабилност и приступачност током мерне инспекције кључни су фактори који утичу на тачност добијених резултата. Поред тога, важно је оптимизовати број стезања радног комада, идеално једно стезање током целокупне инспекције. Свако додатно стезање и промена позиције повећавају време потребно за инспекцију и уносе грешке у мерење, што се директно одражава на целокупни извештај о контроли. Такође, људски фактор игра значајну улогу у процесу позиционирања. Прецизно и адекватно стезање смањује време контроле квалитета, што резултира значајним бенефитима у процесу мерне инспекције [2].



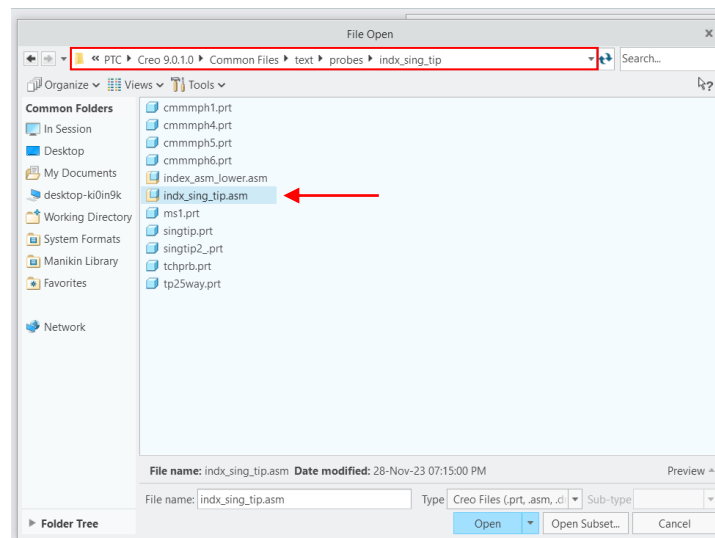
Слика 5. Приказ моделираног склопа стезног прибора

2.3. Моделирање (интеграција) 3D модела мерног сензора у софтверу PTC Creo Parametric

Након моделирања мерног предмета и помоћног стезног прибора, следећи корак је израдити (интегрисати) мерну сонду. PTC Creo Parametric садржи у оквиру свог toolbox-а различите конфигурације мерне сонде, односно мерних пипака потребних за креирање модела виртуелне мерне инспекције.

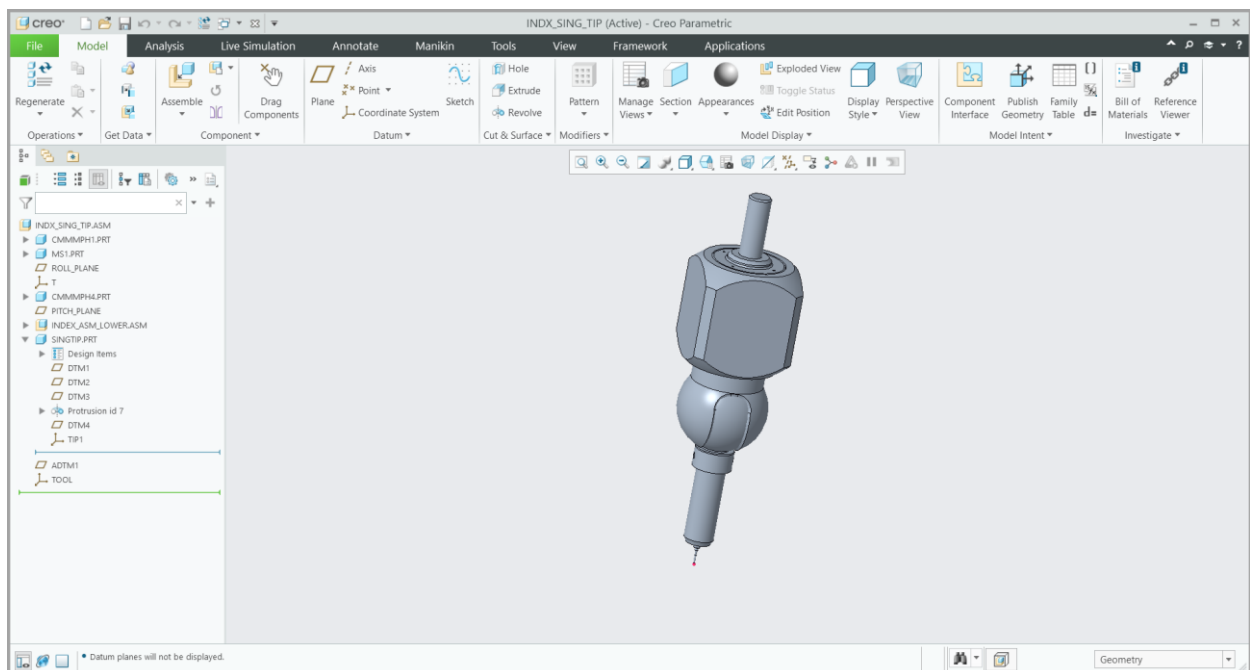
Мерни сензор представља јако битну компоненту у целом процесу јер омогућава визуелни приказ, који се остварује у реалном времену, кретања мерне сонде и отклања могућност колизије између мерне сонде и радног комада/помоћног прибора за стежање/радног стола машине.

На слици 6 је дат приказ на који начин се мерни сезор учитава из toolbox-a, уз напомену да је потребно тражити на оном диску (C:, D:, E:) на коме је извршена инсталација самог софтвера. У конкретном случају: File → Open → C:\Program Files\PTC\Creo 9.0.1.0\Common Files\text\probes\indx_sing_tip\indx_sing_tip.asm.



Слика 6. Приказ увоза мерне сонде као независног склопа из PTC Creo toolbox-a

На слици 7 је дат приказ отвореног модела склопа мерне сонде који нам нуди PTC Creo Parametric софтвер. За потребе мерне инспекције конкретног призматичног мерног дела је изабрана мерна глава са ротирајућим зглобом и једним мерним пипком, у правцу Z осе. Контакт са примитивима и остваривање инспекције толеранција, које су задате техничким цртежом, се остварује променом угла сензора о којима ће бити речи у наставку.



Слика 7. Приказ склопа мерне главе са ротирајућим зглобом, преузете из софтвера „PTC Creo Parametric“

2.4. Моделирање 3D модела нумерички управљане мерне машине у софтверу PTC Creo Parametric

Последњи модел који је потребно дефинисати за потребе дигиталне мерне инспекције, заправо представља скуп модела, односно склоп који садржи своје подсистеме са великим бројем компонената у оквиру њих, а то је модел нумерички управљане мерне машине.

У наставку ће бити описано моделирање, Mitutoyo CRYSTA Apex, мерне машине, *слика 8*. Поменута машина се састоји од низа елемената који заједно чине функционалан систем. Машина је моделирана са високим нивоом детаља, па се у складу с тим приступило моделирању сваког елемента машине, који ће касније бити спрегнути у јединствен склоп, помоћу Creo Parametric софтвера.



Слика 8. 3D CAD модел, Mitutoyo CRYSTA Apex, мерне машине

Mitutoyo CRYSTA Apex мерну машину карактеришу мерења од тачке до тачке и континуирано мерење малих, средњих и релативно великих контура. Фиксирани део уређаја за мерење се састоји од гранитног радног стола на чијој површини су машински уграђене шине дуж којих се креће главни носач. На радном столу се креће главни носач (Y оса), сачињен од греде и два стуба (леви и десни). Централни носач се креће дуж греде главног носача (X оса). Стуб је састављен унутар централног носача и креће се вертикално у односу на под (Z оса). Структура моста обезбеђује оптималну крутост, тако да у нормалним условима, машина може да се инсталира директно на поду. Све три осе мерне машине остварују своја трансляторна кретања помоћу мотора. Кретање оса је увек под надзором контролног система који може да се контролише софтвером за мерење

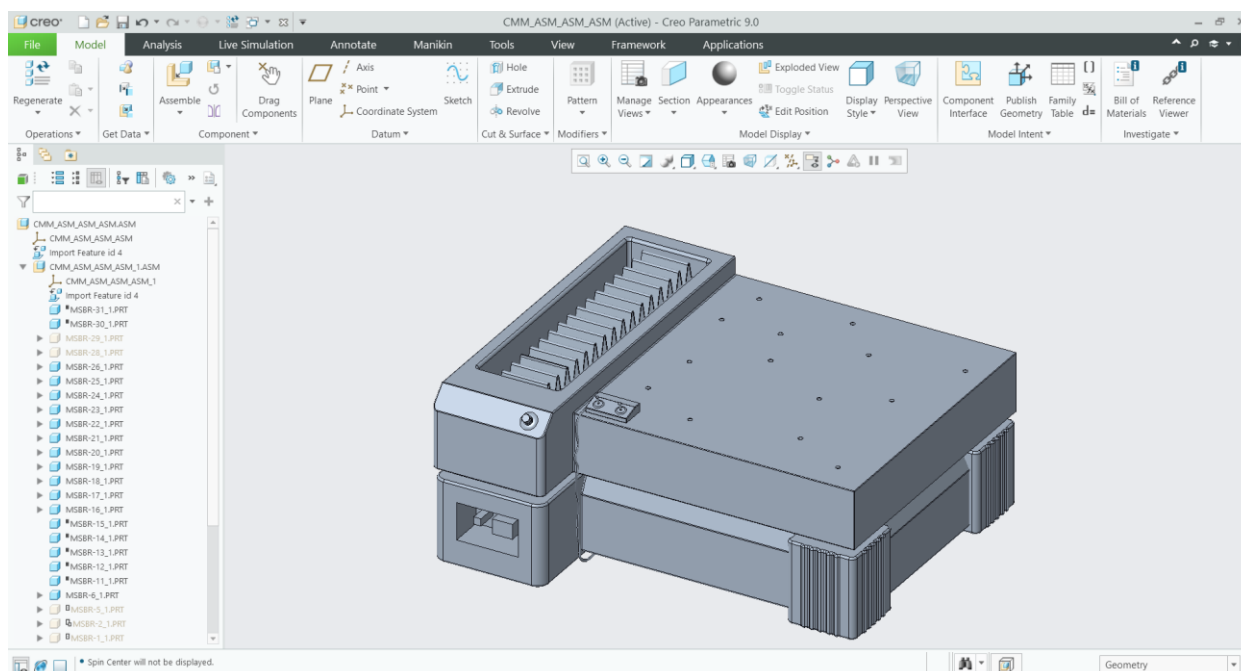
или од стране контролног џојстика путем преносног терминала. Различити типови мерних глава могу бити монтирани на стуб.

Три елементарна подсистема мерне машине представљају: постоље машине и радни сто, главни носач и мерни сензор (Z оса). У наставку ће бити детаљно описани сваки од њих и приказан њихов 3D CAD модел у Creо окружењу.

2.4.1. Постоље и радни сто

Постоље машине служи као основа и потпорна структура за целокупну машину. Примарна функција је да обезбеди стабилност, крутост и структурални интегритет машине, обезбеђујући тиме тачна и поуздана мерења. База је дизајнирана да минимизира вибрације, спољашње сметње и све друге факторе који могу штетно утицати на процес мерења.

Што се тиче материјала, основа мерне машине је обично направљена од висококвалитетног ливеног гвожђа или гранита. Ливено гвожђе је познато по одличним својствима пригушења, која помажу у апсорпцији вибрација и обезбеђују стабилност. Такође је веома отпоран на хабање и деформације, обезбеђујући дугорочну тачност машине. Гранит је, с друге стране, цењен због своје изузетне стабилности димензија, ниског коефицијента топлотног ширења и високог природног капацитета пригушења. Ова својства чине гранит одличним избором за базу НУММ-е, јер помаже да се минимизирају ефекти температурних промена и вибрација на тачност мерења [3].



Слика 9. Приказ подскопа постоља и радног стола мерне машине

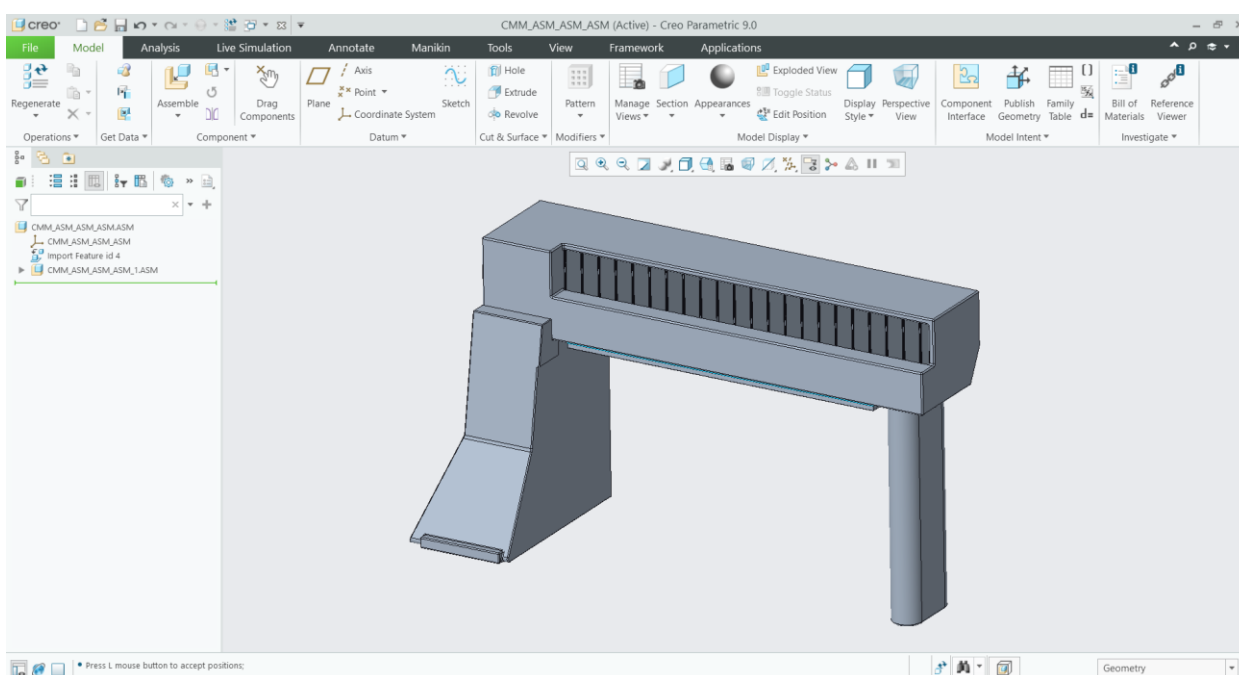
Радни сто који је позициониран на постољу машине служи као платформа за позиционирање и причвршћивање мерног објекта и његовог прибора за стезање. Посебно је дизајнирана да прилагоди стезне приборе и држаче потребне за стезање радног комада на различитим местима на столу.

Примарна функција радног стола је да обезбеди стабилну и чврсту површину за мерни предмет и припадајући прибор за стежање. Обично је направљена од издржљивих материјала као што су гранит или челик, изабрани због високе чврстоће, крутости, отпорности на деформације и ниског коефицијента топлотног ширења.

2.4.2. Главни носач

Главни носач је структурна компонента која омогућава мерном систему да се креће дуж Y-осе. Он уједно служи и као вођица за кретање у правцу X-осе. Пружа стабилност и потпору за кретање у хоризонталном правцу.

На главном носачу се такође монтира мерна летва/мерни енкодер. Мерна летва или енкодер даје повратну информацију о положају X-осе, омогућавајући мерном систему да прати његово кретање у поменутом правцу.



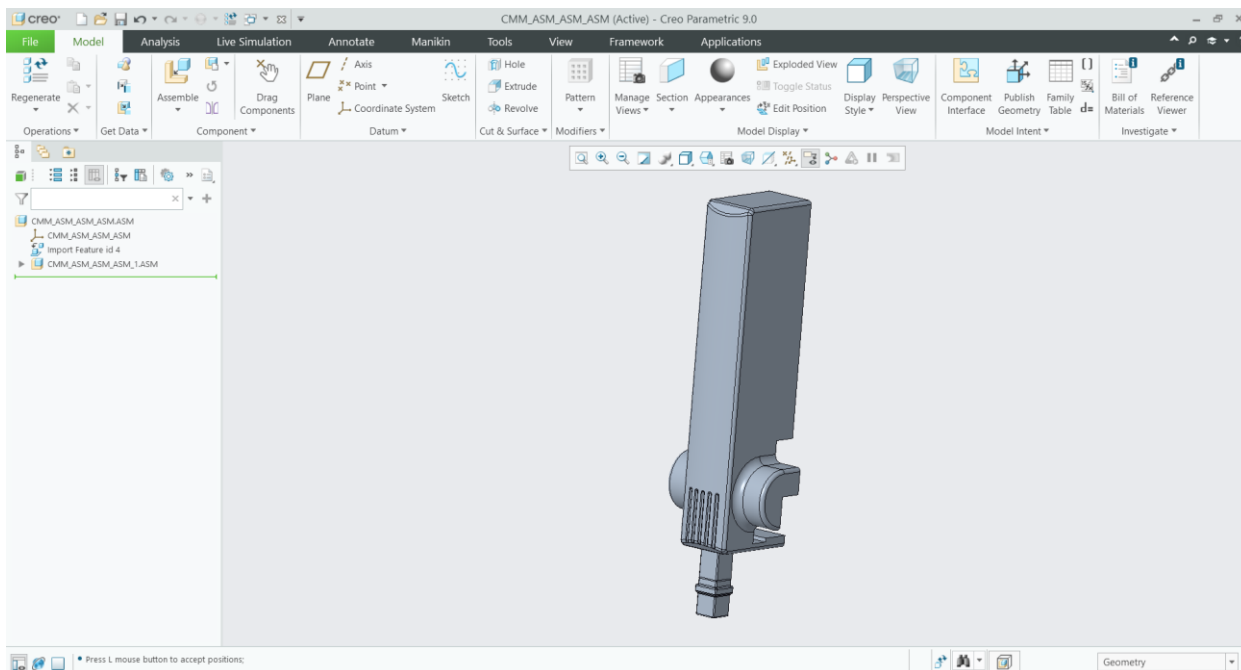
Слика 10. Приказ подсклопа главног носача мерне машине

2.4.3. Мерни сензор – Z оса

Z - оса обезбеђује кретање у „Z“ правцу, управном на „XY“ раван и омогућава мерној сонди да успостави контакт са мерним делом. Потребно је нагласити да претходно наведено важи за случај када се мерење врши на контактної односно тактилної мерној машини, као што је случај у конкретном примеру.

На крају мерног сензора се интегрише одговарајућа мерна глава као и мерни пипак са дефинисаним конфигурацијама, како би инспекција задовољавала потребу концизног мерења свих задатих толеранција мерног дела.

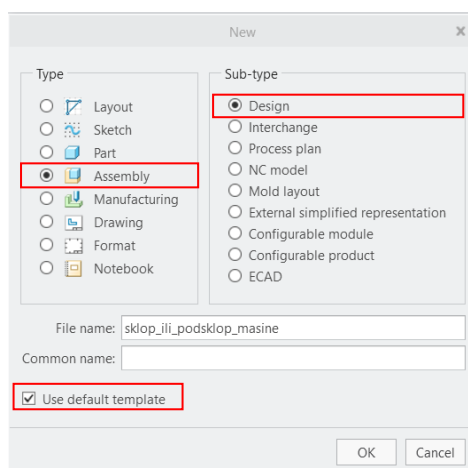
Да би се обезбедило тачно позиционирање и кретање у правцу „Z“, оса је опремљена квалитетним моторима и енкодерима. Ове компоненте омогућавају тачну контролу вертикалног померања мерног система, омогућавајући поновљива и поуздана мерења. Мотори обезбеђују неопходну погонску силу, док енкодери дају повратну информацију о положају осе, обезбеђујући да се жељени положај постигне са великом тачношћу.



Слика 10. Приказ подсклопа мерног сензора мерне машине

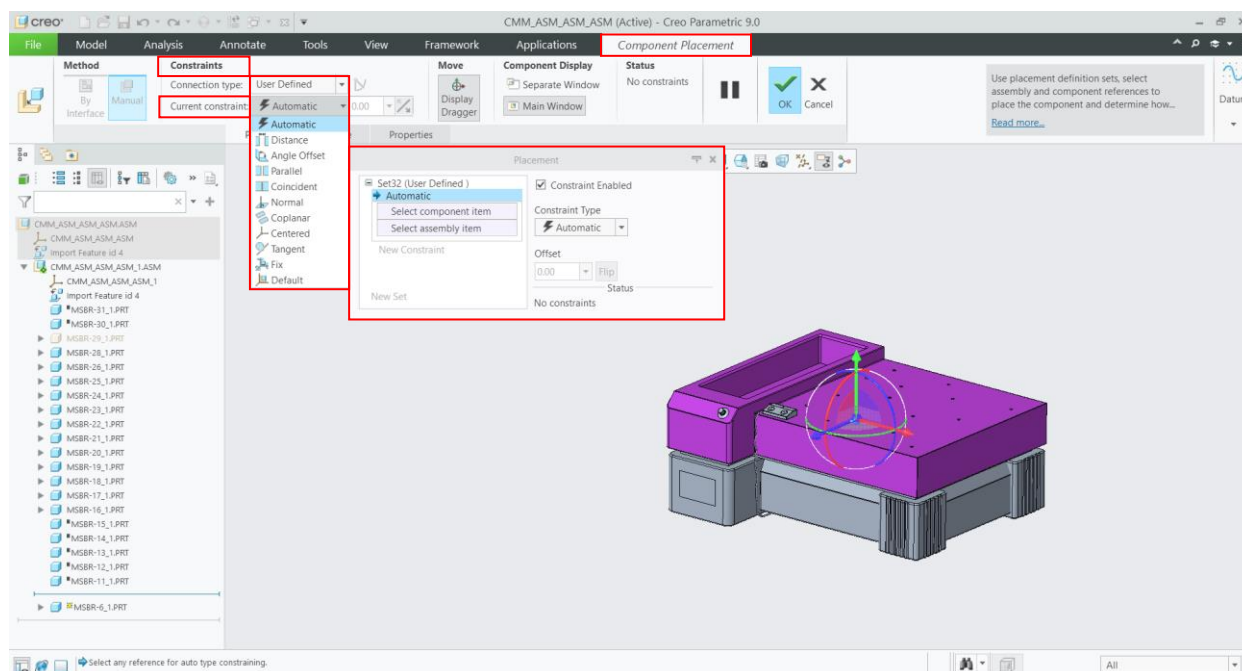
Потребно је напоменути и на који начин се успостављају везе између свих елемената једног подсклопа, док ће у наредном поглављу бити приказано како се успостављају кинематске везе између подсклопова, базирано на истом принципу.

Приликом креирања склопа који садржи мањи број компоненти или склопа целокупне мерне машине, свакако се користи „Assembly“ режим у оквиру Сгео софтвера, слика 11. Када покренемо „Assembly“ режим, дефинисање тренутних ограничења и кинематичких веза између компоненти је први и кључни корак у креирању тачне виртуелне репрезентације физичког система.



Слика 11. Приказ поступка уласка у модул за дефинисање склопа – Assembly

На слици 12 је приказан прозор који се отвара у радном директоријуму и служи за дефинисање „тренутних ограничења“ између компоненти једног подсистема мерне машине. Кораци за увоз и дефинисање нове компоненте у склоп су: Model → Assemble → Constraints → Current constraint → Placement.



Слика 12. Приказ увоза и дефинисања нове компоненте у склоп

Creo Parametric нуди различите врсте „тренутних ограничења“ које се могу применити између компоненти, и то су:

Distance: Ограничење типа „удаљеност“ успоставља одређену дистанцу између две компоненте. Осигурава одржавање дефинисане удаљености, омогућавајући тачно позиционирање и поравнање. Ова веза се користи када компоненте треба да буду размакнуте на одређеној удаљености једна од друге.

Angle Offset: Ово ограничење дефинише специфичан угаони однос између две компоненте. Осигурава одржавање назначеног угла. Неопходно је када компоненте треба да буду оријентисане под одређеним угловима једна у односу на другу.

Parallel: Паралелно ограничење поравнава две компоненте у паралелној конфигурацији. Осигурава да одабране површине или осе компоненти остану паралелне једна са другом, одржавајући конзистентну оријентацију. Ово ограничење се користи када компоненте морају бити паралелне да би се постигла одговарајућа функционалност или поравнање.

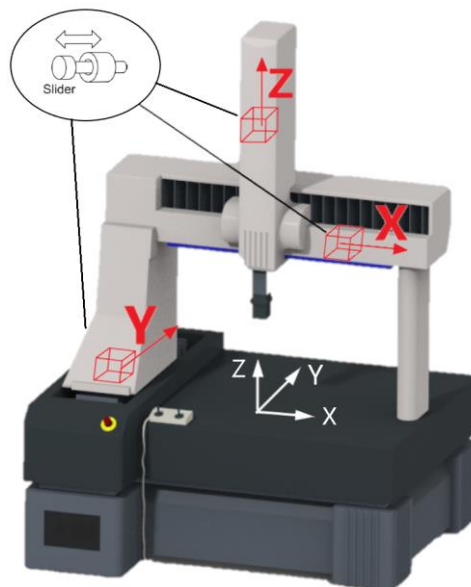
Coincident: Ово ограничење поравнава две компоненте тако да се изабрана тачка или површина једне компоненте поклапа са тачком или површином друге компоненте. Осигурава да се назначене карактеристике преклапају или додирују. Ова веза се често користи када компоненте треба да буду тачно позиционирани на одређеним локацијама или када делови морају тачно да се уклопе.

Normal: Нормално ограничење поравнава две компоненте управно једна на другу. Осигурава да су изабране површине или осе компоненти управне, омогућавајући правилну оријентацију.

3. Опис кинематског моделирања мерне машине

Модел виртуелне нумерички управљане мерне машине осим димензионог и геометријског реплицирања стварног физичког система мора да задовољи и његову кинематску структуру. Као што је већ напоменуто за описивану мерну машину и остваривање њеног кретања приликом извршења мерне инспекције потребна су три транслагациона кретања [4].

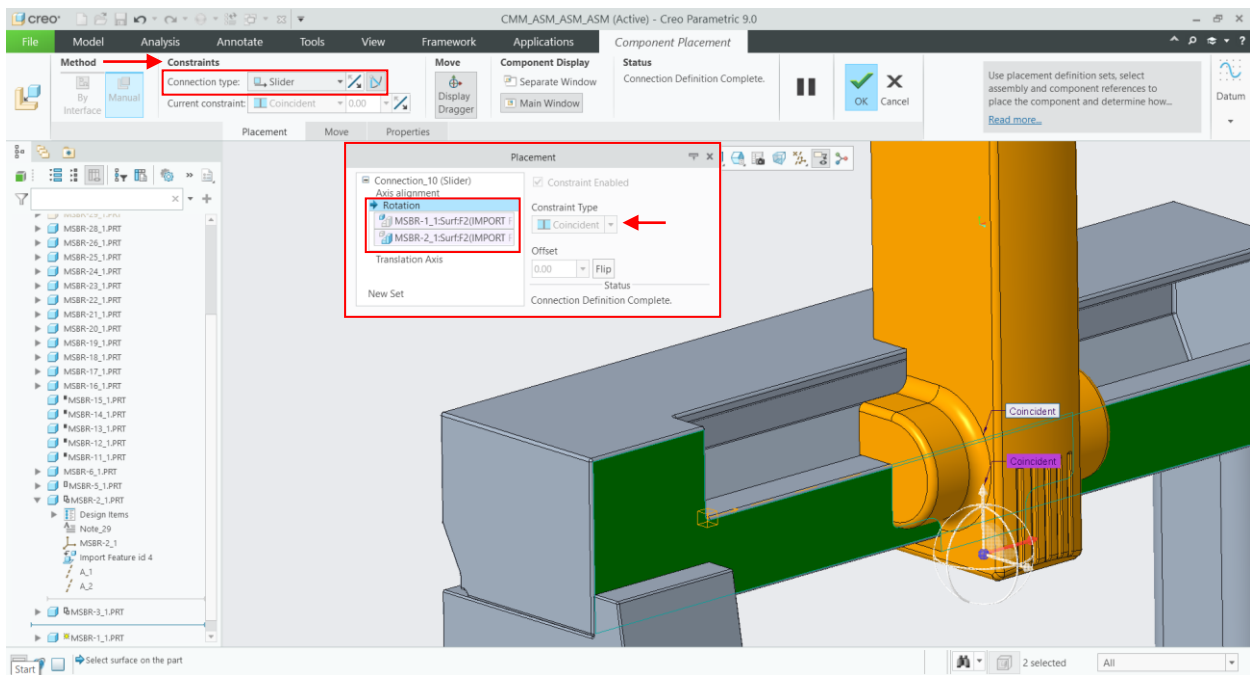
Успостављање кинематских веза између подсистема креиране мерне машине се остварује коришћењем везе типа „клизач“. Веза клизача омогућава тачно линеарно кретање дуж одређене осе обезбеђујући неопходну транслагацију у правцима X, Y и Z.



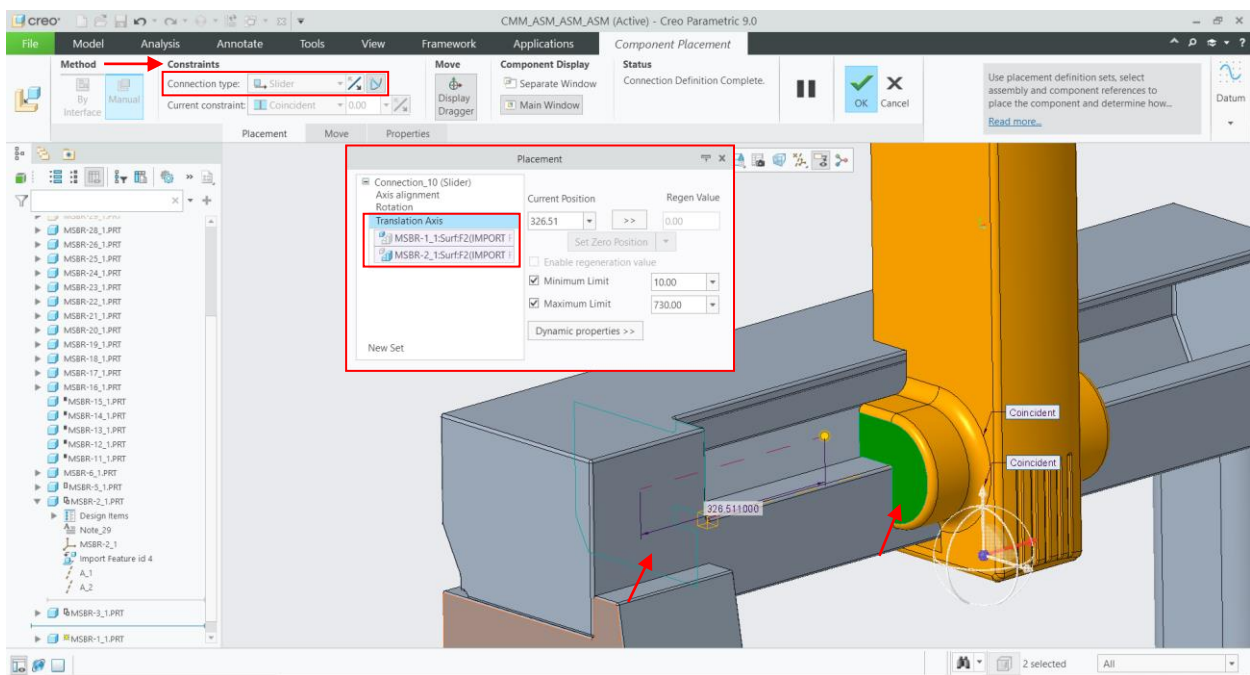
Слика 13. Приказ дефинисаних кинематичких веза типа „клизач“ на 3D CAD моделу мерне машине

Дефинисање кинематичких веза укључује успостављање односа и ограничења између различитих компоненти виртуелног система. Ове везе обезбеђују да су кретања и интеракције између компоненти машине тачно представљене за потребе касније симулације. Дефинисањем кинематичких веза, виртуелна НУММ-а може тачно да реплицира понашање и кретање физичког система, омогућавајући поуздане симулације процеса мерења.

У наставку ће на примеру кретања мерног сензора по главном носачу мерне машине, односно остваривање транслагације система по X осе, бити детаљно описано креирање и имплементација једне кинематске везе.



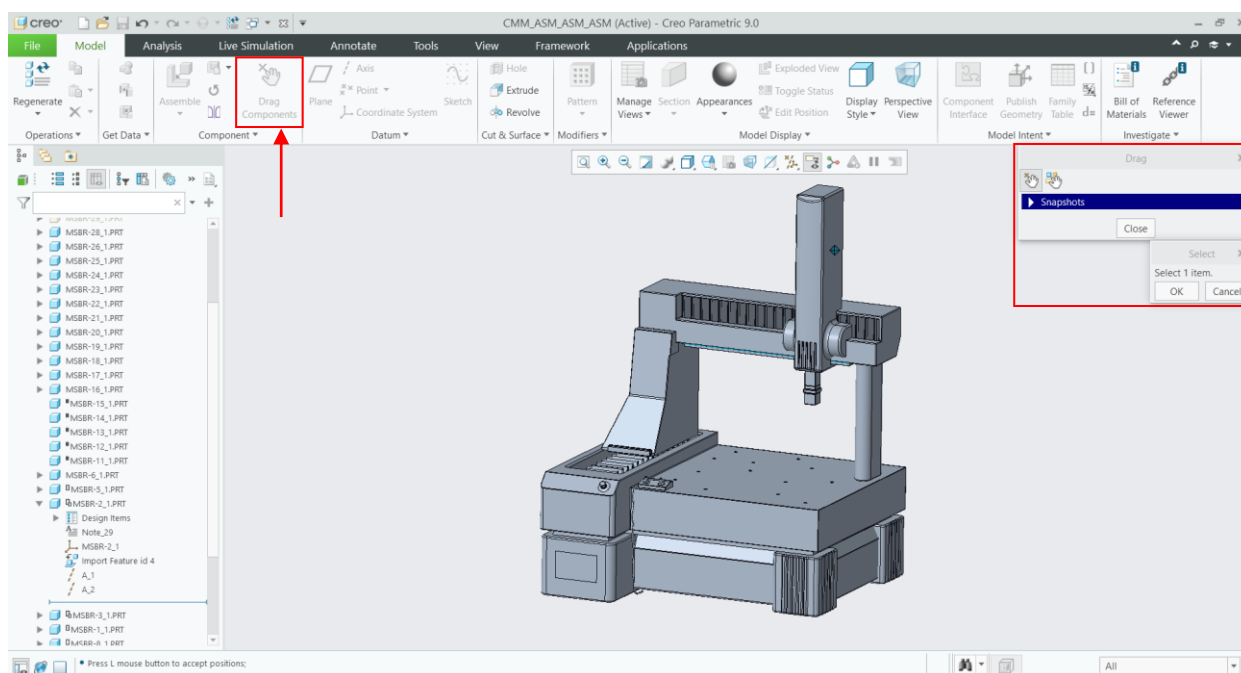
Слика 15. Поравнање површина, блокирање ротације, за дефинисање транслаторног кретања по X оси



Слика 16. Дефинисање транслаторне осе и њених ограничења за кретања по X оси нумерички управљане мерне машине

По завршетку дефинисања кинематских веза за све три транслаторне осе X, Y, Z, постоји могућност провере исправног рада дигиталног мерног система. На слици 17 је приказано начин коришћења опције „Drag Components“. Одабиром поменуте функције и селектовањем жељеног подсистема машине, ради провере

њеног кретања у дефинисаном правцу. Битно је напоменути да иако је одабран један подсистем, визуелно сви системи треба интегрално да врше кретање.



Слика 17. Провера дефинисаних кинематских веза између подсистема помоћу „Drag Components“ функције

4. Модел симулације мерне инспекције

Мерна инспекција у оквиру софтверског пакета „PTC Creo Parametric“, односно симулација инспекције, врши се у модулу „СММ“. Овај модул омогућава увоз креираних модела и склопова, вршење виртуелног мерења над њима и генерисање програма за реалну инспекцију на НУММ. Омогућава дефинисање толеранција и њихових односа на самом моделу, избор и динамички приказ мерних сонди и њихових конфигурација у зависности од потребе задатка, као и динамички приказ нумерички управљане мерне машине. Коришћењем „СММ“ модула могу се креирати мерне секвенце које су потпуно асоцијативне и параметарски дефинисане у односу на 3D CAD модел.

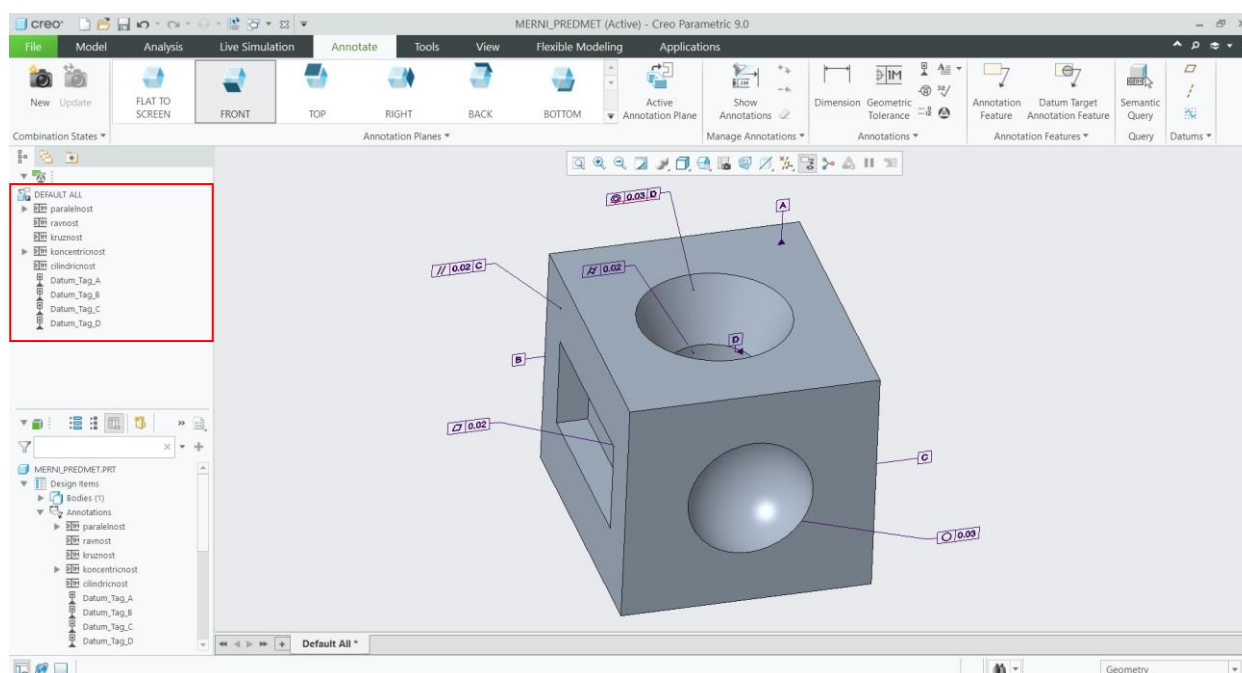
Кораци при креирању симулације мерне инспекције у софтверском пакету „PTC Creo Parametric 9“:

1. Израда 3D модела радног предмета у модулу „part“;
2. Увоз свих потребних модела, односно целог склопа, без склопа мерне машине и мерне сонде, у „СММ“ модул;
3. Дефинисање склопа у односу на референтне координате:
 - Дефинисање мерне машине (*CMM workcell*);
 - Избор и дефинисање мерних сонди (*Probes*);
 - Дефинисање помоћног прибора за фиксирање (моделиран у софтверу);
4. Дефинисање почетног координатног система мерног дела и свих релевантни координатних система потребних за симулацију виртуелне мерне инспекције,

5. Дефинисање корака- постоје три типа које програм разликује. У оквиру овог рада биће коришћен „*Measure Step*“;
6. Геренисање DMIS (.ncl) кода.

Пре почетка описа рада у оквиру модула „*CMM*“, биће представљена још једна опција коју нуди софтвер „*PTC Creo*“, која је у узајамној вези са самом симулацијом. Наиме, нове верзије програма нуде могућност верификације. Верификација представља потврду мерења у излазном коду, након извршене симулације мерне инспекције. Ово, поред визуелног приказа, значајно утиче и на тумачење резултата добијених након симулације.

Након креирања модела мерног дела, све информације о толеранцијама са техничког цртежа биће пренете на сам модел у оквиру CAD/CAM окружења, *слика 18*.



Слика 18. Толеранције пренете на 3D модел у програму „PTC Creo“

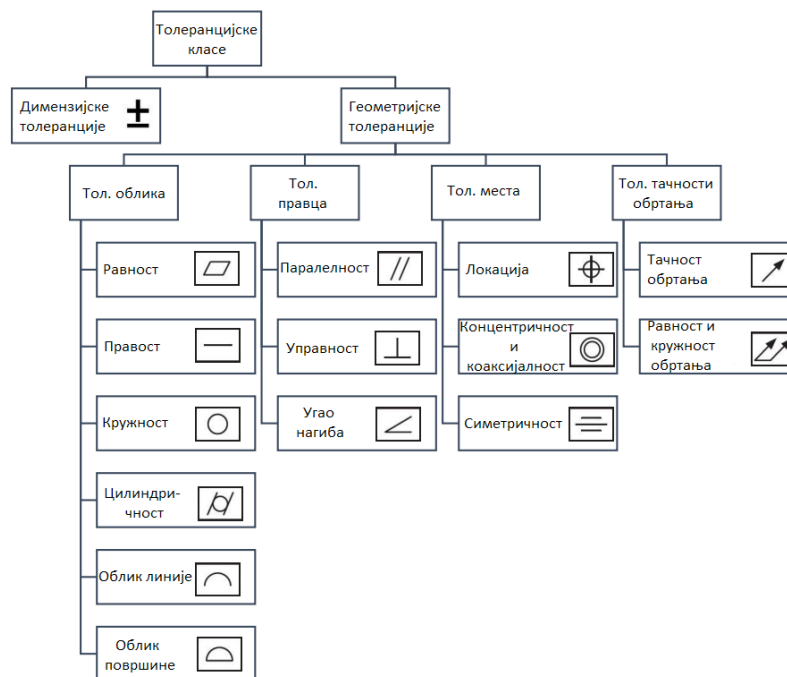
Пре него што буде детаљно описан процес имплементације толеранција на 3D CAD модел мерног дела, биће дат кратак опис и подела толеранцијских класа.

У свету су уобичајени термини толеранције, секвенце толеранције и анализа толеранције конструкција. Од почетка технолошког развоја, а пре свега са појавом масовности производње, постало је важно утврдити да ли се скуп машинских делова може склопити у финални склоп након производње. У производњи многи фактори утичу на коначне димензије делова: техничка, технолошка, својства материјала, услови животне средине, људски фактор, итд. За конструкторе је постало важно да унапред планирају, односно да одреде дозвољене опсеге грешака и одступања димензија и геометрије делова од називних. На тај начин конструктори омогућавају испуњавање функционалних захтева склопова, односно производа после производње и монтаже. Поступак којим се утврђују дозвољена одступања (толеранције) назива се анализа толеранције (метролошкости). Сваки саставни део склопа има своје одступање,

а пошто су делови у контакту, постоји низ одступања (мерни ланци) који на крају могу да утичу на функцију склопа.

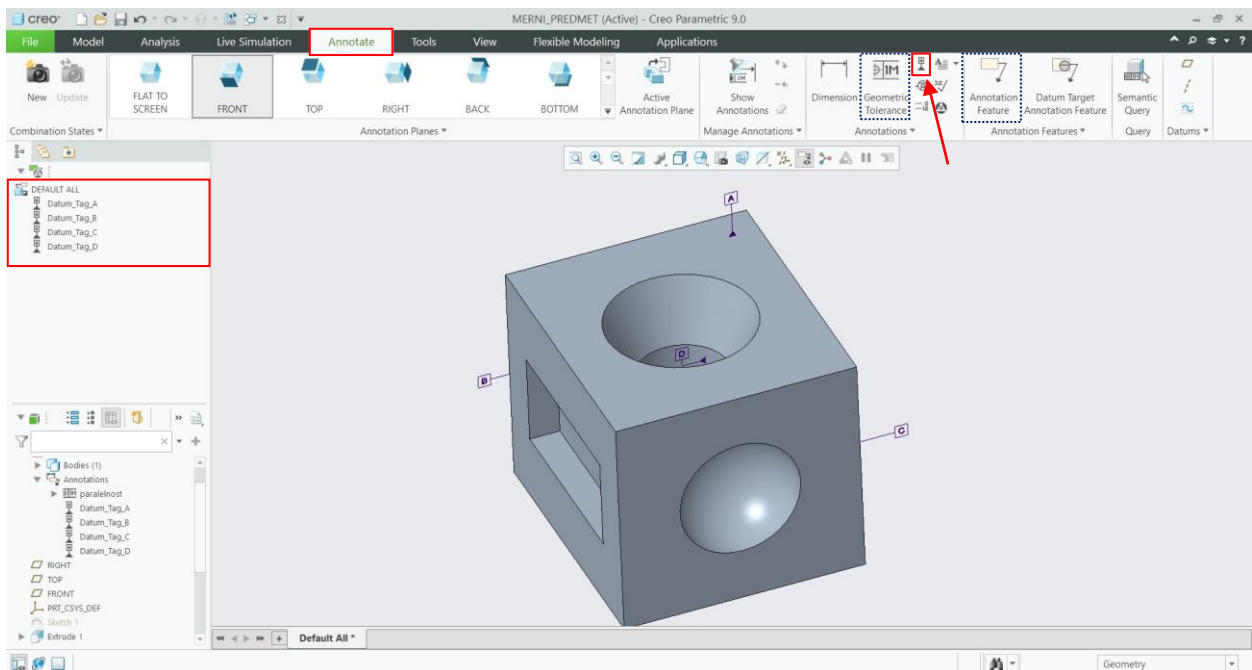
Данас се анализа толеранције примењује у готово свим производним индустријама, од производње склопова мањих димензија (нпр. интегрисаних кола) до производа већих димензија (сателити, свемирске станице, итд.). Анализа толеранције се користи за разумевање квантификација одступања. Најчешће се користи у случајевима када постоји могућност акумулације одступања геометрије у односу на номиналну, јер она утичу на функционалност и склопивост производа. Осим што анализа толеранције осигурава задовољење функционалности, анализа толеранције такође може утицати на трошкове производње. Ужи распони толеранције захтевају прецизнију производњу, што поскупљује процес контроле квалитета. Анализом метрологодичности, толеранције се одређују пре почетка производње, тако да се распони могу проширити и подесити према расположивим могућностима технологије, уз обезбеђивање функционалности склопа. На овај начин се смањују трошкови производње.

Мерни део мора са аспекта метрологодичности и прописаних захтева да задовољи одређену тачност. Техничким цртежом, могу бити дефинисане разне толеранције као што су: толеранције угла, паралелности, кружности, управности, локације, равности, концентричности и цилиндричности. Поменуте толеранције спадају у групе толеранција облика, правца и места. Детаљна подела толеранцијских класа је дата у *табели 1*.



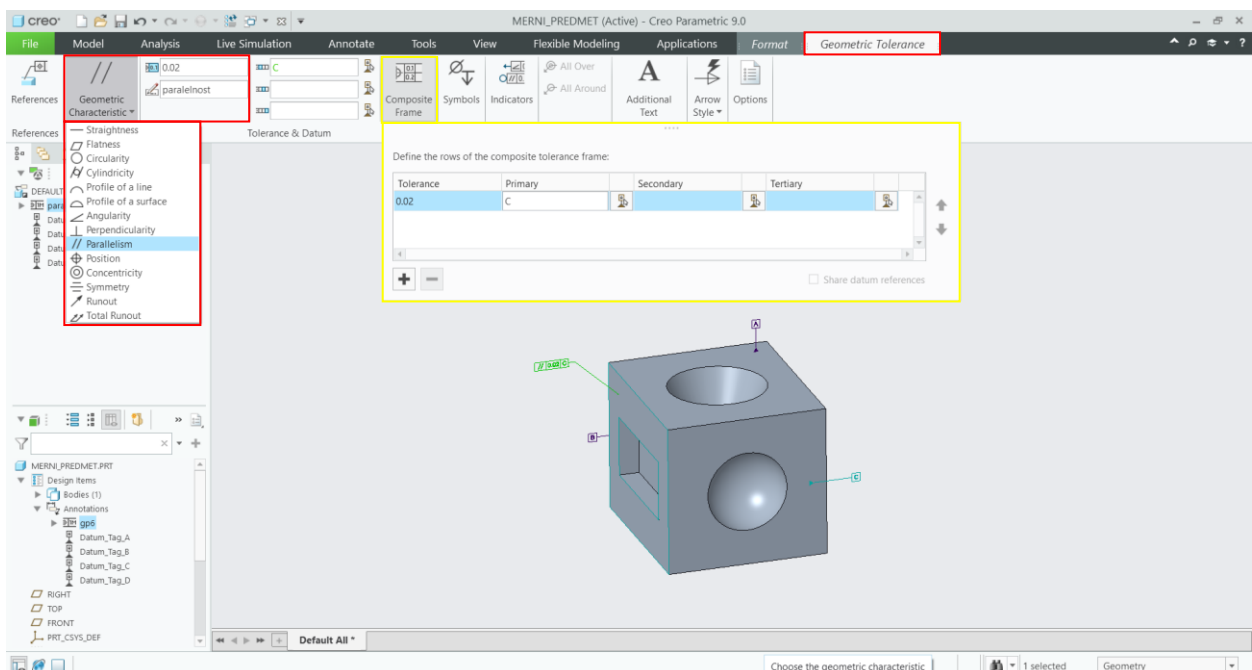
Табела 1. Подела толеранцијских класа

Процес имплементације толеранција на модел се остварује по следећем принципу. Помоћу картице „Annotations“ на моделу креирамо мерне базе (*Datum Feature Symbol*) које су потребне за даље дефинисање толеранција, *слика 19*.



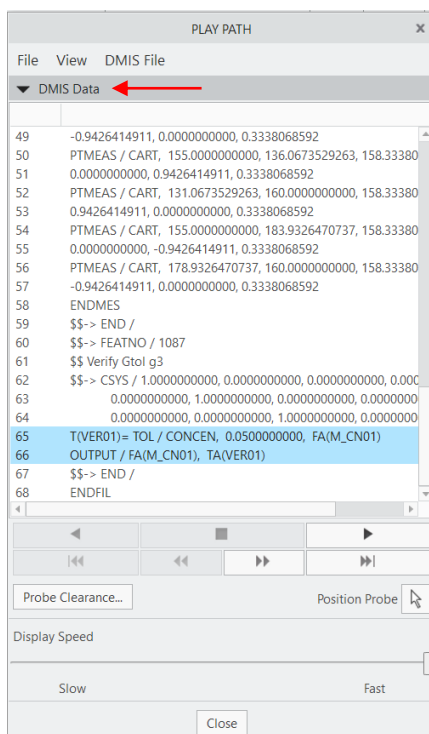
Слика 19. Креирање мерних база на 3D CAD моделу у програму „PTC Creo“

Опцијом „Geometric Tolerance“ имплементирамо опсеге, карактеристике и односе толеранција на самом моделу, слика 20. Помоћу процеса верификације долази до спајања операција, односно сваког појединачног захвата, са потребним толеранцијама. Конкретне предности се огледају у томе да симулација не приказује само инспекцију карактеристичних површина, него их повезује са жељеним толеранцијама, визуелизује и верификује колизију ако постоји.



Слика 20. Приказ уноса толеранција на 3D модел мерног дела, помоћу опције „Geometric Tolerance“

Потврду налазимо у последњим линијама кода излазног DMIS (Dimensional Measuring Interface Standard) фајла, слика 21. DMIS представља текстуалну датотеку која обезбеђује листу инструкција (речник) за прослеђивање програма инспекције на мерну опрему, као и за прослеђивање података мерења и процеса назад у систем за анализу, прикупљање или архивирање.



Слика 21. Потврда извршене верификације у последњим линијама DMIS кода

4.1. Дефинисање симулације мерне инспекције у CMM модулу

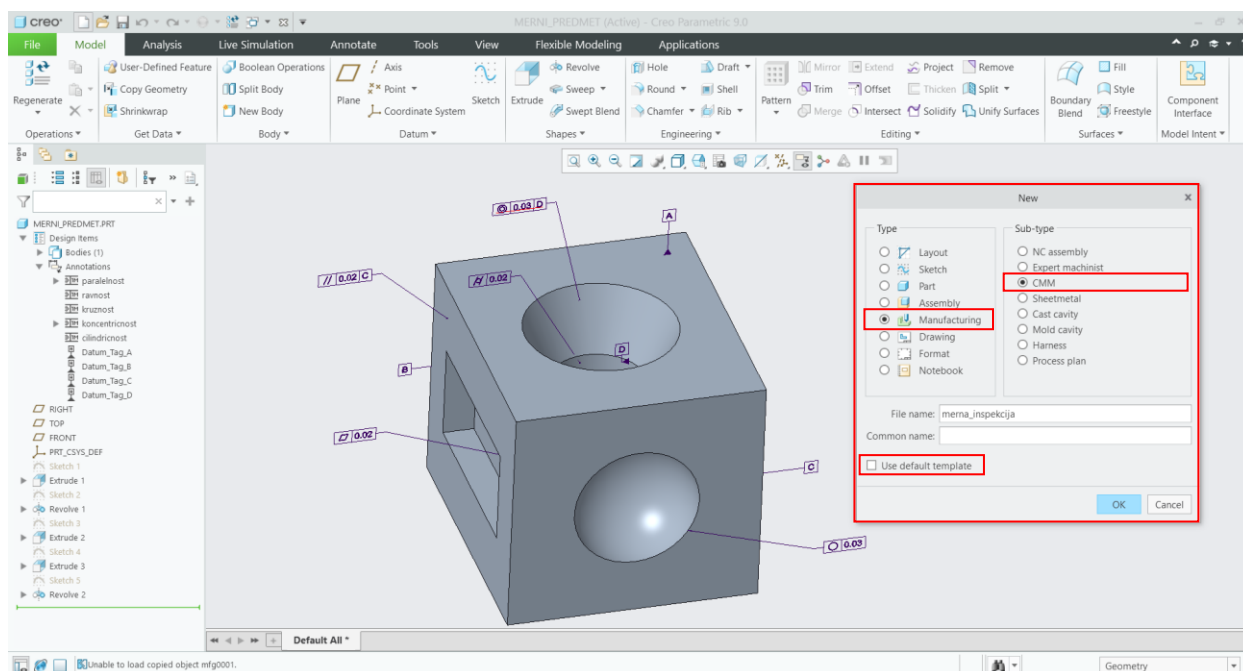
Почетак рада у „CMM“ модулу отпочиње истим принципом као и код цртања мерног дела. Приликом стартовања програма на почетном екрану се приказује опција „New“. Након избора ове опције отвара се нови прозор који нуди више опција за рад у овом програму, зависно од потребе и задатка. За коришћење „CMM“ модула потребно је изабрати опције „Manufacturing“ и „CMM“. Као и код израде 3D модела радног дела, потребно је искључити опцију „Use default template“, слика 22. Након искључења опције „Use default template“ потребно је изабрати систем мерних јединица „mmns_mfg_cmm_rel“.

File → New → Manufacturing → CMM → Use default template → mmns_mfg_cmm_rel.

Постоји могућност промене мерних јединица и преко опције „Model Properties“, у току рада у Creo софтверу. File → Prepare → Model Properties → Materials → Units → change → millimeter Newton Second (mmNs). Препоручује се да се пре почетка рада у „CMM“ модулу изврши провера мерних јединица у опцији „Model Properties“.

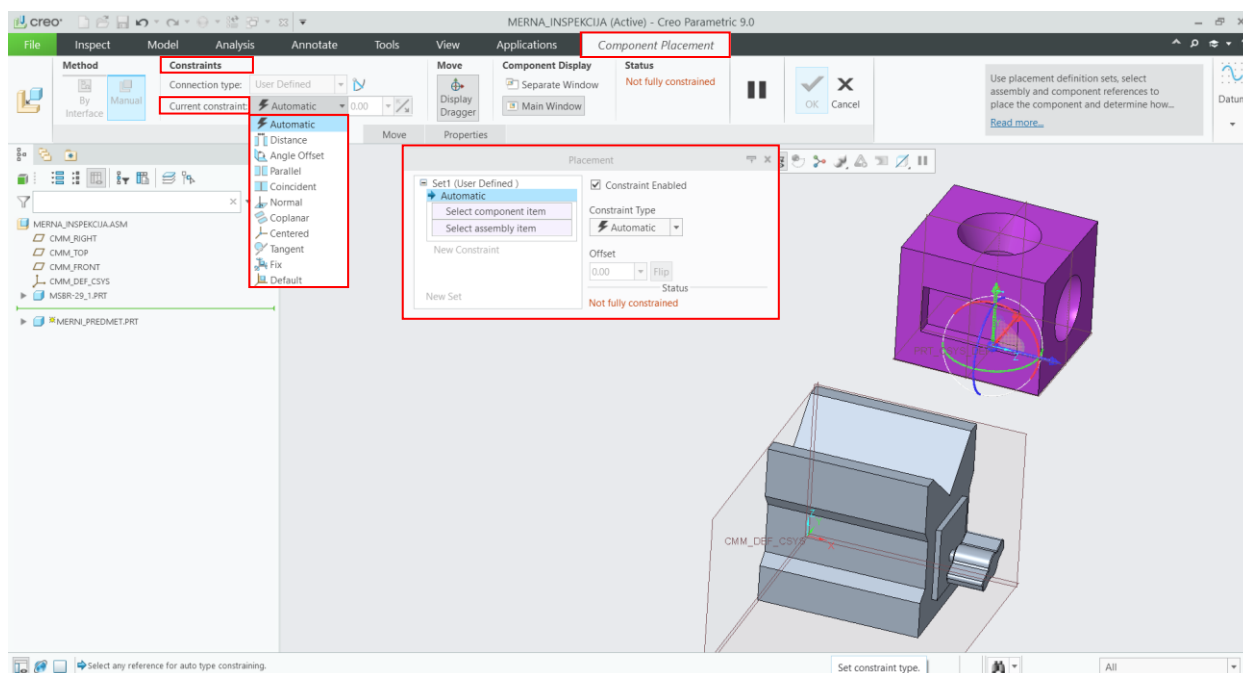
Након дефинисања основних параметара за рад у овом модулу, прелази се на увоз потребних компонената за извршење симулације мерне инспекције. Постоје два начина инсертовања компоненти у програм. Први је да се формирани склоп (мерни део и помоћни стезни прибор) увезе као такав у „CMM“ модул. Други начин, који је коришћен прикликом израде овог рада, је да се у модул увози сваки

део појединачно и затим да се формира склоп. Оба начина су потпуно легитимна и равноправна у софтверу PTC Creo. Приказ увоза компоненти преко картице „Inspect“ и потом опције „Reference Model“, приказан је на слици 23.



Слика 22. Приказ почетног екрана и наредба за избор „СММ“ модула

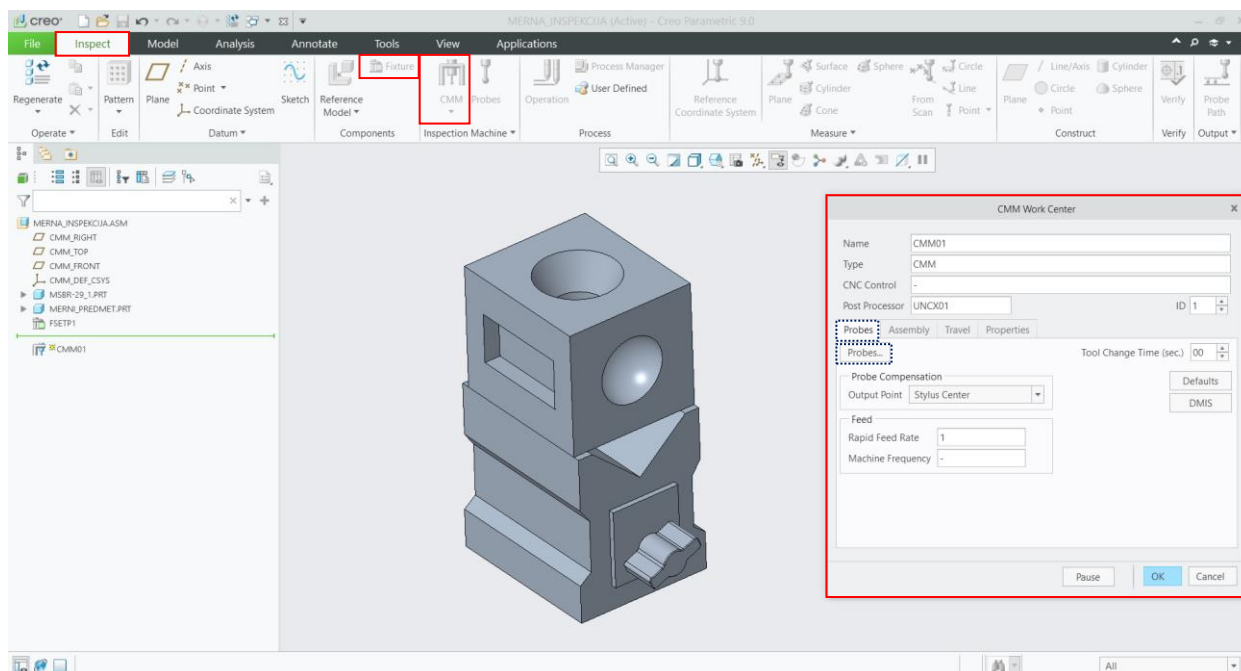
На слици 23 је приказан поступак поклапања компоненти у простору и центрирање самог склопа како би се дефинисала фиксна позиција модела пре почетка симулације мерне инспекције у софтверском пакету. За овај поступак је коришћена опција „Placement“, која се аутоматски отвара када се склоп увезе у програм.



Слика 23. Увоз компонента и позиционирање помоћу опције „Placement“

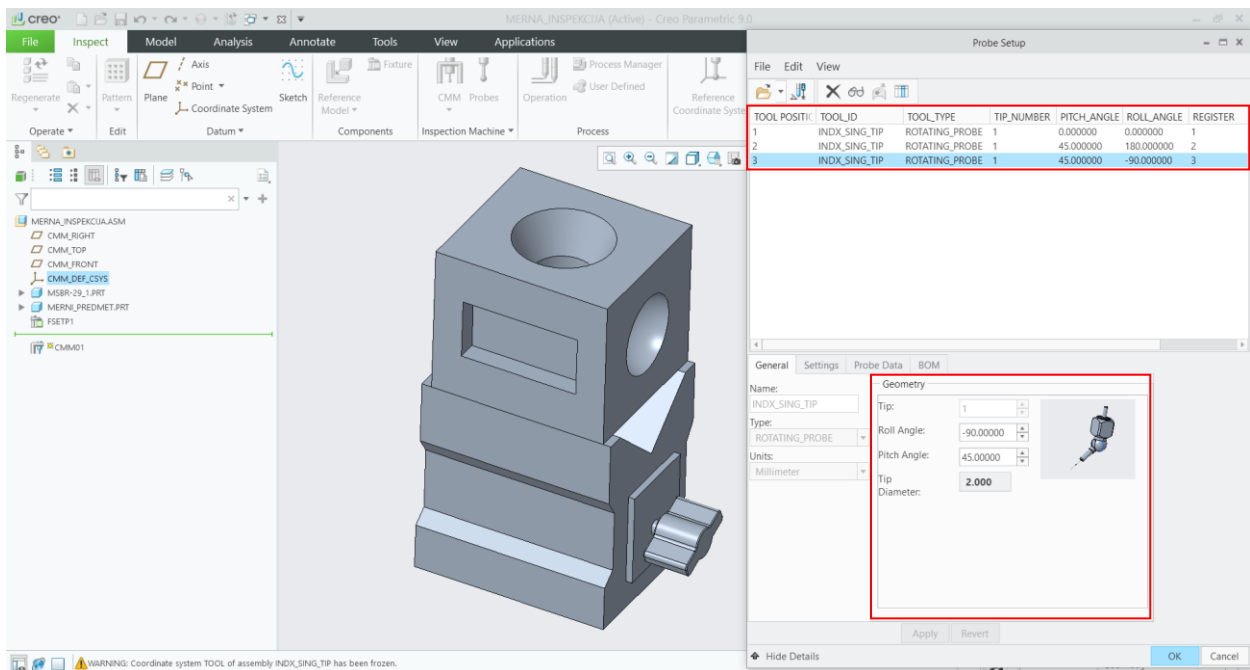
Након овог корака, положај и оријентација склопа, самим тим и мерног дела, је потпуно дефинисана у односу на координатни систем виртуелне мерне машине. Командом „Fixture“, слика 24, се дефинише помоћни прибор за стезање радног дела. Пошто је овом приликом стезни прибор увезен као компонента и мерни део позициониран у односу на њега у наредби „Fixture“ само ће бити дефинисан назив стезања као „FSETP1“, у прозору „Properties“.

На слици 24 је такође приказан избор опције „CMM“ којом се отвара прозор за подешавање „CMM Work Center“.



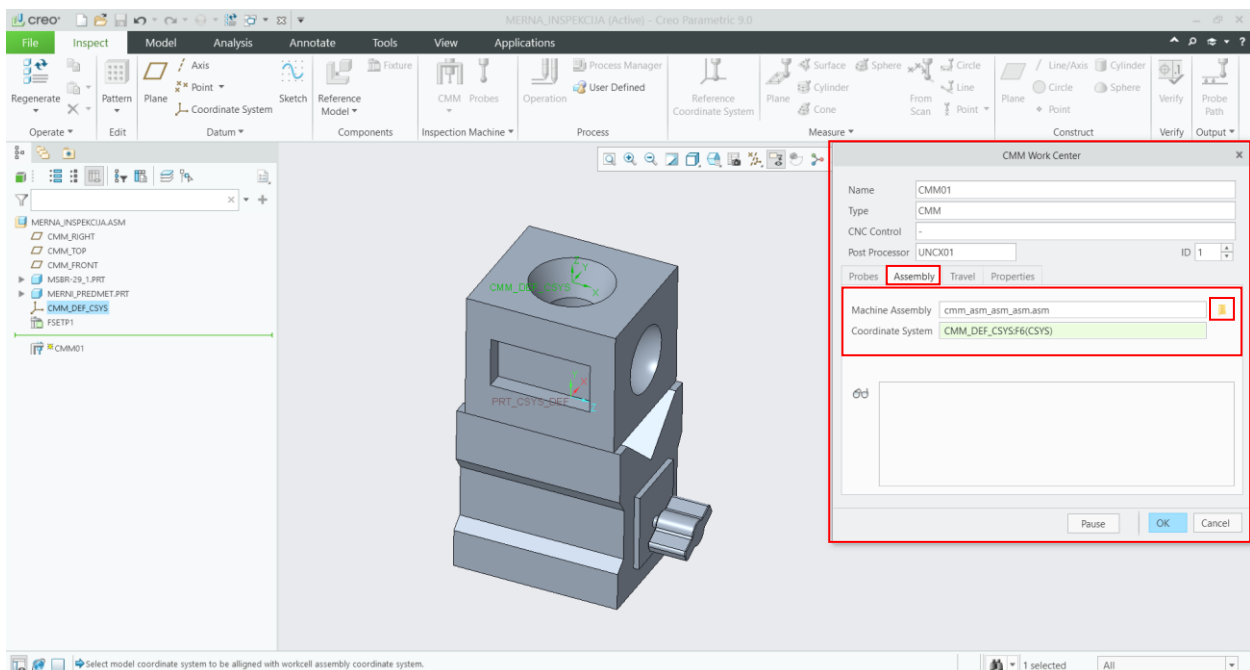
Слика 24. Дефинисање команде „Fixture“ и „CMM“ односно отварање прозора „CMM Work Center“

Избором опције „Probes“ (Слика 24) отвара се прозор за избор и учитавање мерних сонди. У палети програма постоји одређена база модела (склопова) мерних глава под називом „indx_sing_tip_modified.asm“. Кораци за селектовање и увоз мерне сонде која се налази у toolbox-у софтверског пакета PTC Creo Parametric су приказани и описани у оквиру слике 6. Изабрана мерна глава је ротирајућа, па је потребно извршити подешавања углава ротације (*roll angle*) и оријентације (*pitch angle*). Приликом употребе реалне мерне машине углови се обележавају са А и В. Приказ изабраних углава ротације и оријентације мерне сонде, који су неопходни за симулацију мерне инспекције приликом израде овог рада, дат је на слици 25. Углови су дефинисани како би се процес мерне инспекције вршио несметано и задовољио све техничким цртежом задате толеранције.



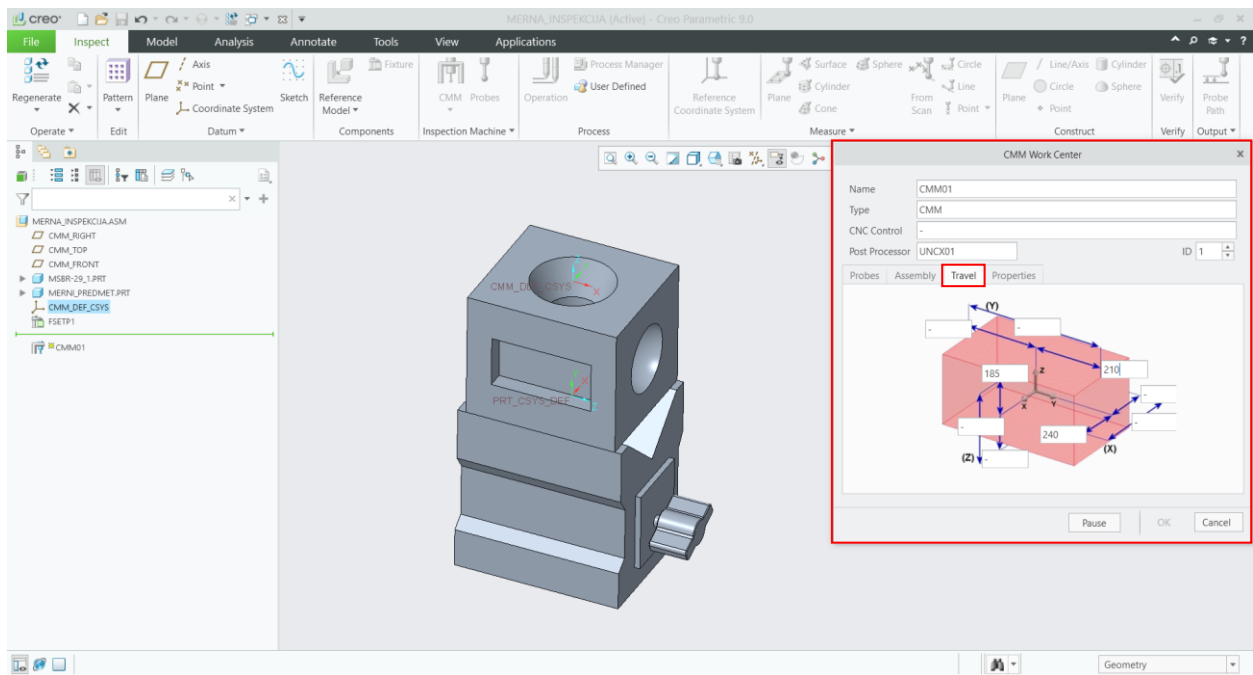
Слика 25. Приказ изабраних углова ротације и оријентације за виртуелну мерну инспекцију

Следећи корак је дефинисање мерне машине и њеног координатног система. Одабиром опције „Assembly“, слика 26, отвара се прозор за дефинисање и одабир склопа мерне машине која ће учествовати у процесу виртуелне мерне инспекције.



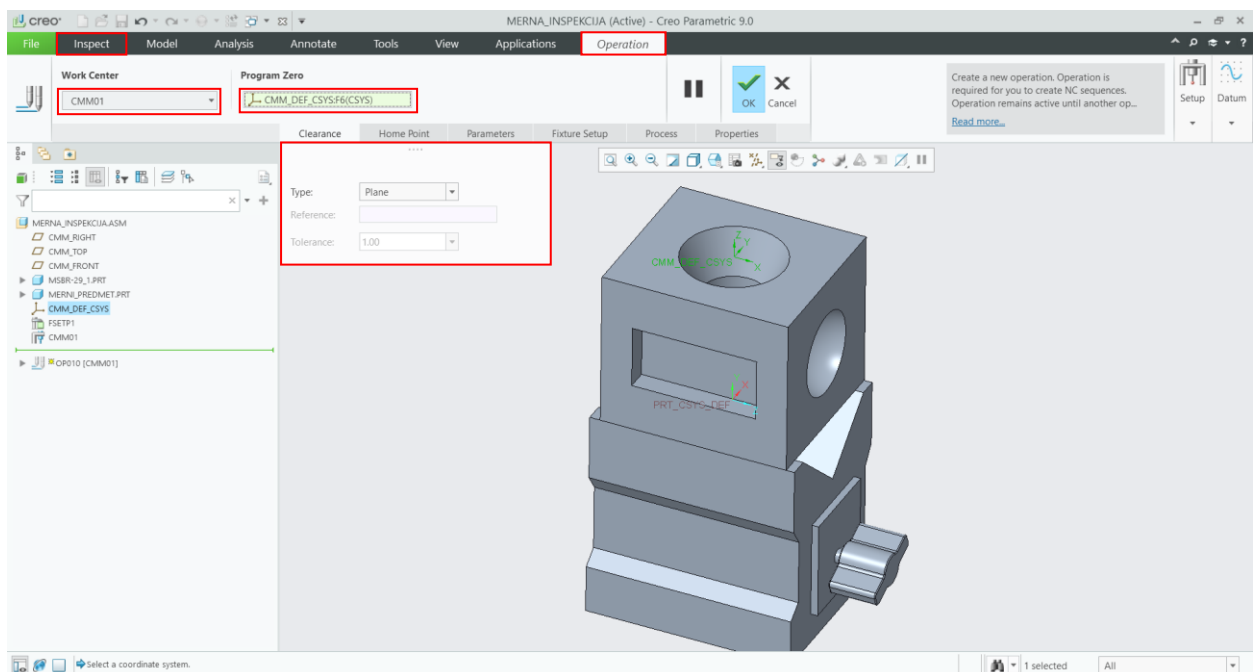
Слика 26. Приказ прозора за дефинисање мерне машине, „Assembly“

На слици 27, приказана је још једна функција у оквиру прозора „CMM Work Center“ коју је потребно дефинисати, а то је „Travel“. Поменути функција служи да се одреде границе радног простора виртуелне мерне инспекције.



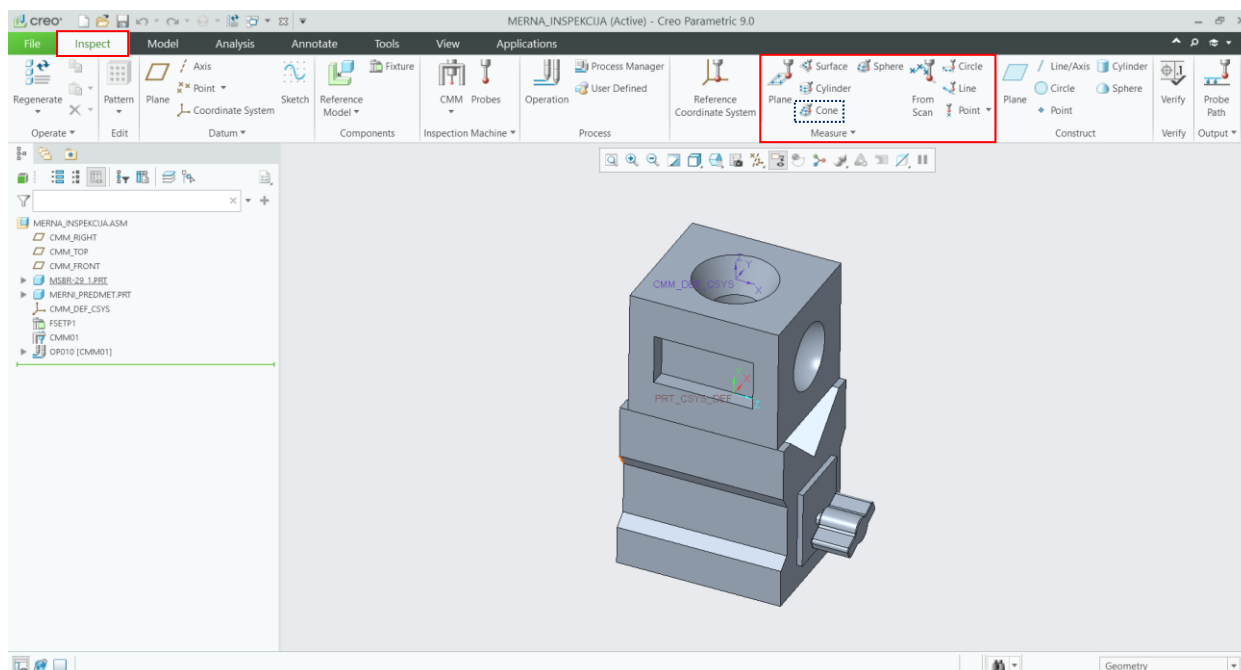
Слика 27. Приказ дефинисања граница радног простора, „Travel“

Након дефинисања „CMM Work Center“ прелази се на функцију „Operation“, која служи за креирање нове операције. Овом командом се врши одабир координатног система виртуелне мерне машине. Команда „Operation“ се налази у оквиру прозора „Inspect“ и приказана је на слици 28.



Слика 28. Приказ наредбе „Operation“ у оквиру прозора „Inspect“

Следећи корак за успостављање симулације мерне инспекције је дефинисање плана инспекције помоћу наредбе „Measure Step“ која се налази у оквиру прозора „Inspect“, приказ је дат на слици 29.



Слика 29. Команда „Measure Step“ у оквиру прозора „Inspect“ за одабир толеранција које учествују у инспекцији

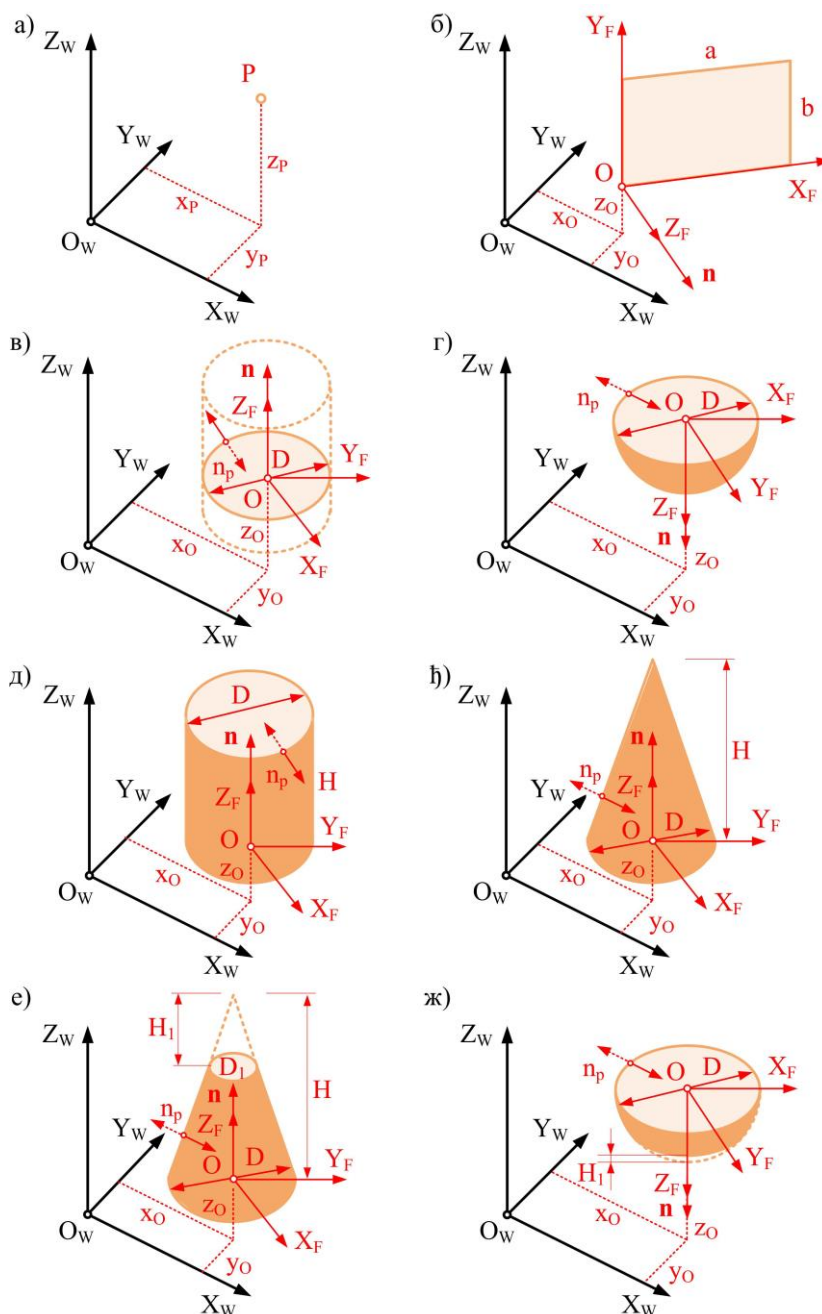
Дефинисање процеса симулације мерне инспекције у овом раду ће бити имплементиран на испитивању толеранције концентричности, која ће бити детаљно описана. Поступак подешавања инспекције концентричности почиње активирањем команде „Cone“.

Након одабира поменуте команде отвара се прозор за одабир мерне сонде, односно једне од конфигурација које су дефинисане у оквиру „CMM Work Center“. Конфигурације мерне сонде се могу и накнадно редефинисати помоћу функције „Probes“, али је кључно да се приликом дефинисања операције изабере одговарајућа конфигурација за вршење мерне инспекције. Потребно је нагласити да се за једну операцију у Creo Parametric софтверу, користи једна конструкција мерне сонде. Прецизније речено, сви „захвати“ који се креирају у оквиру једне операције су директно везани за један дефинисани тип мерног сензора (углове „roll angle“ и „pitch angle“).

Пре него што буде детаљно описан наредни прозор који се отвара за одређивање концентричности на мерном делу, биће направљена једна кратка теоријска дигресија.

Мерења на координатним мерним системима се значајно разликују од мерења употребом конвенционалних мерила (нпр. кљунасто помично мерило, микрометар, итд.). Конвенционална мерила, код којих се поштује Abbe-ов принцип тј. да се радни предмет налази у продужетку мерне скале, одређују растојање између две суседне тачке и на тај начин се добија мерни резултат. Координатна метрологија, преко одређеног типа мерног сензора, узоркује тачке са мерног предмета и излаз из мерења је скуп координата тачака у виду записа x_i, y_i, z_i . Узорковане тачке се групишу у зависности ком основном геометријском примитиву припадају. Када се посматра номинална геометрија радног предмета (CAD модел) може се уочити да је она углавном садржана од основних геометријских

елемената (тачка, права, раван, круг, цилиндар, итд...), *слика 30*. Геометријски примитив може бити класификован као идеални или неидеални у односу у ком је контексту. Идеални геометријски примитив се односи на номинални модел док неидеални геометријски примитиви се односе на скин модел и реални радни предмет. Геометријски примитиви су најједноставнији елементи потребни за потпуно дефинисање било које геометрије радног предмета и именовани су по врсти којој припадају.



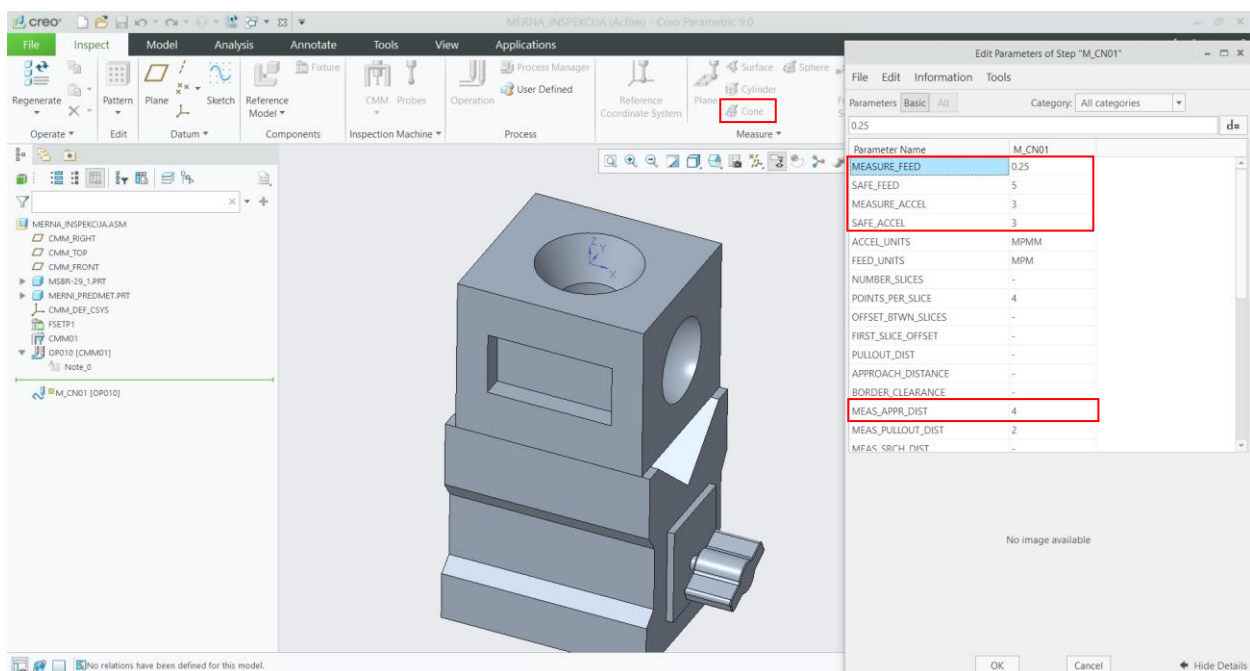
Слика 30. Базни геометријски примитиви и њихови параметри: а) тачка; б) раван; в) круг; г) полусфера; д) цилиндар; њ) купа; е) зарубљена купа; ж) зарубљена полусфера

Минималан број тачака потребан за дефинисање основних геометријских примитива приказана је у *табели 2*.

Геометријски примитив	Минималан број тачака
тачка	1
линија	2
раван	3
круг	3
цилиндар	5
конус	6
сфера	4
торус	7
елипса	5

Табела 2. Минималан број тачака за дефинисање основних геометријских примитива

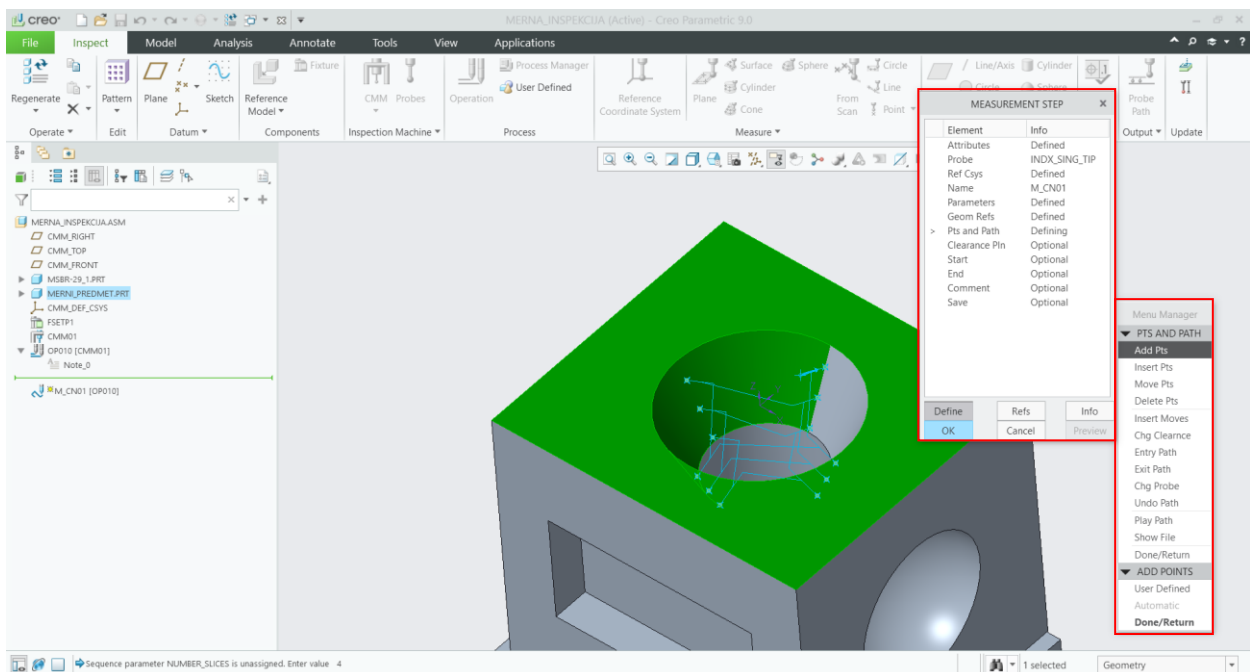
У новоотвореном прозору потребно је подесити брзине и убрзања мерних (*measure*) и помоћних (*safe*) кретања, растојања примицања и одмицања при мерном и помоћном кретању, приказ на слици 31.



Слика 31. Приказ дефинисања брзине, убрзања и растојања за испитивање концентричности

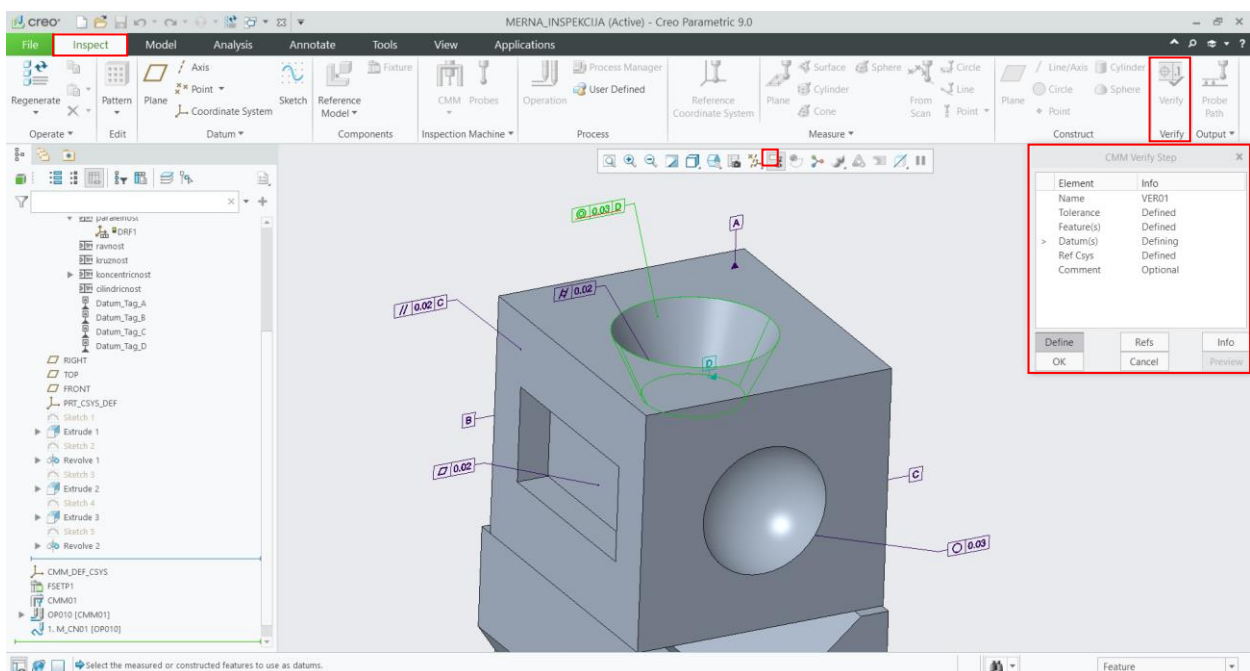
У прозору са слике 32, потребно је извршити избор „Geom Refs“, тј. означити површину која се мери. За мерење користи се „Probes“, који се налази на позицији 1 и који је дефинисан у неком од претходних корака. Коришћењем опције „Ptc and Path“ дефинише се број и распоред контролних тачака. Могуће је користити произвољно или аутоматски одабране тачке. За потребе овог рада је у већини случајева био коришћен аутоматски избора броја и редоследа тачака. На

слици 32 се такође види трајекторија коју програм генерише након избора броја и распореда тачака мерне инспекције.



Слика 32. Приказ дефинисања трајекторије, броја и редоследа тачака при мерној инспекцији

На слици 33, биће приказано дефинисање процеса верификације због кога је било неопходно да се на 3D модел мерног дела унесу све толеранције које се налазе на техничком цртежу.



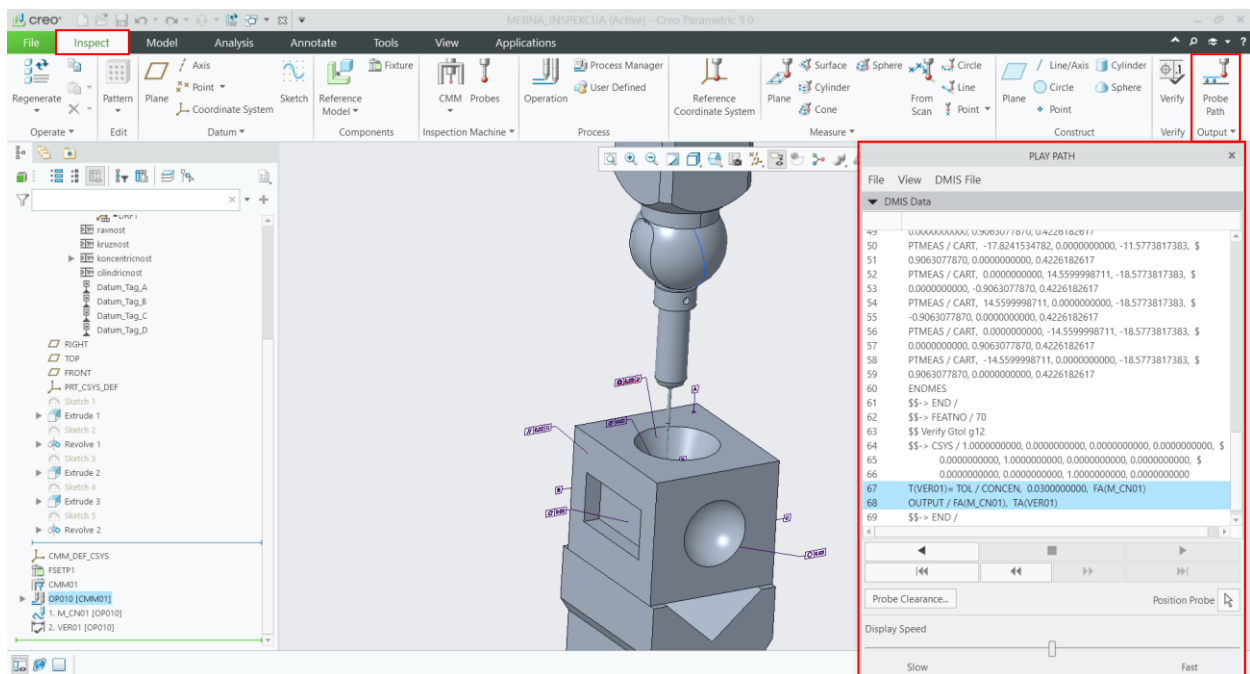
Слика 33. Приказ функције „Verify“ у оквиру прозора „Inspect“

На почетку је потребно селектовати опцију „Verify“, након чега се отвара прозор „CMM Verify Step“. Након тога се селекује жељена толеранција на моделу

и опцијама „Tolerance“, „Feature(s)“, „Datum(s)“, се дефинише процес верификације мерне инспекције. Због прегледности рада у софтверу препоручује се да толеранције буду искључене и да се упале опцијом „Annotation Display“ када је то потребно.

Као што је већ приказано у раду, потврда верификације се може видети у последњим линијама DMIS кода. Предност је што програмер виртуелне инспекције може да прати која толеранција се испитује, *слика 21*.

За визуелизацију и верификацију дефинисане операције, односно конкретног „захвата“, потребно је селектовати опцију „Probe Path“ у оквиру „Inspect“ прозора, *слика 34*. Процес виртуелне мерне инспекције је идентичан за све толеранције задате техничким цртежом, уз промену карактеристичне мерне површине која се испитује. Након завршетка симулације свих толеранција потребно је генерисати DMIS (.ncl) код, који представља коначни излаз из симулације.



Слика 34. Приказ извршене операције и опције „Probe Path“

4.2. Модификација мерног сензора у случају колизије

За потребе израде овог рада, односно креирања конзистентне виртуелне мерне инспекције било је неопходно извршити корекције на склопу мерног сензора. У наставку ће бити описана процедура модификовања мерне сонде у оквиру софтверског пакета PTC Creo Parametric.

Компјутерска симулација мерне инспекције у поменутом програму се изводи пре свега како бисмо имали реалан приказ кретања мерне сонде и отклонили сваку могућност колизије између мерне сонде и радног комада/помоћног прибора за стезање/радног стола машине.

Када је реч о колизији потребно је проћи кроз одређене кораке како би се она спречила. Већ поменут у оквиру претходног потпоглавља, први корак је плански и прецизно одредити углове ротације (*roll angle*) и оријентације (*pitch angle*), слика 25. CMM модул: Inspection Machine → Probes → File → Default Probes → *indx sing tip* → *indx sing tip.asm*.

Такође поменут, други корак је везан за групацију „захвата“ у оквиру једне операције мерне инспекције, а да се она врши са једним типом параметара мерне сонде. Односно, једна операција се извршава са једним типом сонде, а у оквиру те операције се креирају сви „захвати“ којима одговара коришћена мерна сонда.

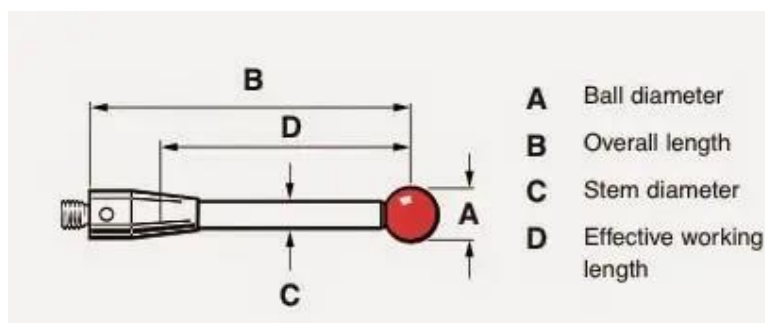
Уколико ова два корака нису делотворна у процесу избегавања колизије, потребно је приступити процедури модификације мерне сонде, односно промена димензија мерног стабла пипка (енг. *CMM Stylus*). У наредном тексту ће бити детаљно приказан цео процес.

Пре свега потребно је отворити мерну сонду која се налази у оквиру *toolbox*-а PTC Creo Parametric-а, као независан склоп. На слици 6 је дат приказ како доћи до ње, уз напомену да је потребно тражити на оном диску (C:, D:, E:) на коме је извршена инсталација самог софтвера.

У конкретном случају: File → Open → C:\Program Files\PTC\Creo 9.0.1.0\Common Files\text\probes\indx sing tip\indx sing tip.asm.

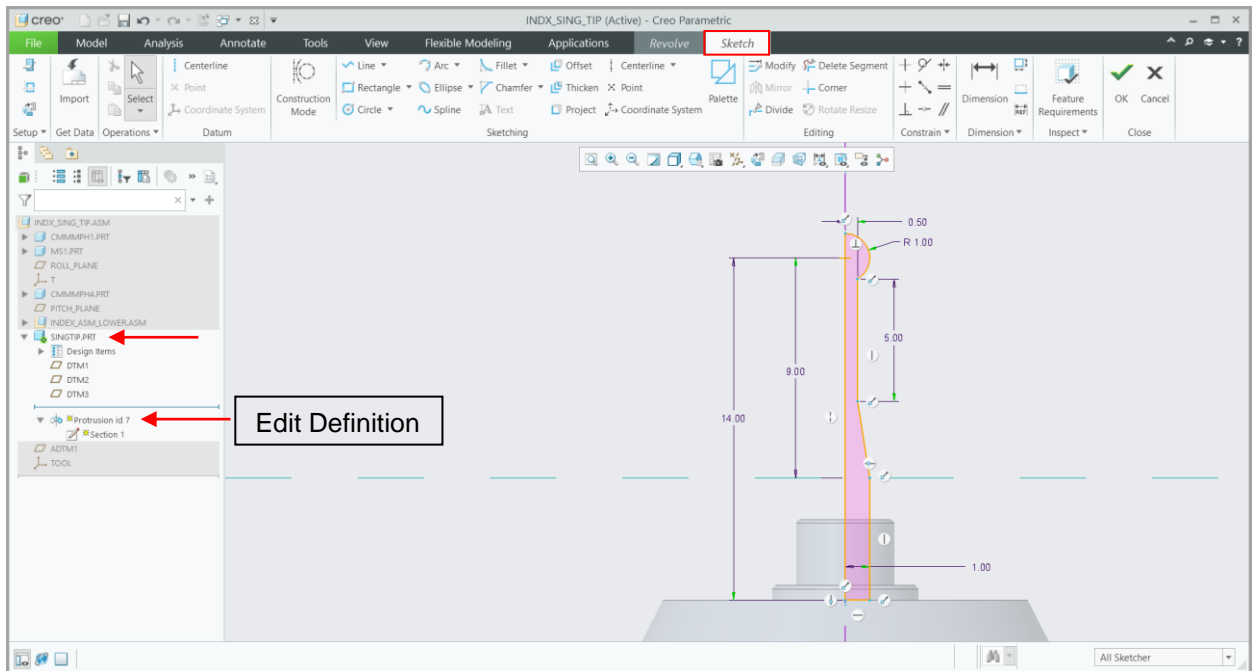
На слици 7 је дат приказ отвореног модела склопа мерне сонде који нам нуди PTC Creo Parametric софтвер. Како овај склоп не задовољава у потпуности потребе симулације за радни комад који је дефинисан у пројекту, потребно је извршити мале корекције.

Уколико желите да модел мерног пипка буде у складу са одређеним стандардима, односно, каталозима које нуде различите компаније за производњу мерне опреме, можете посетити (<http://www.kurokicorp.com/stylus-for-cmm/>) или било који сајт који нуди овакве информације. При димензионом дефинисању мерног пипка, четири параметра играју кључну улогу (слика 35), поред одабира материјала за израду.



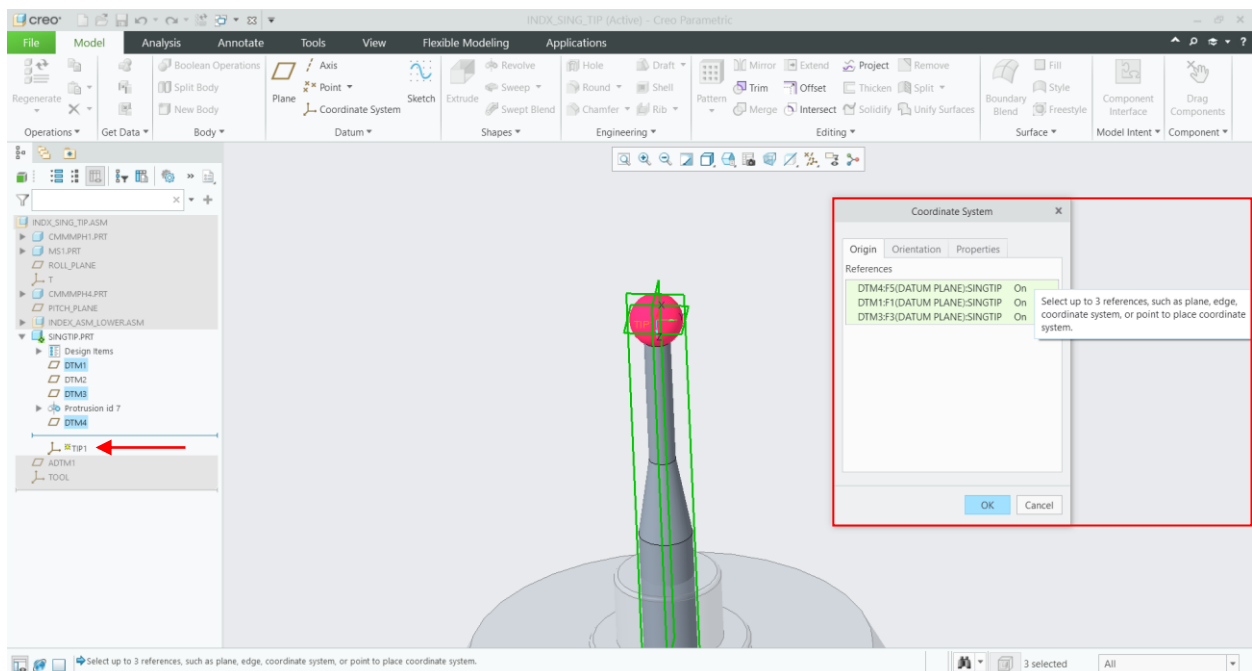
Слика 35. Димензиони параметри при дефинисању и одабиру мерног пипка

На слици 36 је дат приказ како се долази до *Sketch* опције у којој се могу мењати димензије мерног стабла и сферног завршетка мерног пипка. Овде је потребно нагласити да у случају компјутерске симулације и промене поменутих димензија имате слободу за креирање новог мерног пипка, а све у циљу несметаног извршења мерне инспекције за дефинисани мерни предмет.

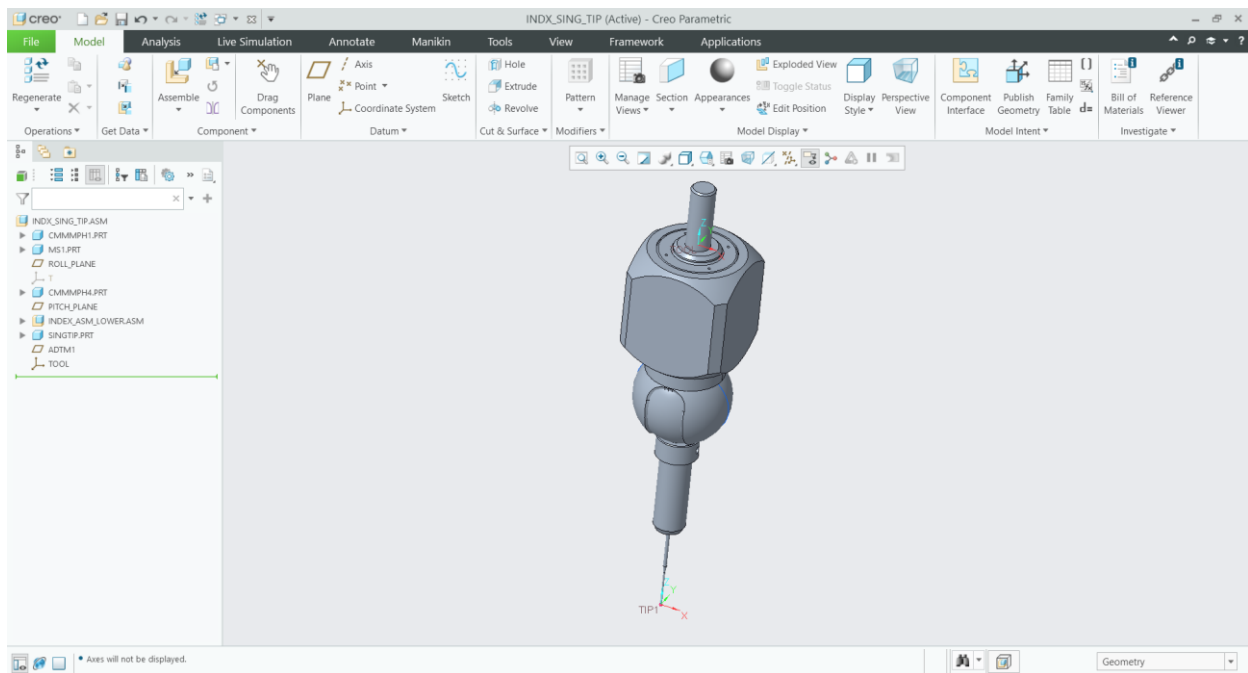


Слика 36. Приказ потребних команди у склопу мерне сонде како би дошло до измена димензије мерног стабла и сферног завршетка мерног пипка

Последњи корак у модификацији мерног пипка, али веома важан је транслација координатног система сферног завршетка мерне сонде, слика 37. Виртуелна мерна инспекција је принципијелно идентична реалној, што значи да се у односу на координатни систем сферног завршетка одређују положај центра мерног пипка и израчунавање ефективног пречника мерног пипка. Након извршених димензионих измена, потребно је координатни систем сфере (*TIP1*) вратити у новоформирану централну мерног завршетка, слика 38.



Слика 37. Транслација координатног система сферног мерног завршетка



Слика 38. Приказ склопа модификоване мерне главе са ротирајућим зглобом, преузете из софтвера PTC Creo Parametric

4.3. Дефинисање координатних система и везе између њих

Након дефинисања кинематских веза транслаторних подсистема виртуелне мерне машине и свих поменутих корака, финални део за креирање целокупне мерне инспекције је успостављање веза између координатних система мерног предмета, мерне сонде и мерне машине [5].

Да би се обезбедило правилно поравнање и интеракција између различитих компоненти, дефинисани су координатни системи *MACH_ZERO* на радном столу, док је *TOOL_POINT* дефинисан на глави сензора, чија оса је дефинисана са истим смером и оријентацијом као и оса координатног система на радном комаду. Ови координатни системи служе као референтне тачке за позиционирање и поравнање, слика 39.

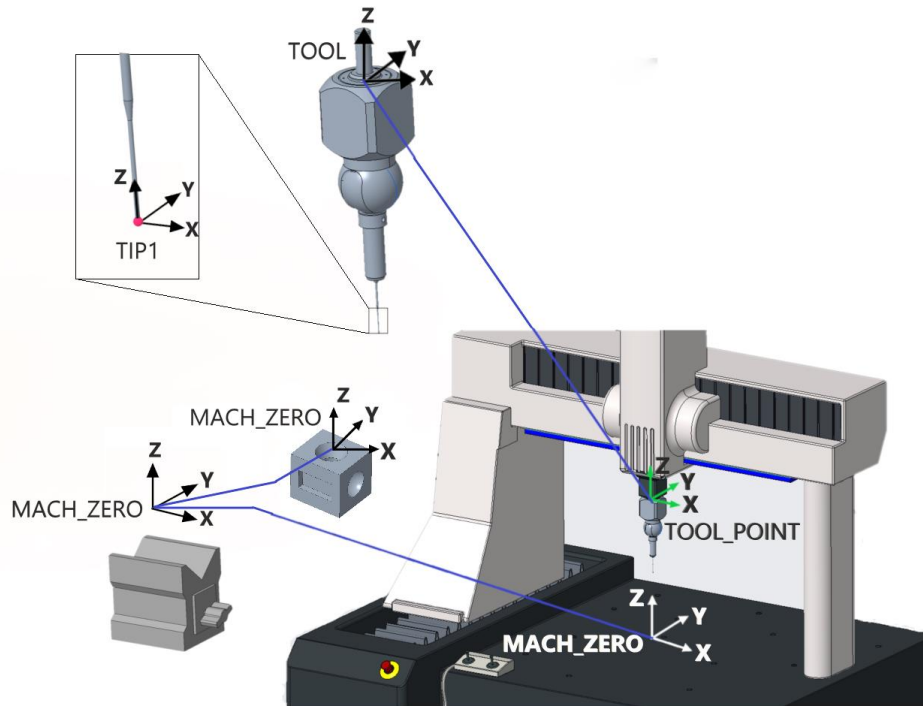
По истом принципу, координатни системи *MACH_ZERO* су дефинисани на мерном предмету и помоћном (стежном) прибору да би тачно представили њихове позиције у виртуелном окружењу. Ови координатни системи успостављају референтни оквир за радни предмет и прибор, омогућавајући тачно поравнање и позиционирање током симулације.

На мерној сонди је дефинисан координатни систем под називом *TOOL*. Овај координатни систем одговара поравнању са *TOOL_POINT* на машини.

Осим тога, користи се координатни систем познат као *TIP1*, који се налази у центру сфере мерног сензора и описан је у оквиру претходног потпоглавља. Овај координатни систем игра кључну улогу у генерисању путање мерења. Тачним усклађивањем одговарајућих координатних система, мерни предмет, стезни

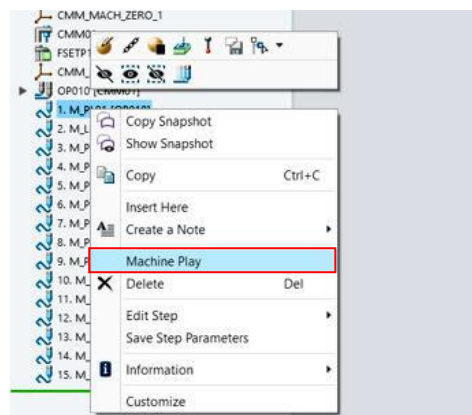
прибор и мерна сонда могу бити тачно позиционирани и поравнати у виртуелном окружењу.

Ово координисано поравнање и веза између различитих координатних система у *CAD/CAM* систему које омогућава PTC Creo, осигурава да виртуелне компоненте тачно представљају адекватне реплике физичког система. Омогућава реалистичну симулацију и анализу процеса мерења.



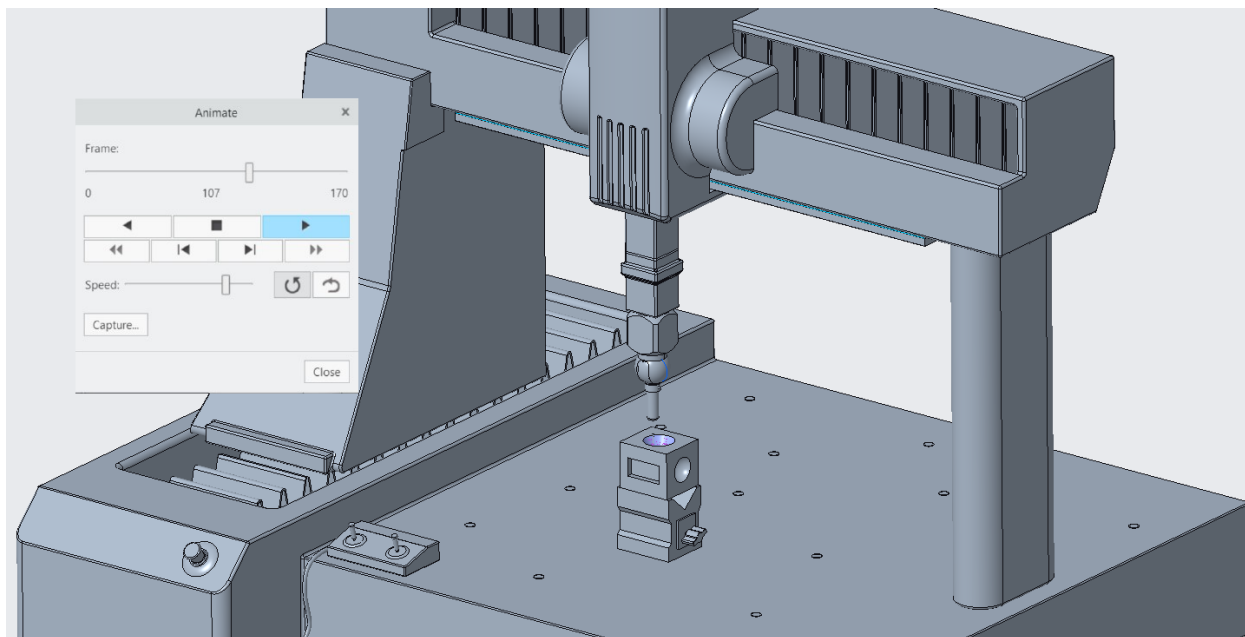
Слика 39. Везе између координатних система

За потребе симулације, цео склоп виртуелне нумерички управљане мерне машине, укључујући све компоненте ће бити имплементиран да би се обезбедио свеобухватан и реалистичан процес. То значи да се користи опција *Machine Play*, омогућавајући симулацију кретања и интеракције машине, на основу претходно дефинисаних кинематичких веза, слика 40.

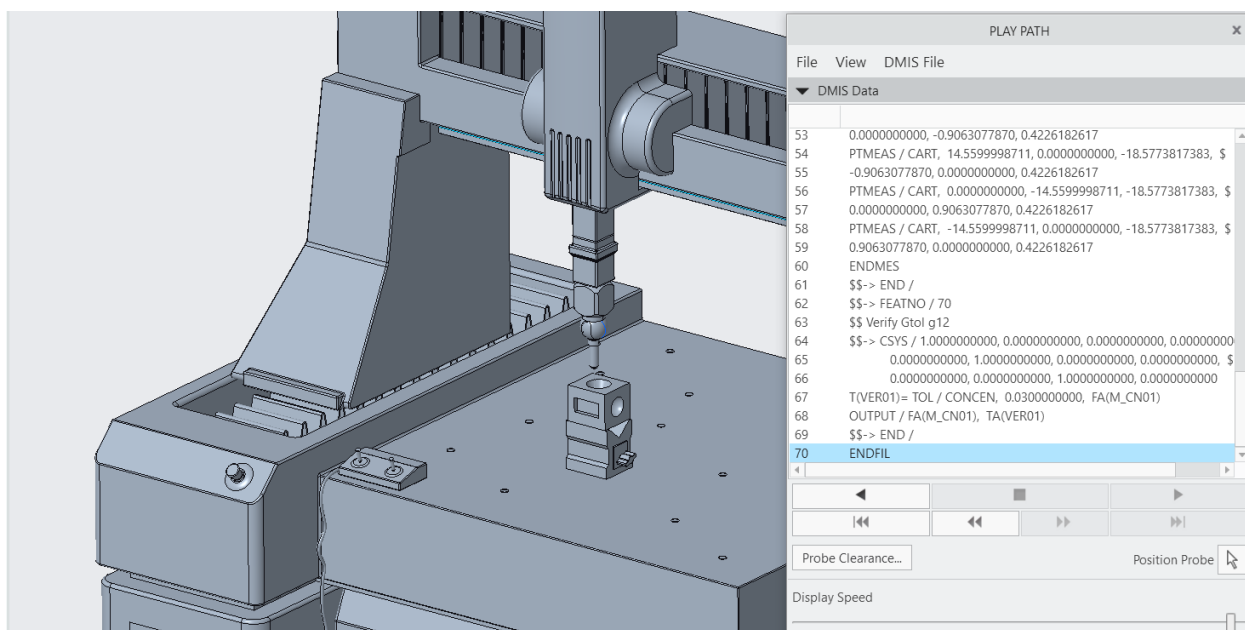


Слика 40. Имплементација виртуелне мерне машине у процес инспекције помоћу опције „Machine Play“

На самом крају дат је приказ комплетног мерног система током виртуелне инспекције, *слика 41*, као и симулација мерне путање на виртуелној нумерички управљаној мерној машини, *слика 42*.



Слика 41. Приказ комплетног мерног система током виртуелне инспекције



Слика 42. Симулација мерне путање на виртуелној нумерички управљаној мерној машини

5. Литература

[1] Vidoje Kasalica, Slavenko Stojadinović, Srđan Živković, Jedan pristup razvoju digitalnog mernog blizanca na bazi numerički upravljane merne mašine, Tehnika, Dec, 2022, DOI: 10.5937/tehnika2206707K

[2] Видоје Касалица, Мастер рад, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2022.

[3] Миладин Марјановић, Мастер рад, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2023.

[4] Vidoje Kasalica, Slavenko Stojadinović; DATA INTEROPERABILITY IN COMMUNICATION BETWEEN REAL AND DIGITAL MEASURING TWIN; 39.Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije, Novi Sad, Serbia (26. – 27. October 2023).

[5] Vidoje Kasalica, Saša Živanović, Slavenko Stojadinović; SIMULATION OF MEASUREMENT ON CMM BY IMPLEMENTING A DIGITAL TWIN MODEL; XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE MMA 2024; Novi Sad, Serbia (September 24-26, 2024).