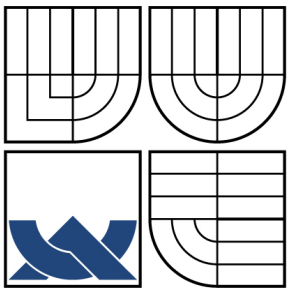
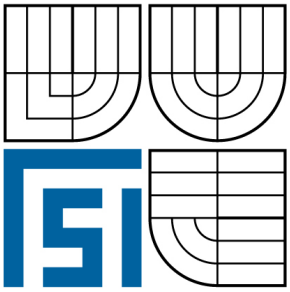


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ KINEMATICKÝCH BODŮ ZAVĚŠENÍ VOZIDEL S VYUŽITÍM MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ TRITOP

SUSPENSION KINEMATICS POINTS MEASUREMENT WITH USE OF MEASUREMENT DEVICE TRITOP

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. RADOSLAV FIŠER
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. ONDŘEJ BLAŤÁK
SUPERVISOR

BRNO 2008

Abstrakt:

Bc. Radoslav Fišer
Měření kinematických bodů zavěšení vozidel s využitím měřícího zařízení Tritop
DP, UADI, 2008, str. 58, obr. 45

Porovnáváme metody získávání vstupních dat pro počítačové programy simulující kinematické a dynamické vlastnosti zavěšení náprav vozidel. Pro měření využíváme optická digitalizační zařízení pracující ve trojrozměrných souřadnicích Tritop a Atos. Opakovaným měřením zjišťujeme přesnost metod, časovou náročnost a vhodnost pro měření podvozků vozidel. Navrhujeme přípravky pro měření kinematických bodů zavěšení pro využití při měření zařízením Tritop.

Klíčová slova: kinematické body zavěšení vozidel, měření podvozků vozidel, Tritop, Atos

Abstract:

Bc. Radoslav Fišer
Suspension Kinematics Points Measurement with Use of Measurement Device Tritop
MT, IAE, 2008, sites 58, pictures 45

We compare methods of obtaining input data for sotwares simulating kinematic and dynamic characretistics of vehicle suspension. Digitizing system working with three dimensional coordinates Tritop and Atos is used for measurement. With repeated measuring we investigate accuracy, time hefftines and suitability of methods for car suspension mesurement. Special pointings were developed to use with Tritop device measurement.

Keywords: Suspension kinematics points, vehicle suspension measurement, Tritop, Atos

Bibliografická citace:
FIŠER, R. *Měření kinematických bodů zavěšení vozidel s využitím měřícího zařízení Tritop.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Ondřeje Blaťáka a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 21. května 2008 Bc. Radoslav FIŠER

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřeji Blaťákovi,
Dále chci poděkovat svým rodičům za trpělivost a podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

Obsah **8**

1. Úvod **10**

2. Způsoby měření kinematických úchytů náprav **10**

2.1 MECHANICKÉ MĚŘENÍ MĚŘIDLY 10
2.2 ZJIŠTĚNÍ KINEMATICKÝCH BODŮ ZAVĚŠENÍ Z CAD SOUBORŮ, NEBO Z VÝKRESU 10
2.3 MĚŘENÍ 3D DIGITALIZAČNÍMI ZAŘÍZENÍMI 10
2.3.1 Měření pomocí optických 3D digitalizačních zařízení 10
2.3.2 Měření pomocí 3D digitalizačních dotykových zařízení 11

3. 3D digitalizace **11**

3.1 3D DIGITALIZAČNÍ ZAŘÍZENÍ 11
3.1.1 Optická 3D digitalizační zařízení 12
3.1.2 Laserová 3D digitalizační zařízení 17
3.1.3 Dotyková 3D digitalizační zařízení 18
3.1.4 Destruktivní 3D skenery 22
3.1.5 Rentgenové 3D digitalizační zařízení 23
3.1.6 Ultrazvukové 3D skenery 23

4. Použitá optická měřící zařízení **24**

4.1 ATOS I 24
4.1.1 Hardware a software 24
4.1.2 Základní pravidla pro práci s ATOSEM 24
4.2 TRITOP 25
4.2.1 Hardware a software 25
4.2.2 Základní pravidla pro práci s TRITOPEM 25
4.2.3 Pohyb fotoaparátu při měření 3D objektu 26
4.2.4 Výběr měřících bodů a umístění kalibračních tyčí 27

5. Měření lichoběžníkové nápravy nekapotovaného vozu formule Ford 1600 ..... **27**

5.1 METODY PŘÍMÉHO MĚŘENÍ ÚCHYTŮ LICHOBĚŽNÍKOVÉ NÁPRAVY FORMULE FORD 27
5.1.1 Metoda s kulovými tělesy pomocí zařízení Tritop 28
5.1.2 Metoda s vloženým válcovým tělesem pomocí systému Atos 28
5.1.3 Metoda s vektorovým identifikačním terčem 30
5.1.4 Metoda s násuvnými body 30
5.2 METODY NEPŘÍMÉHO MĚŘENÍ ÚCHYTŮ LICHOBĚŽNÍKOVÉ NÁPRAVY FORMULE FORD 31
5.2.1 Metoda odkývání ramene lichoběžníkové nápravy uchyceného v jednom úchytu 31
5.2.2 Odkývání při uchycení ramene ve dvou úchytech 33
5.2.3 Metoda s kulovými tělesy – volně ložená součást zavěšení 35
5.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ POUŽITÝCH METOD 35
5.3.1 Metoda odkývání ramene lichoběžníkové nápravy uchyceného v jednom úchytu v porovnání s metodou měření úchytů s kulovými tělesy 35
5.3.2 Porovnání metody odkývání – středy úchytů zjištěné pomocí primitiv, pomocí vypočtených středů a srovnání s metodou s kulovými tělesy 36
5.3.3 Porovnání metody s kulovými tělesy při měření úchytů na rámu a středů úchytů zjištěných pomocí metody vloženého volného ramene 38
5.3.4 Porovnání vložení volného ramene do jiného projektu a středů úchytů zjištěných pomocí systému Atos 39
5.3.5 Porovnání přímých metod měření úchytů na rámu 40
5.3.6 Porovnání metody odkývání při uchycení ve dvou bodech 41
5.3.7 Metoda vložení volného ramene 43

6. Měření kinematických úchytů nápravy McPherson **45**

6.1 MĚŘENÍ OPTICKÝMI ZAŘÍZENÍMI TRITOP A ATOS 45
6.1.1. Přímé měření úchytů na karoserii 45
6.1.2. Nepřímé měření kinematických bodů zavěšení 46
6.2 METODA GEOMETRICKÁ IDENTIFIKACE AUTOMOBILOVÉHO ZAVĚŠENÍ ZALOŽENÁ NA ANALÝZE POHYBU SOUČÁSTÍ – PŘEKLAD[5] 47
6.2.1 Zjišťování pohybu součástí 47
6.2.2 Identifikace pozice a orientace kloubu 49
6.2.3 Numerické ověření 53

7. Závěr 55

Seznam použitých symbolů a zkratek: 56

Seznam použité literatury: 57

Seznam příloh: 58

1. Úvod

V dnešní době je čím dál více využíváno počítačových programů pro simulaci kinematických a dynamických vlastností podvozků vozidel. Simulace jsou nutné pro optimalizaci jízdních vlastností vozidel. Softwary využívají matematických modelů částí zavěšení kol pro kalkulaci jejich vzájemných interakcí. Používají se například multi-body systémy jako je Adams/Wiew, RecurDyn, MBSoft, SPACAR a jiné. Z těchto důvodů je třeba získávat vstupní data pro tyto programy. Údaje lze získávat z výkresové dokumentace nebo z CAD modelů. Informace tohoto druhu bohužel žádný z výrobců neposkytuje. Je to firemní duševní vlastnictví, které si podniky chrání. Na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství byly během několika let vyvinuty různé metody získávání vstupních hodnot do těchto programů. Vstupními hodnotami jsou souřadnice středů úchytů prvků náprav, jako jsou ramena, nebo také souřadnice středů kloubů. Polohy bodů je nutné získávat vůči souřadnému systému karoserie, nebo rámu. To lze s dostatečnou přesností zajistit pouze zařízeními měřícími souřadnice bodů v prostoru. K tomu používáme fotogrammetrické zařízení Tritop, také lze využít optický systém Atos. Naším úkolem je vypracovat metodiku postupu měření výše zmíněnými systémy s důrazem na přesnost a nízkou časovou náročnost měření. Pomocí opakovaných měření vytvořené metody porovnat a určit vhodnost pro měření kinematických bodů zavěšení. Navrhnout přípravky pro měření bodů zavěšení systémem Tritop.

2. Způsoby měření kinematických úchytů náprav

2.1 Mechanické měření měřidly

Měření je prováděno za pomoci běžných měřidel jako jsou posuvná měřítka, pomocné přípravky na měření kulových ložisek uchycení ramen. U měření tímto způsobem se v některých případech musíme spoléhat na odhad z důvodu nemožného přístupu k přesné pozici kinematického bodu zavěšení. Je problematické uvedeným způsobem měřit hodnoty souřadnic bodů zavěšení vůči zvolenému souřadnému systému karoserie nebo rámu vozidla.

2.2 Zjištění kinematických bodů zavěšení z CAD souborů, nebo z výkresu

Kinematické body zavěšení lze zjistit i za pomoci výkresové dokumentace rámu nebo karoserie. Také můžeme s úspěchem použít model rámu či karoserie z nějakého 3D modelovacího programu a z tohoto zjistit polohu kinematických bodů. Pravdou je, že tyto body nemusí odpovídat skutečně vyrobenému rámu nebo karoserii. Budou vždy mít nějakou odchylku od skutečnosti. Proto musí být skutečný rám či karoserie měřena například 3D digitalizačními zařízeními, abychom zjistily reálné rozměry uchycení. Výkresovou dokumentaci, nebo 3D modely karoserie je velmi obtížné získat. Výrobci běžných osobních vozidel takovéto informace neposkytují.

2.3 Měření 3D digitalizačními zařízeními

2.3.1 Měření pomocí optických 3D digitalizačních zařízení

Tato práce se zabývá převážně měřením pomocí optických 3D digitalizačních zařízení. Důvodem k použití je už jen přítomnost těchto zařízení na ústavu automobilního a dopravního inženýrství a také ústavem vyvinuté metody, které je nutno porovnat a vyhodnotit. Za pomocí těchto zařízení měříme fotogrammetrické body umístěné na měřeném předmětu, nebo pomocná 3D tělesa rovněž umístěná na měřeném objektu. Funkce optických 3D skenovacích

zařízení je popsána v kapitole 3.1.1 Dále měřené projekty zpracováváme v programovém rozhraní dodávaném k zařízením a využitím pomocných geometrických útvarů získáváme polohu kinematických úchytů zavěšení.

2.3.2 Měření pomocí 3D digitalizačních dotykových zařízení

Těmito měřidly měříme souřadnice pomocných bodů na zavěšení. Přímo změřit polohu kinematických úchytů zavěšení nelze z důvodu nemožného přístupu. Malými přenosnými sondami některá nedostupná místa změřit lze, ale mají nevýhodu v rozsahu měření omezenou na malou oblast měřeného předmětu. Proto je třeba pomocných bodů s jejichž pomocí se přemisťujeme do dalších částí objektu, ale tím si do měření zanášíme další nepřesnosti. Velké průmyslové dotykové systémy jsou značně nákladné a investovaná částka se vyplácí až při velké sériovosti výroby,nebo tam kde je nutná velmi vysoká přesnost součástí. Měřidla jsou vysoce přesná – až 0,5 mikrometru. Malé přenosné dotykové zařízení lze s úspěchem použít pro výpočtovou metodu analýzy pohybu mechanismu zavěšení. Celá metoda je popsána v kapitole 5.

3. 3D digitalizace

Díky technologii nazývané 3D digitalizace se dá převést 3-rozměrný reálný objekt do digitální podoby. Zařízení, která nám tento převod umožní se nazývají 3D skenery. Skenery se od sebe liší hlavně tím, jakým způsobem dochází ke snímání bodů povrchu objektu. Podle způsobu snímání bodů je lze rozdělit na:

- optické
- dotykové
- laserové
- destruktivní
- rentgenové
- ultrazvukové

3.1 3D digitalizační zařízení

Přenos skutečných tvarů do virtuálních 3D modelů se dotýká čím dál širšího počtu konstruktérů, ruku v ruce s větší dostupností skenovacích technologií. Jednou z největších výhod 3D skenování je rychlé získání skutečně trojrozměrného modelu.
3D digitalizační zařízení jsou také hojně využívána pro zpětné inženýrství, což je způsob pro porovnání hotového výrobku s navrženým 3D modelem. Nebo také k získání modelů a následně výkresů součástí ke kterým dokumentace neexistuje, nebo ji není možné získat.
Přímé využití naskenovaných dat v konstrukčních programech pak přibližuje dotykové i optické skenování i do oblastí klasického strojírenství. Metody snímání se s úspěchem využívají všude tam, kde je třeba reprodukovat komplexní až organicky tvarované plochy.

- Model vzniklý snímáním se pak dá přímo použít pro výrobu například pomocí steleolitografie, rychlá výroba prototypů nebo klasického CNC obrábění
- Nasnímaný mrak bodů lze využít pro účely měření

3.1.1 Optická 3D digitalizační zařízení

ATOS

je mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM určený pro nejrůznější aplikace. Jeho vysoká výkonnost, velké rozlišení a široká flexibilita měřicích objemů umožňuje přesnou a efektivní kontrolu kvality výroby a ukládání optimalizovaných dat z design aplikací. Nejširší využití systému ATOS je v oblastech CAD, CAM a FEM kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem. Všechny systémy ATOS mohou být doplněny o počítačem řízený rotační stůl což je vhodné pro opakovaná měření stejných dílů. V případě požadavku plné automatizace měření je k dispozici počítačem řízený průmyslový robot.

Obr. 1 Atos[6]

Proces měření

- rychlé měření s vysokou hustotou dat (velká rozlišitelnost detailů)
- hustota dat je daná použitým zařízením a pohybuje se v rozmezí od 800 000 až do 4 000 000 bodů na 1 záběr
- proces měření je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrii a fringe projection
- na povrch objektu jsou promítány pruhy světla, které jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem
- software z těchto záběrů vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů
- automatické složení jednotlivých záběrů do jednoho celku je zajištěno pomocí referenčních značek umístěných na objektu nebo mimo něj
- kamery musí zabírat minimálně tři referenční značky aby správně došlo ke spojení snímků měření, pokud kamery zabírají více značek je měření přesnější
- za účelem naskenování celého objektu lze pohybovat skenerem i měřeným objektem

Výstupy z digitalizace

- optimalizovaná polygonální síť (STL)
- mrak bodů
- řezy (body)
- obrysové a kontrastní křivky (body)
- barevná mapy odchylek od CAD modelu (obrázky)
- protokol měření (HTML, Word, PDF)

Oblasti využití digitalizovaných dat

- kontrola kvality

- reverzní inženýrství
- rychlá výroba prototypů
- virtuální realita
- přímé obrábění
- simulace vstřikování plastů
- simulace tažení plechu
- kontrola kolizí dílu

Základní rozdělení systémů ATOS

ATOS I je určený pro základní aplikace nevyžadující příliš vysokou přesnost a kvalitu výstupních dat. Rozlišení CCD čipu je v tomto případě 800 000bodů na 1 záběr. Maximální měřicí rozsah je 1000x800mm při rozlišení 1bod na 1mm.

ATOS II má oproti systému ATOS I vyšší rozlišení CCD čipu (1 400 000bodů na 1 záběr), přesnější projekční jednotku, laserové odměřování vzdálenosti skeneru od objektu a robustnější design. Maximální měřicí objem je 2000x16000mm. ATOS II má široký rozsah využití i v náročných aplikacích.

ATOS IIe je systém s vlastnostmi systému ATOS II, ale s výkonným zdrojem světla ze systému ATOS III.

ATOS III je nejvyšším systémem s rozlišením CCD čipu 4 000 000 bodů na 1 záběr. Oproti systému ATOS II má kvalitnější optické prvky a výkonnější zdroj světla. Maximální měřicí objem je 2000x2000mm. Je určen pro nejnáročnější aplikace jako například měření velkých dílu s malými detaily na povrchu.

ATOS SO je speciálně upravený systém pro měření malých dílů. Nejmenší měřicí objem (30x30mm) je u systému ATOS SO 4M, který tak dosahuje maximálního rozlišení 66bodů na 1mm.

ATOS XL je kombinace systému ATOS se systémem TRITOP. Hlavním přínosem kombinace těchto dvou systémů je zvýšení celkové přesnosti měření. Další výhody jsou prakticky neomezená velikost měřeného objektu, komfortnější měření nebo možnost získání barevné textury měřeného povrchu.

TRITOP

je přenosný optický měřící systém určený k přesnému bezkontaktnímu měření polohy diskrétních bodů, kontrastních čar (prostřihů, ostřihových hran plechu, nakreslených čar na objektu) a viditelných značek na měřeném objektu. Tato mobilní technologie nabízí efektivní měření pro aplikace kontroly kvality, deformačních analýz a digitalizace.

Proces měření **Obr. 2**[10][7]

- princip měření je založen na fotogrammetrii
- měřený objekt je označen optickými body (samolepící, magnetické nebo speciální adaptéry)
- objekt je snímán digitálním fotoaparátem z různých pozic v prostoru
- provedou se čtyři kalibrační snímky nejlépe nad 3D objektem
- další snímky jsou fotografovány ve třech úrovňových rovinách
- na základě digitálních snímků systém vypočítá pozice fotoaparátu a 3D souřadnice bodů na objektu
- měřítko je přesně určeno z takzvaných kalibračních tyčí
- zobrazení 3D souřadnic měřených bodů, pozic fotoaparátu a přesnosti měření
- export naměřených 3D bodů ve standardních formátech nebo použití v systému ATOS

Výstupy z měření

- 3D souřadnice diskrétních bodů
- řezy (body)
- obrysové křivky (body)
- grafický a textový protokol měření (HTML, ASCII)

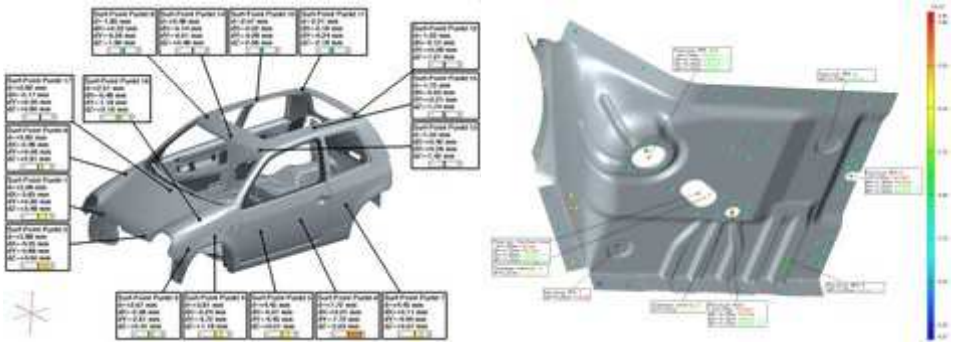
Oblasti využití měřených dat

- kontrola kvality
- reverzní inženýrství
- deformační analýzy

- spolupráce se systémem ATOS pro velké objekty

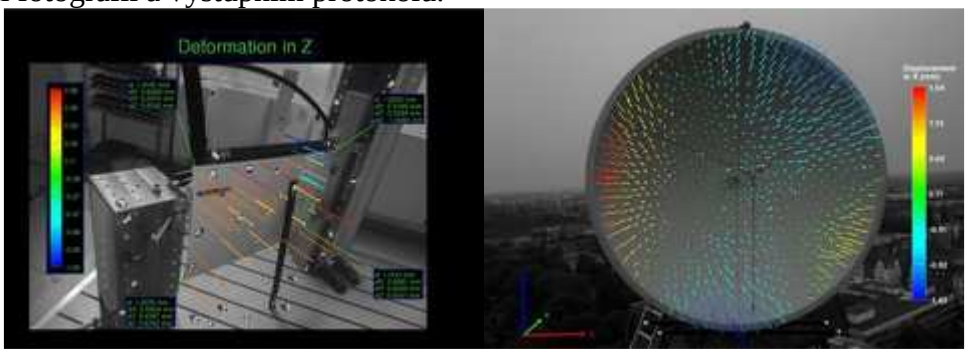
Základní rozdělení systémů Tritop

TRITOP je určený pro základní měření 3D souřadnic diskrétních bodů a kontrastních linií. Možnost použití magnetických optických bodů, samolepících optických bodů nebo adaptérů. Spolupráce se zařízením ATOS pro zvýšení přesnosti měření a pro měření velkých objektů.
TRITOP CMM pracuje jako optické souřadnicové měřící zařízení. Analyzuje pozice bodů, vektory, vzdálenosti, průměry, úhly, nastavené tolerance. Prokládání základních entit jako úsečka,rovina, kružnice, válec, koule, kužel atd. 2D/3D vizualizace. Obrysová křivka, prostřižené díry – odchylka od CAD (nominálních dat), ostřih (tangenciální odchylka), odpružení (normálová odchylka), kruhové, obdélníkové a oválné díry, import ASCII (vektor bodů), import VDA/MDI (vektor bodů), import GOM XML (všechny elementy), specifické translátory BMW-Mess, AUDI-Plan, DMIS.



Obr. 3[7]

TRITOP Deformace měří, vyhodnocuje a zobrazuje statické zatížení objektu. V diskrétních bodech vyhodnocuje velikost a směr vektorů deformace. Pro každý stav zátěže vznikne samostatný projekt. Tyto projekty jsou následně transformovány do společného souřadného systému. Nakonec jsou vypočteny deformace jednotlivých bodů, které jsou přímo znázorněny v digitální fotografii a výstupním protokolu.



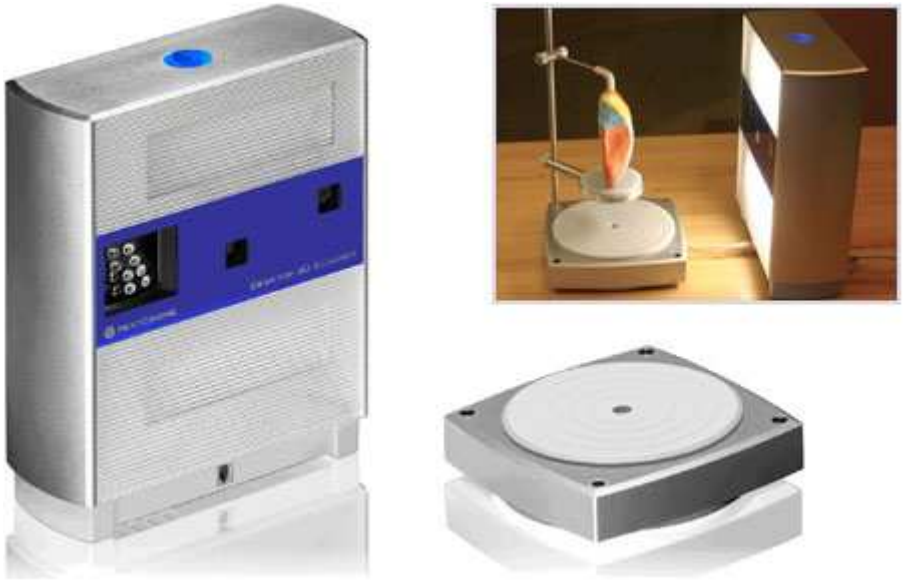
Obr. 4[7]

Dimension 3D Scanstation Lite/VR

Výrobcem tohoto systému, který je určen pro účely prezentace, animace či filmové triky, je firma 3D Dimension Systems. Kromě hardwaru je součástí systému také speciální prohlížeč a plug-in do internetového prohlížeče, pomocí něhož lze prezentovat výrobek přímo u zákazníka nebo na internetové stránce. Zařízení je ve dvou provedeních, a to buď s možností automatického otáčení objektu pomocí krokového motorku nebo s ručním ovládáním. Digitalizační proces začíná nasnímáním obrázků objektu z několika úhlů. Dále pokračuje v editačním programu na počítači vytvořením kontur (vymaskování), voxelizací (vytvoření prostorového modelu z kontur), vytvořením polygonového modelu (dosažení co nejkvalitnějšího modelu s použitím co nejmenšího počtu polygonů) a na konec vytvořením

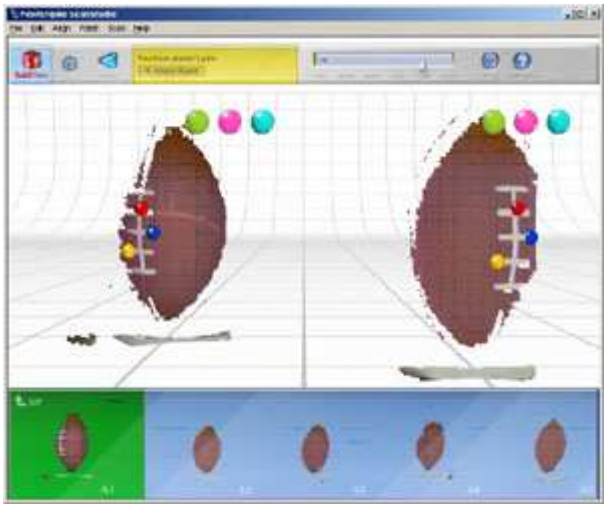
textury z vyfocených snímků. Tento typ skeneru, i přes výhody, je nevhodný pro digitalizaci náročnějších objektů. Proces vedoucí k vytvoření 3D počítačového modelu je velice časově náročný a mnohdy je lepší model vytvořit v některém softwarovém modeléru (Lightwave, 3D Studio Max, ...).

NextEngine Desktop 3D Scanner
je bezdotykový optický 3D skener. Je možné snímat volné organické tvary, měkké materiály a po úpravě povrchu (zmatnění povrchu pomocí křídových sprejů) i lesklé a průhledné objekty.



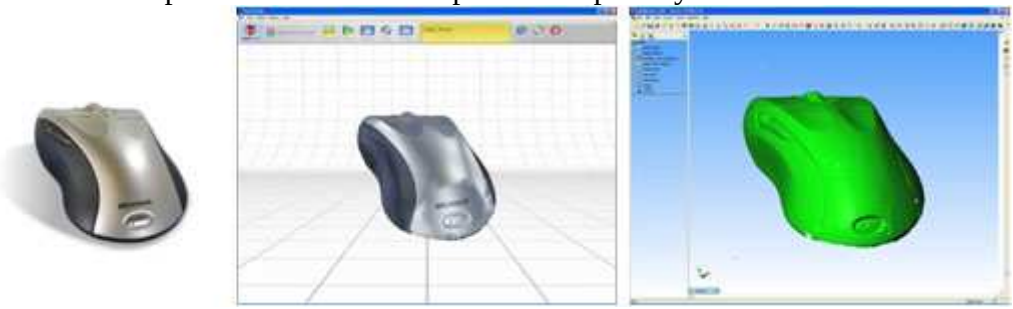
Obr. 5 Scanner s otočnou podložkou[8]

Proces měření je založen na principech optické triangulace. Na povrch objektu jsou promítány 4 pruhy světla, které jsou snímány pomocí dvou kamer. Obslužný program z těchto snímků vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů. Zároveň je objekt vyfocen a vzniklý obrázek je namapován na snímaný povrch. Složení jednotlivých snímků do jednoho celku je zajištěno pomocí referenčních značek umístěných na snímaném objektu. Pro nasnímání celého modelu lze použít otočný stolek nebo je možné libovolně pohybovat skenerem i snímaným objektem.
Kompletní nastaveni a řízení snímání probíhá pomocí aplikace ScanStudio. Pomocí otočného stolku lze vytvářet skupiny snímků, nebo snímat jednotlivé plochy modelu. Nasnímaná data lze exportovat jako STL, OBJ, VRML nebo U3D. Další možností je přímé použití dat v programu SolidWorks.



Obr. 6 Úprava nasnímaných dat v programu Scan Studio[8]

SolidWorks ve spolupráci s firmou NextEngine vyvinul nový nativní formát pro sítě. Nasnímaná data jsou tedy přenášena bez jakékoli konverze. Silné nové nástroje uvnitř programu SolidWorks 2007 umožňují pracovat s mrakem bodů i s polygonální sítí a nasnímaná data tak upravit do konstrukčně použitelné podoby.



Obr. 7 [8]

Díky malé velikosti a stolnímu provedení není zařízení pro účely měření větších objektů, jako je podvozkové zavěšení, příliš vhodné.

3.1.2 Laserová 3D digitalizační zařízení

HandyScan 3D

HnadyScan 3D je ruční laserový skener, který umožňuje vzájemný pohyb skeneru a tělesa během snímání. HandyScan 3D identifikuje poziční značky na tělese nebo podložce a pomocí dvou kamer snímá laserový kříž na tělese. Na počítači se v reálném čase zobrazuje obraz snímání, těleso a laserový kříž a automaticky se generuje polygonová síť.

Díky této patentované technologii snímání a vyhodnocování dat lze velice jednoduše snímat i tvarově složité modely. Poziční značky umožňují automaticky určovat vzájemnou polohu skeneru a snímaného tělesa. Výsledná síť se automaticky přepočítává na základě všech nasnímaných dat podle zvoleného rozlišení. Systém zaznamenává všechny snímky a díky tomu je možné data neustále zpřesňovat a upravovat. Okamžité zobrazení výsledků snímání urychluje vyhledání míst, která nebyla nasnímána nebo vyžadují detailnější snímání.

Obr. 8 HandyScan 3D[8]

Nastavení parametrů snímání probíhá v aplikaci VXScan.
Laser je možné optimalizovat pro určitou barvu a snímat jen část modelu. Výslednou síť lze exportovat jako STL či RAW nebo uložit mrak bodů ze sítě jako IGES. Program VxScan je integrován v řadě speciálních programů na zpracování sítí - např. Geomagic Studio & Qualify. Integrace ovládacího programu VxScan do programů Geomagic zjednodušuje zpracování nasnímaných dat. Z dat lze automaticky vytvořit NURBS plochu, generovat řezy na polygonové síti. Program Geomagic Qualify zobrazí grafické porovnání 3D CAD modelu a nasnímaných dat, je možné vyhodnotit 2D a 3D odchylky a vytvářet kontrolní reporty.
Zařízení je pro měření podvozků a tím i kinematických úchytů náprav vhodné. Vyniká mobilitou i vysokou rychlostí tvorby 3D dat. Snímací hlava je připojena k počítači. Scaner lze využít všude tam, kde se dostaneme se snímací hlavou. Nevýhodou je obtížné snímání ve značně malém prostoru kam snímací kamery „nedohlédnou“. Přímé měření středů úchytů není v tomto případě možné. Souřadnice dostaneme prostřednictvím cizích pomocných geometrických těles. Na většinu z vyvinutých metod měření je zařízení Hnady Scan 3D použitelné.

3.1.3 Dotyková 3D digitalizační zařízení

3D Creator
Je snímací zařízení pro digitalizaci a měření (podobně jako například MicroSribe nebo FaroArm) s bezdrátovým přenosem dat. Tím odpadají jakékoli mechanické nebo velikostní omezení. Volně pohyblivá sonda, vhodná i pro snímaní rozměrných a komplexních objektů, je pomocí infračervené komunikace bezdrátově spojena se senzorem. Ten je stejně jako počítač přes USB připojen k řídící jednotce již pomocí standardního kabelu. Součástí systému je ještě referenční modul sloužící ke kalibraci celého zařízení. Výhodou je samozřejmě mobilita, kdy zařízení jednoduše postavíme ke snímanému objektu a můžeme měřit. Navíc v kombinaci s nastavováním referenčních bodů můžete pohybovat senzorem kolem objektu a tak z různých stran a úhlů snadno měřit i těžko dostupná místa či neforemné nebo velmi rozměrné součásti.

Obr. 9 Práce se zařízením 3D Creator[8]

3D Creator je velice kompaktní, lehký a mobilní systém. Je možné ho celý rychle a jednoduše složit a přenést na jiné místo měření. Při transportu je 3D Creator uložen v zhruba jeden metr dlouhém kufříku.

Pracovní prostor 3D Creatoru se pohybuje v závislosti na použitém senzoru od 30cm³ do 1,5m³. Stejně tak i přesnost se pohybuje v rozsahu od 0,01mm do 0,2mm.

Obr. 10[8]

Systémem není možné přímo změřit body úchytů. Lze využít pro měření nepřímá. Skenovací zařízení je pro účel měření vhodný. Sonda je použitelná i v relativně stísněných prostorách. Nevýhodou je směrovost infračerveného snímače přijímající signály ze sondy. Tento systém je využit v metodě uvedené v kapitole 5.2

MicroScribe3D

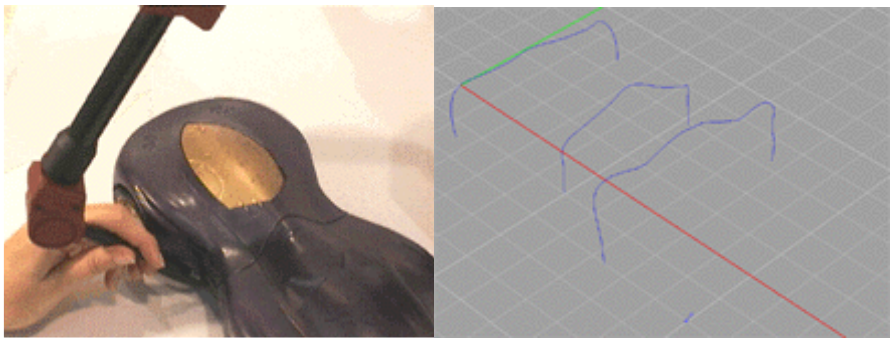
MicroScribe 3D je výrobek firmy Immersion. Vývojem MicroScribe 3D se firma Immersion snažila dodat všem uživatelům produkt co nejvýkonnější, cenově co nejpřijatelnější a pokud možno, s co nejširším užitím. Výsledkem je zařízení, které vám dodá přesnost a výkon výkonných digitalizačních stanic. Skládá se z hliníkového krytu, lehkého uhlíku a nejmodernějších elektronických součástek. Mechanické rameno je pečlivě vyváženo, aby byla manipulace s MicroScribe 3D co nejjednodušší.

Obr. 11 Zařízení MicroScribe[9]

Užití je jako 3D scaner. Stačí za pomocí MicroScribe 3D „obkreslovat“ skutečný model a veškerá skenovaná data jsou přenášena do vámi zvoleného programu a v několika minutách můžete mít vytvořený ten nejsložitější model. Skenovat lze objekt jakéhokoliv tvaru, velikost a materiálu. Široký sortiment dodávaného softwaru vám umožní bezproblémové spojení s vašim oblíbeným grafickým programem. Rhino 3D, from-Z, LightWave, 3D studio max/viz, Alias, Maya, Solidworks, Delcam, Maquette Volume, AutoCAD R14/2000, Mechanical Desktop, Mastercam, CADKEY, solid Thinking, Pro Engineer, InScribe 3D - toto jsou jen některé z aplikací, které podporují MicroScribe 3D. Ve všech těchto a v mnoha dalších ji můžete použít ke všemu co normální myš a ještě na mnoho účelů, na které vaše domácí myš opravdu nestačí. Snímat dokáže 1000 bodů za sekundu.

Krok první – tvorba profilu

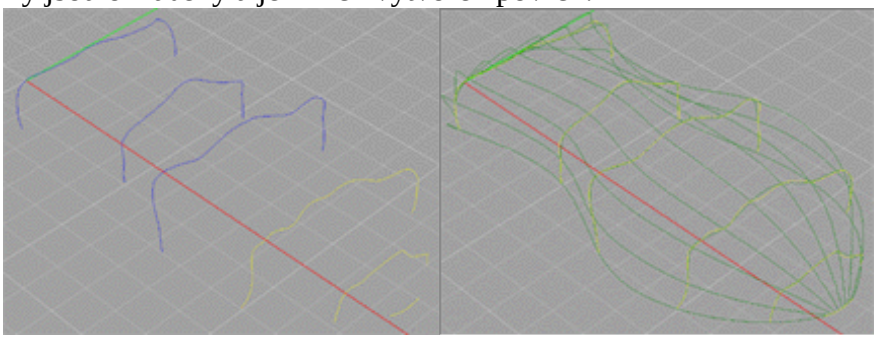
Nejdříve je nutno vytvořit profilové křivky, které budou později změněny na povrch. Digitalizování profilu za pomocí MicroScribe3D je opravdu jednoduché. Špičkou ovladače se dotýkáme fyzického modelu, který tvoříme a ruční spínač či nožní ovladač je aktivován vždy, když si přejeme vytvořit bod.



Obr. 12 Tvorba profilové křivky[9]

Přibližný čas na vytvoření křivky10 vteřin. Pomocí příčných křivek definujeme tvar povrchu.Přibližný čas na vytvoření série příčných křivek 2 minuty.

Krok druhý – tvoření povrchu z naskenovaných profilových křivek.
Všechny křivky jsou označeny a je z nich vytvořen povrch:

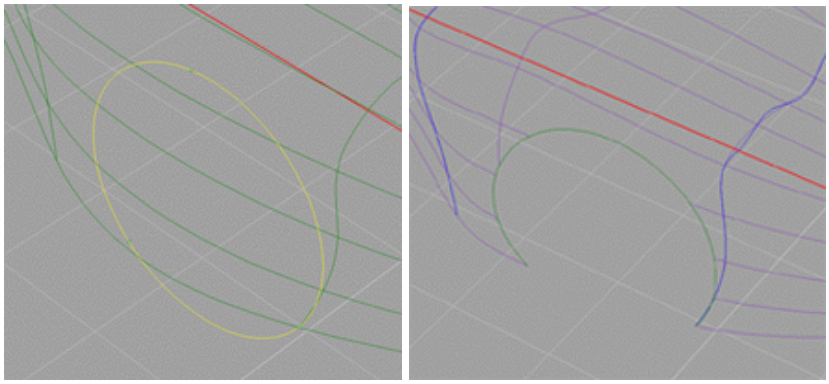


Obr. 13 Tvorba povrchu z profilových křivek[9]

Přibližný čas na loftování křivek: 1 minuta.

Krok třetí – tvorba kol

Přibližný čas na tvorbu křivky: 10 vteřin **Obr.14**[9]

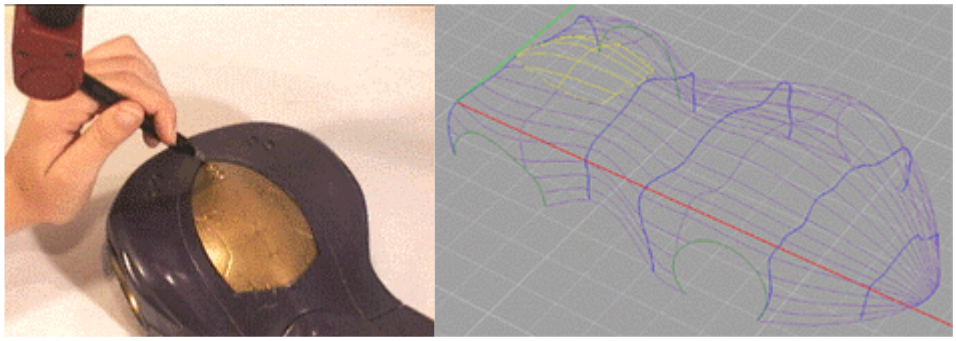


Obr. 15 Kolo po naskenování [9]

Takto vypadá kolo po naskenování pomocí MicroScribe 3D. Přibližný čas na doladění kola je 15 vteřin. Po vytvoření profilu kola, je toto odečteno pomocí substrakce z povrchu modelu.

Krok čtvrtý – vytvoření oken a dolaďování modelu

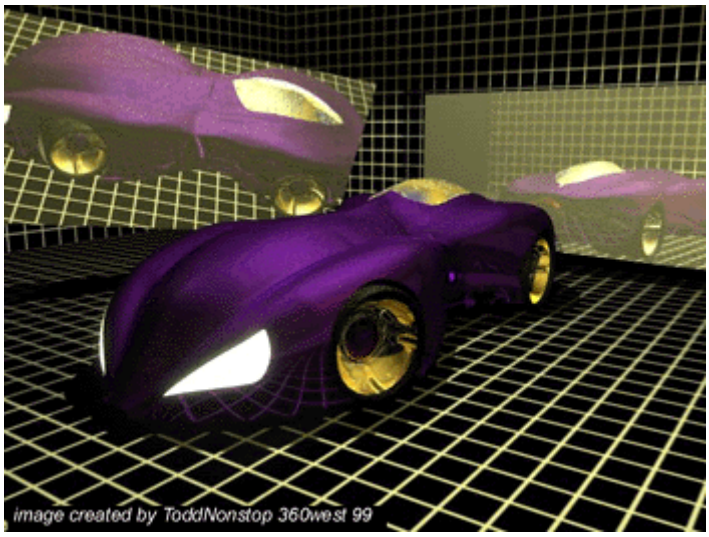
Podobně jako v předchozím kroku, kde byla použita substrakce, je i zde použita jedna z nesčetných vlastnosti MicroScribe. Po vytvoření tvaru kapoty, je toto zvýrazněno pomocí Extrude. Naskenujeme okno:



Obr. 16 skenování okna[9]

Přibližný čas k naskenování okna a oddělení ho od modelu: 2 minuty

Krok poslední – renderování modelu
Po dokončení modelu, je třeba již jen použít textur a vyrenderovat ve vašem oblíbeném 3D programu



Obr. 17[9] Výsledek

Přibližný čas na digitalizaci modelu: 20 minut
Přibližný čas na nastavení textur a ostatních detailů před renderováním: 4 hodiny.
Zařízení je na naší fakultě používáno.V současnosti s ním měří Ústav konstruování. Je vhodnější spíše pro měření malých předmětů. Digitalizace předmětů je rychlá. Na měření zavěšení, vzhledem ke svým rozměrům, zařízení vhodné není.

3.1.4 Destruktivní 3D skenery

Jedná se o zařízení, které má schopnost digitalizovat jak vnější povrch součásti, tak i vnitřní geometrii. Digitalizovaný objekt ale bude při použití této metody zničen. Uplatnění nalezne zejména v oblasti Reverzního Inženýrství při digitalizaci součástí se složitou vnitřní geometrií. Před procesem digitalizace je skenovaná součást umístěna na nastavitelný rám a pokryta speciálním materiálem, který při zpracování naskenovaných snímků poskytne vysoký kontrast mezi součástí a výplňovým materiálem. Poté se z prostoru vyčerpá vzduch a vznikne vakuum, které způsobí, že se tento speciální materiál dostane do všech dutin součásti. Takto

připravený blok se přemístí do skenovacího zařízení, kde se připevní ke frézovacímu stolu. Vlastní skenování proběhne v okamžiku odfrézování ultratenké vrstvy materiálu z bloku. Každý takto nově vzniklý povrch se naskenuje použitím optického skeneru a získaná data se odešlou k dalšímu softwarovému zpracování.
Tento typ skenerů je zde uveden pro vysvětlení principu. Pro naše účely použitelný není.

3.1.5 Rentgenové 3D digitalizační zařízení

METROTOM
Rentgenové záření ukáže a změří to, co konvenční 3D měřicí technice zůstává skryté. Pod ochrannou známkou METROTOM nabízí Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen, výkonný počítačový tomograf pro zajišťování kvality v průmyslu. Zpřístupňuje uvnitř součástí oblasti, které jsou pro dotykové nebo optické snímací systémy nepřístupné, slouží kontrole struktury materiálu a měří rovněž vnější znaky. METROTOM umožňuje generovat CAD modely.
Princip metrotomografie
Počítačový tomograf nedestruktivně kontroluje rentgenovým zářením vnitřek i vnějšek komplexních a malých součástí a velmi přesně je zobrazuje jako 3D obraz. Tato metoda odpovídá rentgenové technice používané v lékařství. Rentgenové paprsky pronikají objektem a na vhodném detektoru ho zobrazí. V závislosti na geometrii a absorpčních vlastnostech se v různé intenzitě objevují detaily objektu jako dvourozměrný obraz. Trojrozměrný obraz vznikne tím, že daný objekt je na otočném stole otočen o 360 stupňů kolem vlastní osy a takto získaná data jsou přepočtena na 3D objemový model.

Metrotomografie – počítačově tomografická kontrola součástí
Oblasti použití metrotomografie jsou: montážní kontrola a analýza škod, zkoušky materiálu, analýza pórovitosti a defektů. Podle materiálu – např. ocel, slitiny, keramika nebo umělá hmota – se dají kontrolovat díly až do velikosti 350 milimetrů. K dispozici jsou automatické a objektivní vyhodnocovací metody.

Metrotomografické vytváření CAD modelů
CAD modely jsou již neodmyslitelně spjaty se současnou měřicí technikou. Počítačový tomograf METROTOM může např. pomocí softwaru HOLOS vytvořit z každé "metrotomografované" součásti kompletní CAD datovou větu. Věta může mít výstup ve všech běžných formátech a umožňuje rychle a velice přesně generovat data během vypracování návrhu Rozhodující je, aby mohly být vytvořeny kompletní CAD datové záznamy pro komplexní vnitřní struktury, které se nedají digitalizovat nebo změřit konvenčními metodami. Přesné změření obrobků zajišťují přesné lineární osy s CAA-korekcí chyb vedení (Computer Aided Accuracy) a na vzduchových ložiskách uložený otočný stůl s přímým pohonem. Otočný stůl má rozlišení 0,036 úhlové vteřiny a lze na něm umístit obrobky s tíhou až 800 Newton. Optimálně sladěné CT-komponenty doplňují mechanické moduly.
Systém pro měření podvozků vozidel určen není. Používá se v jiných odvětvích průmyslu. Opět přibližuje metodu digitalizace.

3.1.6 Ultrazvukové 3D skenery

Tento způsob 3D digitalizace funguje na principu bezkontaktního snímání povrchu objektu ultrazvukovou sondou. Jedná se o jedno z cenově nejméně náročných řešení problematiky prostorového snímání povrchů. Skenování je prováděno manuálně ultrazvukovou sondou

tvaru pistole s kovovým hrotem, který přikládáme ke skenovanému povrchu, kdy stiskem spouště dojde k vyslání ultrazvukového signálu. Tento signál je pomocí speciální konstrukce s ultrazvukovými čidly dekódován do prostorových souřadnic, které je možno vkládat přímo do CAD systémů nebo do datových souborů. Nevýhodou zařízení je jeho relativně malá přesnost, která se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,5 mm.
Ultrazvukové zařízení použitelné na měření kinematických bodů je. Přesnost měření v rozmezí 0,3 až 0,5mm je na hranici námi požadovaných hodnot. Požadovaná přesnost je v rozmezí 0,1 až 0,5mm, horní hranice je přípustná pouze v krajních případech. Metoda je tedy pro účely měření zavěšení spíše nevhodná.

4. Použitá optická měřící zařízení

4.1 Atos I

Je bezdotykový mobilní optický 3D skener určený pro nejrůznější aplikace. Rozlišení je 800 000bodů na 1 záběr. Maximální měřicí rozsah je 1000x800mm při rozlišení 1bod na 1mm. Nejširší využití systému ATOS je v oblastech CAD, CAM a FEM kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem. U tohoto typu zařízení Atos je nutné snímaný objekt povrchově upravit kontrastním matným bílým křídovým nástřikem.

4.1.1 Hardware a software

- Skenovací hlava se dvěma CCD kamerami a zdrojem světla
- Výměnné objektivy kamer s různou ohniskovou vzdáleností pro malé a velké měřené díly
- Referenční body pro spojení zaznamenaných snímků a výpočet bodů povrchu v prostoru, případně k získání prostorových souřadnic důležitých objektů měřeného objektu
- Kalibrační desky třech rozměrů, pro kalibraci skeneru pro měření menších a větších součástí
- Výkonné PC.
- Aplikační software pro analyzování a vyhodnocení sad měření

4.1.2 Základní pravidla pro práci s ATOSEM

Před samotným měřením se snímaný objekt umístí před tmavé pozadí (nebo před pozadí vytvářející s ním velký kontrast). V případě, že je objekt průhledný nebo jeho povrch příliš lesklý, musí se provést jeho úprava pomocí křídových nástřiků, jinak by totiž bylo jeho snímání nemožné nebo velmi problematické. Tím se dosáhne matného povrchu, který již při snímaní nebude činit potíže. Dále se na snímaný objekt umístí pomocné značky. Ty poslouží při výpočtu polohy objektu. Měřící hlava přístroje se upevní na pomocný stativ a společně se umístí do vhodné polohy vůči snímanému objektu ve správné ohniskové vzdálenosti určené průměrem snímacích čoček CCD kamer. V našem případě je tato vzdálenost přibližně 750 mm. Následně se na povrch objektu vysílají proužky světla a prostřednictvím dvou vzájemně posunutých digitálních kamer se objekt snímá. Získají se tak dva obrazy z různých úhlů a dalším digitálním zpracováním se s danou přesností vypočte poloha každého obrazového bodu. Není nutné objekt snímat po pravidelných úsecích, ale stačí snímky pořídit z libovolných pohledů, tak aby byly zobrazeny všechny plochy, které se mají zpracovat. To je umožněno prostřednictvím předem umístěných pomocných značek. Podmínkou je, aby každý

nový pohled obsahoval minimálně tři pomocné značky, které se vyskytovaly na předcházejícím pohledu. Při měření dochází k současné kalibraci projektoru, a tak je při triangulaci potlačen vliv změn v okolním osvětlení, čímž nedochází ke zkreslení získaných souřadnic.

4.2 Tritop

Systém TRITOP je průmyslový, bezkontaktní optický měřící systém pro měření přesných prostorových souřadnic bodů na objektu. Tento přenosný systém se nejčastěji používá při kontrole kvality a při deformačních analýzách.
Všechny důležité body na tělese jsou označeny referenčními body a pomocí digitálního fotoaparátu je těleso vyfotografováno z různých úhlů pohledu. S těchto digitálních snímků systém TRITOP automaticky vypočítá prostorové souřadnice bodů nalepených na objektu. Pomocí tohoto systému můžeme měřit objekty jejichž velikost je od 0,1 metru do 10 metrů.

4.2.1 Hardware a software

- Digitální fotoaparát s vysokým rozlišením s vyměnitelným objektivem se stálou ohniskovou vzdáleností.
- Paměťové medium (PCMCIA) pro přenos dat z fotoaparátu do PC.
- Blesk pro optimální nasvícení měřeného objektu.
- Kódované referenční body. Každý kódovaný referenční bod má své identifikační číslo a systém TRITOP jej automaticky rozezná a využije pro výpočet polohy fotoaparátu.
- Nekódované referenční body k získání prostorových souřadnic důležitých součástí měřeného objektu.
- Certifikované kalibrační tyče pro určení měřítka výsledku měření. Tyto kalibrační tyče mají na svém povrchu kódované referenční body s velmi přesně určenou vzájemnou vzdáleností. Kalibrační tyče systém TRITOP využije pro určení vzdálenosti jednotlivých kódovaných a nekódovaných referenčních bodů.
- Výkonné PC s aplikačním softwarem pro analyzování a vyhodnocení sad snímků.

4.2.2 Základní pravidla pro práci s TRITOPEM

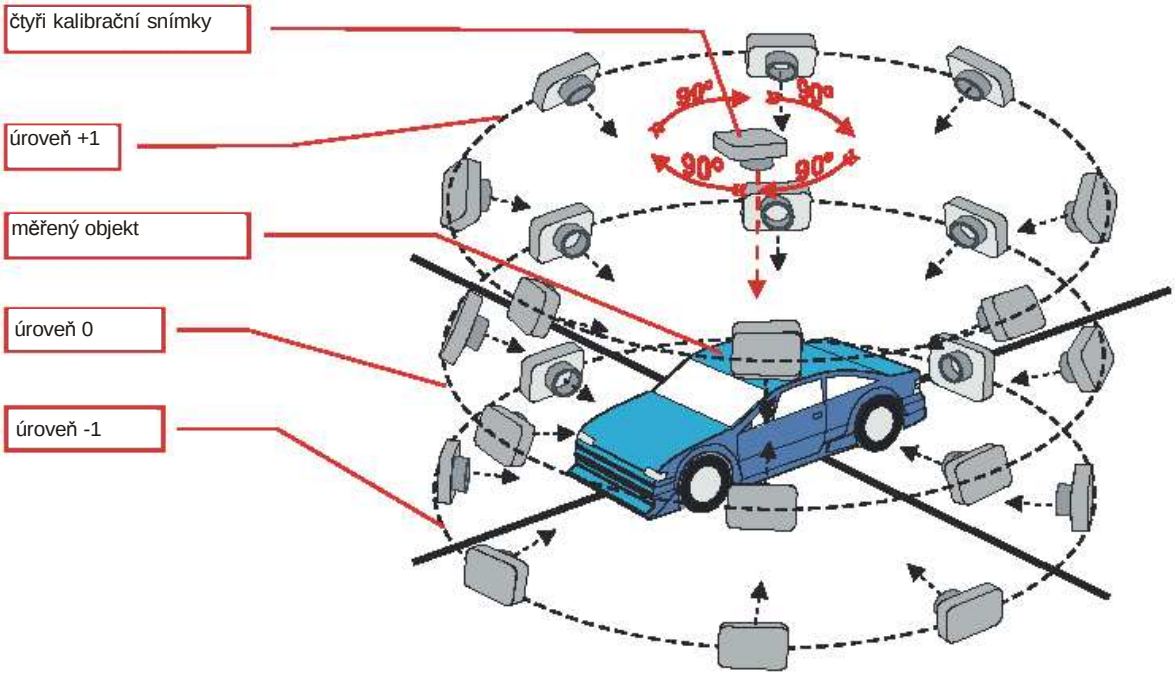
Aby systém TRITOP mohl přesně určit souřadnice referenčních bodů musí být dodrženy následující požadavky.

- Na každém snímku musí být viditelné nejméně pět kódovaných referenční body. Systém TRITOP vyžaduje nejméně tento počet bodů pro určení polohy fotoaparátu. Proto je vhodné umístit k měřenému objektu co nejvíce kódovaných referenčních bodů tak aby tato podmínka byla splněna. Tyto body umisťujeme na viditelná místa na objektu a v okolí objektu.
- Aby došlo k identifikaci referenčního bodu musí tento bod mít na snímku minimální průměr 10 pixelů. Nejčastěji má referenční bod na snímku tvar elipsy tato elipsa musí mít minimální průměr výše uvedených 10 pixelů.
- Při vytváření snímků nesmíme referenční body přeexponovat ani pod-exponovat. TRITOP identifikuje referenční body přesně jestliže je přechod mezi jednotlivými úrovněmi šedé ostrý.
- Nekódovaný referenční bod musí být viditelný na nejméně třech snímcích tak může systém TRITOP určit automaticky přesné prostorové souřadnice bodu. Jeli bod vidět ve více snímcích je jeho poloha určena přesněji.

- Při snímání sad snímků nesmíme měnit nastavení fotoaparátu to znamená nastavení světelné clony, citlivosti a zaostření.
- Z centrální pozice vyfotografujeme čtyři snímky otočené okolo optické osy o 90°.
- Sada snímků se skládá z mnoha překrývajících se snímků. Snímky se vytvářejí rotací okolo optické osy. Pravidlem je, že na každém následujícím snímku by měla být vidět část předchozího snímku.
- Definování parametrů použité kalibrační tyče a kódovaných referenčních bodů v aplikačním software TRITOP.

4.2.3 Pohyb fotoaparátu při měření 3D objektu

Jako při měření plochého objektu, jako první zhotovíme kalibrační snímky z horní pozice. Kalibrační snímky se nemusí nutně zhotovovat z horní pozice, ale většinou je tato pozice nejlepší. Jinak vybereme takovou pozice ze, které jde vidět co nejvíce kódovaných referenčních bodů tyto body by měly být na kalibračních snímcích rozmístěny po celé jeho ploše.Následující snímky pořídíme z několika úrovní. Úroveň +1 je nad objektem a snímáme z ní pod úhlem 45° od optické osy. V této úrovni snímáme snímky tak, že postupujeme ve proti směru hodinových ručiček. Počet snímků na jedné úrovni není pevně stanoven. Při snímaní musíme dbát na to, aby na každém snímku bylo vidět alespoň pět kódovaných referenčních bodů a aby každý nekódovaný referenční bod byl, v celém měřícím projektu, alespoň na třech snímcích. Při snímání složitě tvarovaného objektu bude tedy počet snímků větší než u jednoduchého objektu. U ostatních úrovních postupujeme stejně. Postup je vykreslen v Obr.18

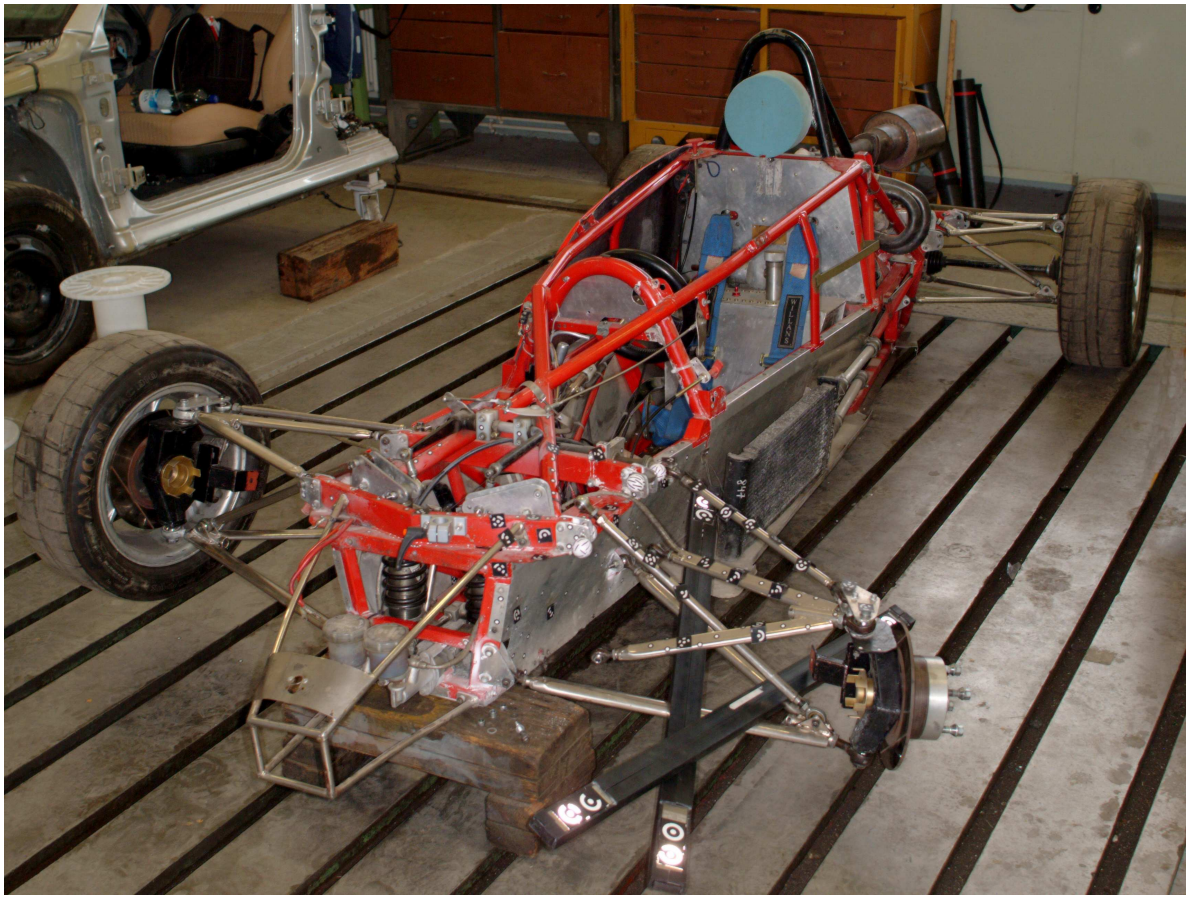


Obr.18 Postup měření optickým systémem Tritop [3]

4.2.4 Výběr měřících bodů a umístění kalibračních tyčí

Pro měření zařízením Tritop byly použity kódované body 10 bitové sady, jenž nám vzhledem k velikosti měřeného objektu dostačují. Počet bodů v sadě je 99. Jejich rozmístění na objektu je libovolné.
Na rameno a rám byly nalepeny nekódované body. Pomocí bodů na rámu byl transformován souřadný systém. Body na rameni byli použity pro samotné měření. Kalibrační tyče byly umístěny pod ramenem a zajištěny proti pohybu. Na poloze kalibračních tyčí nezáleží. Je však vhodné, aby byly kódované referenční body na tyči viditelné na co největším počtu snímků. Při měření je nutné brát ohled na to, aby se kalibrační tyče během prováděného měření nepohnuly.

5. Měření lichoběžníkové nápravy nekapotovaného vozu formule Ford 1600



Obr. 19 Experimentální vozidlo formule Ford při měření

5.1 Metody přímého měření úchytů lichoběžníkové nápravy formule Ford

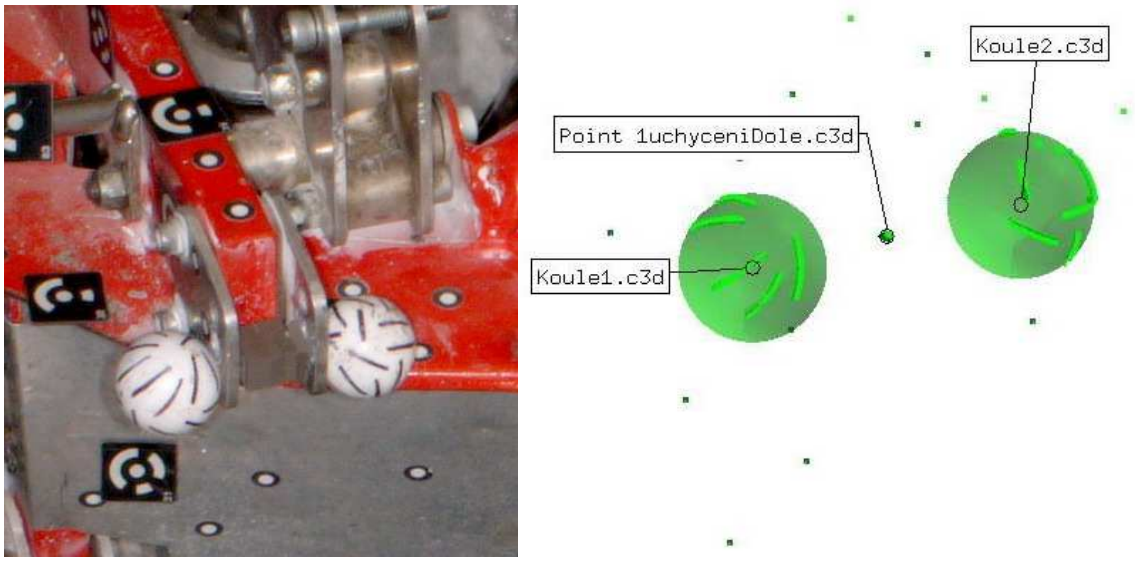
Musíme pamatovat na to, že chceme co nejednodušším, nejpřesnějším a co nejrychlejším způsobem získat vstupní údaje pro simulační software. Pro přesnost a rychlost je důležitý minimální počet pomocných prvků pro měření a jejich snadná, rychlá a zároveň přesná instalace na klouby nebo úchyty. Za přesné umístění pomocného prvku považujeme odchylku umístění méně než 1 desetinu milimetru.

5.1.1 Metoda s kulovými tělesy pomocí zařízení Tritop

Tento typ vozidla umožňuje využití této metody vzhledem k dostatečnému prostoru nutném pro snímání fotografií ve třech rovinách. U vozů se samonosnou karoserií, vzhledem k omezeným prostorovým podmínkám, jde použít značně omezeně. Způsob měření je rychlý a přesný pokud jsou důsledně dodrženy zásady uvedené v kapitole 4.1. Jsme schopni po zpracování dostat, do cca 1 hodiny od začátku měření, výsledky. Nejsou-li dobře dodrženy zásady z kapitoly 4.2, jako například perfektní zajištění polohy kalibračních tyčí, může měření ovlivnit chvění vyvolané kroky při obcházení měřeného předmětu. Doba měření se pak prodlužuje až na dvojnásobek i více, kvůli nutnosti opakovat měření.

Postup měření:

K úchytů ramen jsme za pomoci magnetů připevnili ocelové koule s bílým podkladem a černými pruhy. Provedli jsme měření zařízením Tritop. V programovém rozhraní zařízení jsme provedli vyhodnocení měření a za pomoci pomocných čar systému jsme v podstatě „obtáhli“ kontrastní čáry na koulích. Pomocnými čarami byla proložena koule. Takto jsme vytvořili čtyři primitiva – koule, pro každý úchyt dvě. Mezi každou dvojicí koulí jsme vytvořily bod. Tyto body jsou středem úchytů, které lze porovnat s ostatními získanými jiným způsobem měření. Metoda byla použita pro měření všech možných poloh uchycení ramene. Bylo provedeno měření středů různě vysoko položených úchytů pro jednodušší porovnání.

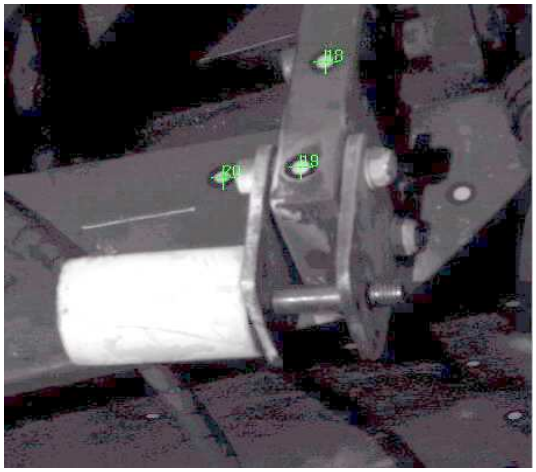


Obr. 20 Metoda s kulovými tělesy. Vlevo skutečné umístění koulí, vpravo již jako primitiva v systému Tritop

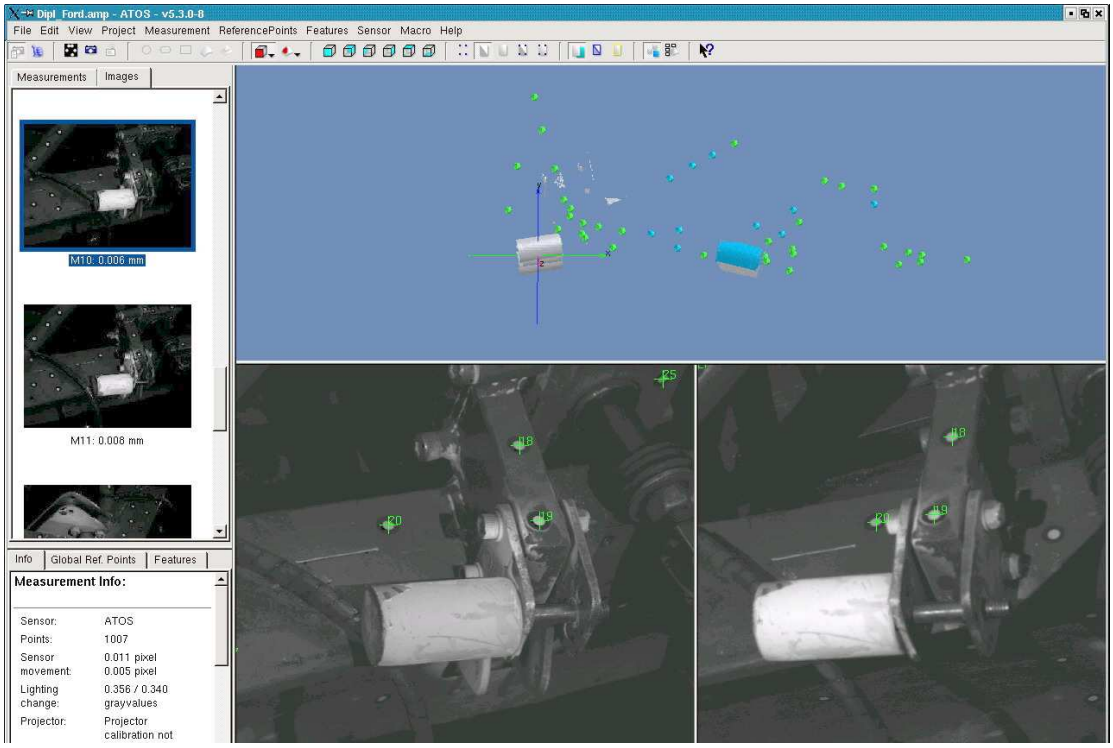
5.1.2 Metoda s vloženým válcovým tělesem pomocí systému Atos

Metoda je rovněž použita z důvodu dobrého přístupu k úchytům ramen. Způsob měření je rychlý a přesný pokud jsou důsledně dodrženy zásady uvedené v kapitole 4.2. Zde jsme ještě předpokládali vyšší přesnost, než u metody předchozí. Důvodem je nízká možnost sčítání chyb v řetězci měření. To si dokážeme ve vyhodnocení naměřených hodnot. Nevýhodou jsou velké přepravní rozměry snímací hlavy se stativem a potřebné výpočetní stanice.

Postup měření:
Pro tuto metodu jsme použili ocelového válcového tělesa se ze strany našroubovanou osou a nastříkané kontrastním bílým křídovým přípravkem. Toto těleso bylo postupně zasunováno do držáků ramen ve všech třech výškových úrovních a naskenováno. Osa válce určuje osu úchytu. Kinematické body dostaneme až za použití primitiv programového rozhraní Atos. Nejdříve jsme proložili naskenovanou plochou válec a tím získali osu úchytu. Šířku úchytu jsme změřili posuvným měřítkem přes vnějšek držáků. Za použití pomocného bodu umístěného na boku úchytu jsme vytvořili pomocnou rovinu. Od této roviny jsme na ose válce, která je kolmo k této rovině, vytvořili bod v polovině vzdálenosti naměřené posuvným měřítkem. Tento bod je středem úchytu ramene. Takto jsme vytvořili body pro všechny polohy uchycení.



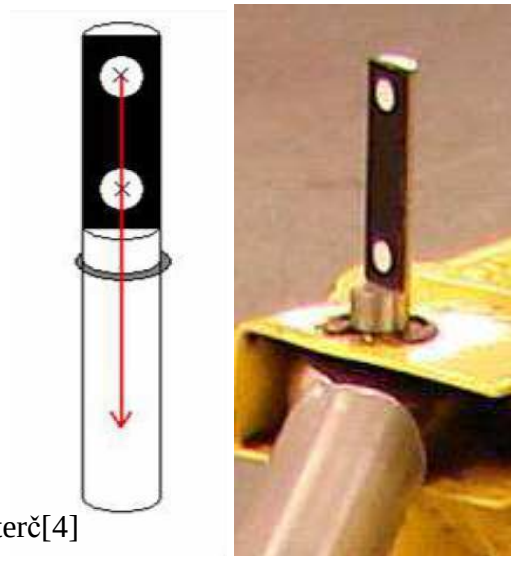
Obr. 21 Válcové těleso s osou



Obr. 22 Měření skenovacím zařízením Atos

5.1.3 Metoda s vektorovým identifikačním terčem

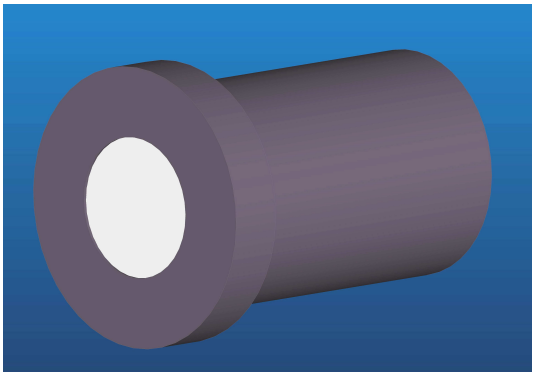
Způsob získání osy kloubu byl vyvinut na Colorado State University inženýrem Andre D. Powellem[4]. Pro měření bodů rotace zavěšení – ramen zakončených takzvanými „unibaly“, byly vytvořeny „vektorové“ terče jako náhrada upevňovacích šroubů. Užitím vektoru stanoveného terčem můžeme identifikovat osu kloubu za použití minima bodů. Vektorové terče jsou vyrobeny z kulatiny o průměru otvoru pro šroub v kloubu a z tenkého vinilového plastu pokrytého z jedné strany tenkou černou vrstvou (0,075 mm). Terče byli vyrobeny pomocí konvenční frézky. Potom byly vlepeny plastové díly, aniž by byla tyč vyjmut z frézky. Stopkovou frézou o průměru 5 mm byla z přilepeného plastu odfrézována tenká černá vrstva, tím byly vytvořeny kontrastní body. Pro zjištění středu je nutné ručně změřit šířku úchytu. Ještě je potřeba zmínit, že tato metoda je dobře použitelná jak při měření systémem Atos, tak i pro systém Tritop.
My jsme toto měření nepoužili. Máme ke srovnávání metody vyvinuté na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Metoda je zde uvedena jako jedna z možností získávání kinematických bodů zavěšení.



Obr. 23 Vektorový terč[4]

5.1.4 Metoda s násuvnými body

Metoda je jednoduchá, body lze instalovat na vozidlo rychle. Nevýhodou je nutná demontáž upevňovacích šroubů zavěšení.Tato možnost měření spočívá v podstatě v nahrazení upevňovacích šroubů násuvnými bodovými terči. Terče jsou nasunuty z boku držáků ramen a po jejich nafocení fotogrammetrickým systémem, nebo naskenováním 3D skenerem Atos, získáme osu úchytu. Bod úchytu získáme pomocí primitiv obou systémů a to vytvořením bodu mezi oběma násuvnými body.



Obr. 24 Násuvný bodový terč

Bod je vyroben ze silonového materiálu a na jeho konci je nalepen kontrastní materiál.
Postup výroby je následující: Na jeden konec silonového polotovaru o průměru 10 mm byl nalepen kontrastní bílý plast s malou černou vrstvičkou na povrchu. Komplet byl upnut do soustruhu a na jedno upnutí bylo vysoustruženo osazení a odsoustružena kontrastní vrstvička v průměru 5 mm a jen do takové hloubky,aby se odkryla bílá podkladová vrstva. Takto jsme získali násuvný kontrastní bod pro naše optické měřicí systémy. Výkres bodu je v příloze diplomové práce.

5.2 Metody nepřímého měření úchytů lichoběžníkové nápravy formule Ford

Následující způsoby měření jsou nutné pro špatně přístupné úchyty ramen a klouby zavěšení. Právě z důvodů v podstatě nemožného přístupu k upevňovacím místům se nevyhneme užití metod. U způsobu uvedeného v kapitolách 5.2.1 5.2.2 není nutné využití přípravků pro získání středů uchycení. I když je u vozu formulového typu přístup k zavěšení dobrý, provádíme měření touto metodou v rámci srovnání s ostatními možnostmi měření.

5.2.1 Metoda odkývání ramene lichoběžníkové nápravy uchyceného v jednom úchytu

Bylo změřeno rameno zamontované jedním úchytem v rámu. Pro každý projekt měření mělo rameno jinou polohu. Změna polohy byla zajištěna dřevěnými podložkami se zvětšující se délkou. Výhodou metody je získání kinematického bodu bez pomocných těles. Tato metoda je poměrně časově náročná vzhledem k nutnosti naměřit, vytvořit a zpracovat minimálně čtyři projekty. Stává se, že přesnost měření na první pokus není dostatečná. Proto je nutné měření i několikrát opakovat a ještě částečně zpracovávat, což je velmi časově náročné. Jedno takové měření odkývání se zpracováním zabere cca 2-3 hodiny.

Postup měření:

Všechna měření jsou prováděna jako samostatný projekt. V každém projektu systém vytvoří souřadný systém s počátkem v libovolné pozici. Proto jsme provedli 3-2-1 transformaci formou ZZZ-YY-XX. Volili jsme pro ni vždy stejné body na rámu vozidla. Tímto jsme dostali počátky souřadného systému v každém projektu přibližně do stejné pozice. To také znamená, že po transformaci souřadných systémů které Tritop vytvoří standardně, se může mírně lišit pozice počátků transformovaných souřadných systémů. Tento jev je nežádoucí a snižuje přesnost metody. Stačí minimální odchylka jedné desetiny milimetru a výsledek měření se značně liší, jak si dokážeme v kapitole 4.3.2. Rameno je při každém měření v jiné poloze. Za pomoci jednoho bodu ve čtyřech polohách vytvoříme nejlépe odpovídající kouli pomocí primitiv systému Tritop. Střed koule tvoří střed úchytu ramene.
Stejný bod ve čtyřech polohách jsme použili pro výpočet středu koule a tím i ke zjištění středu úchytu ramene. Všechny změřené a vypočtené body vzájemně porovnáme(viz. kapitola5.2.).
Příklad výpočtu:

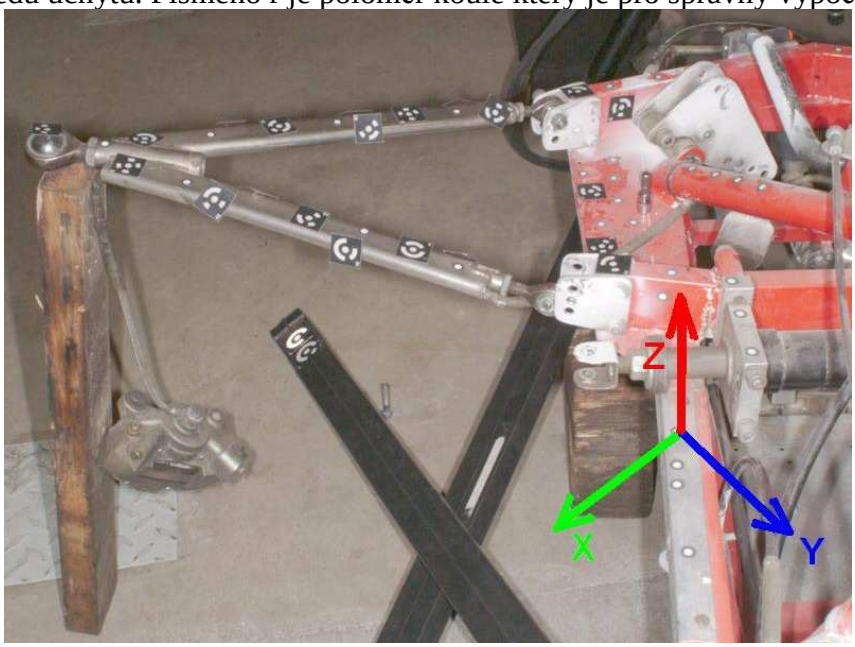
$x := 145.5$ $y := -414.$ $z := -147.6$
$x_1 := 205.4$ $y_1 := -423.6$ $z_1 := -12.3$
$x_2 := 193.6$ $y_2 := -411.0$ $z_2 := 146.4$
$x_3 := 161.7$ $y_3 := -384.9$ $z_3 := 215.2$

Given

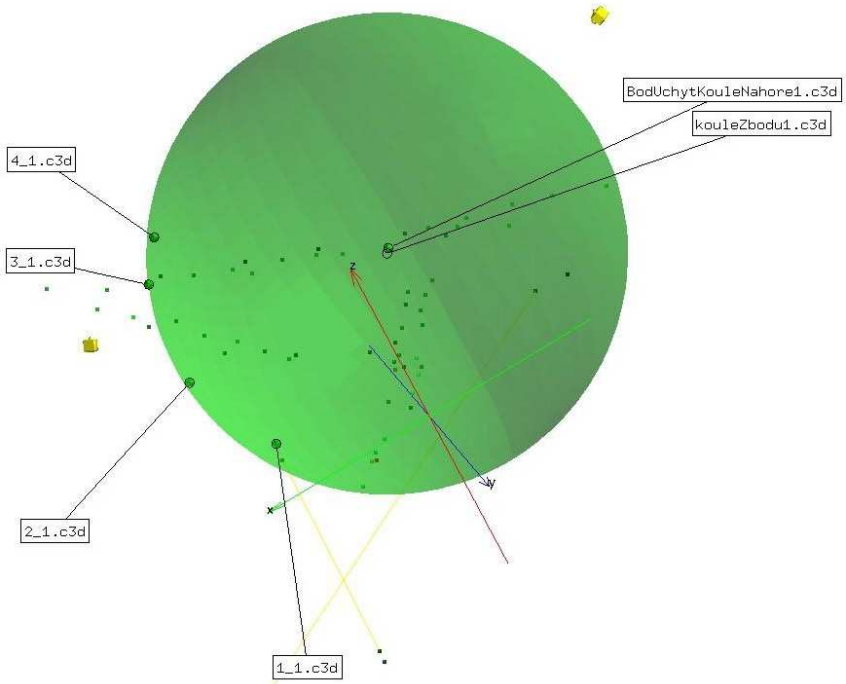
$$\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2\right] = r^2$$
$$\left[(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2\right] = r^2 \qquad (1)$$

$$\left[(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2\right] = r^2$$
$$\left[(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2\right] = r^2$$
$$\text{Find}(x_0, y_0, z_0, r) = \begin{pmatrix} -86.628 \\ -351.098 \\ 40.547 \\ 305.561 \end{pmatrix}$$

Kde x, y, z až x_3, y_3, z_3 jsou souřadnice bodu ve čtyřech různých polohách. A x_0, y_0 , z_0 jsou souřadnice středu úchytu. Písmeno r je poloměr koule který je pro správný výpočet nutný.



Obr. 25 Odkývání ramene uchyceného v jednom úchytu s naznačeným souřadným systémem



Obr. 26 Náhled na kouli proloženou body tvořenou pomocí primitiv systému Tritop

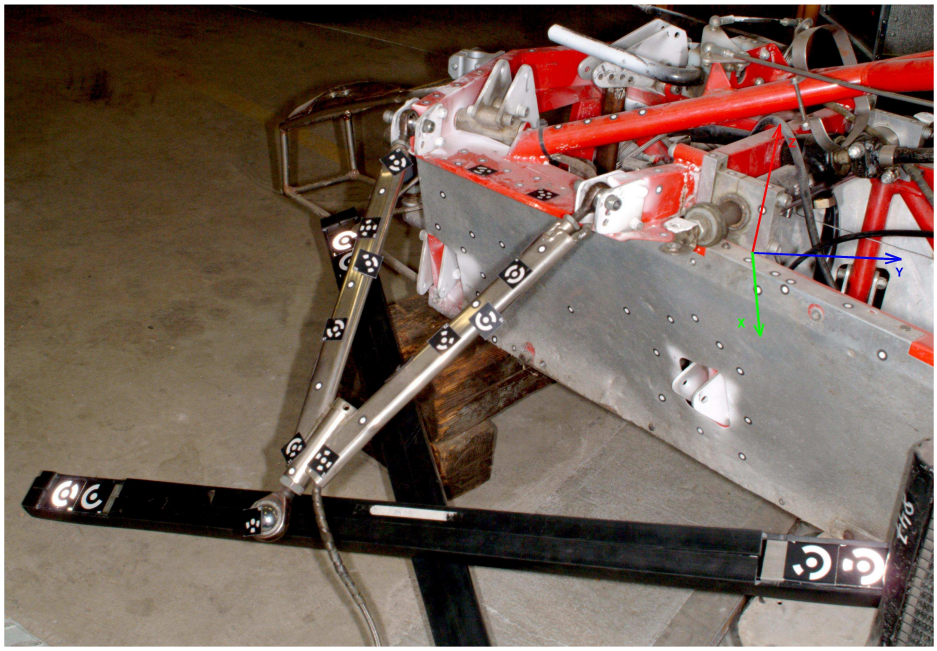
5.2.2 Odkývání při uchycení ramene ve dvou úchytech

Využijeme tam, kde se nedá odkývat součást za jeden bod. Metoda je obdobná jako předchozí, je opět třeba minimálně čtyřech měření. Všechna měření je nutné transformovat. Odchylka dále narůstá s každým dalším projektem. Touto metodou nelze přímo získat středy úchytů ramene. Dostaneme pouze osu kývání ramene. Souřadnice osy kývání ramene získáme proložením dvou bodů pomocným válcovým tělesem. Oba dva body jsou změřeny ve čtyřech polohách ramene. Další možností je proložení těchto bodů kružnicí.

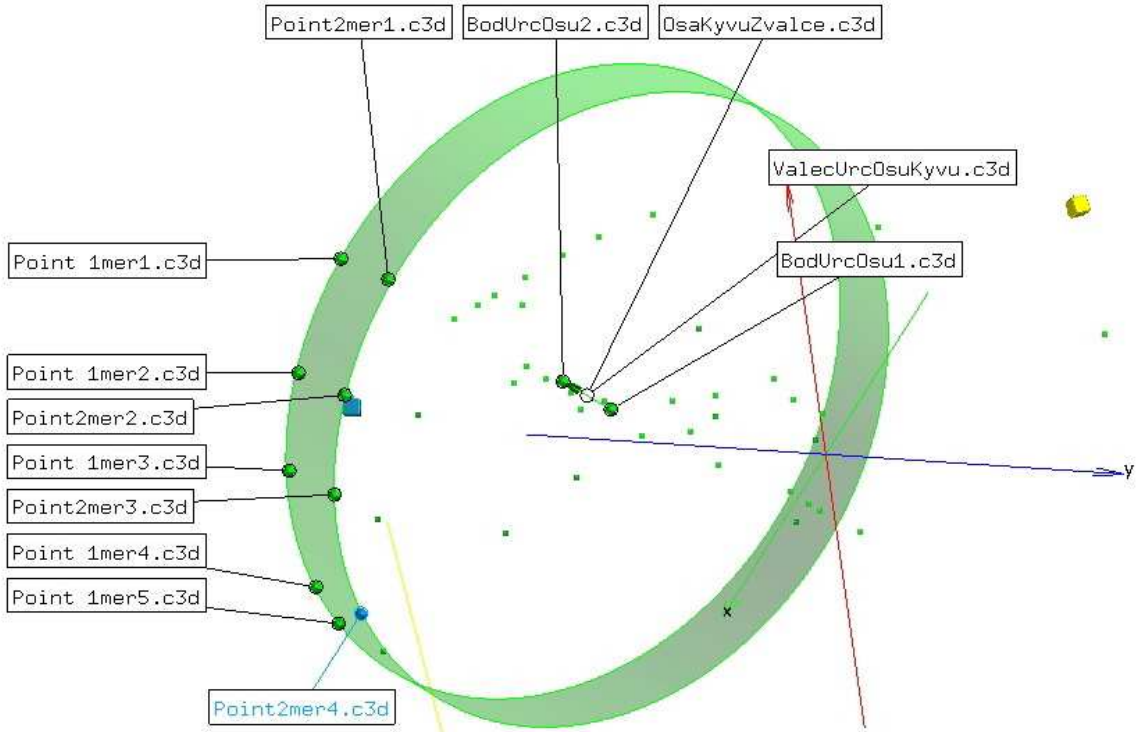
Postup měření:

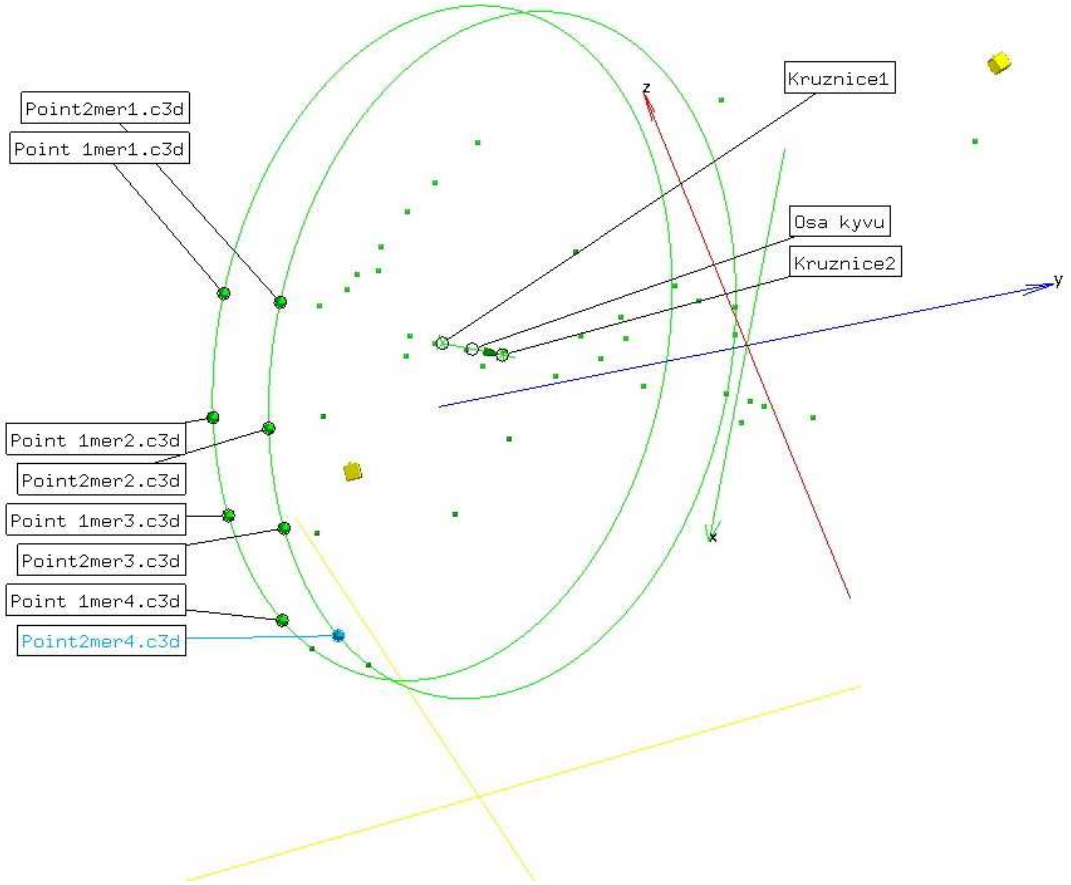
Rameno bylo změřeno stejným způsobem jako v předchozí metodě. V programovém rozhraní systému Tritop jsme vytvořili válec. Požil jsme k tomu dva body na rameni měřené ve čtyřech polohách ramene. Těmito body jsme válec proložili. Osa válce je osou kývání ramene.

Další podobný způsob zjištění osy kyvu je proložením dvou kružnic skrz stejné body jakou u předchozího. Středy kružnic tvoří dva body na ose kývání. Potom je možné osy dále porovnávat.



Obr. 27 Měření ramene uchyceného ve dvou bodech s naznačeným souřadným systémem





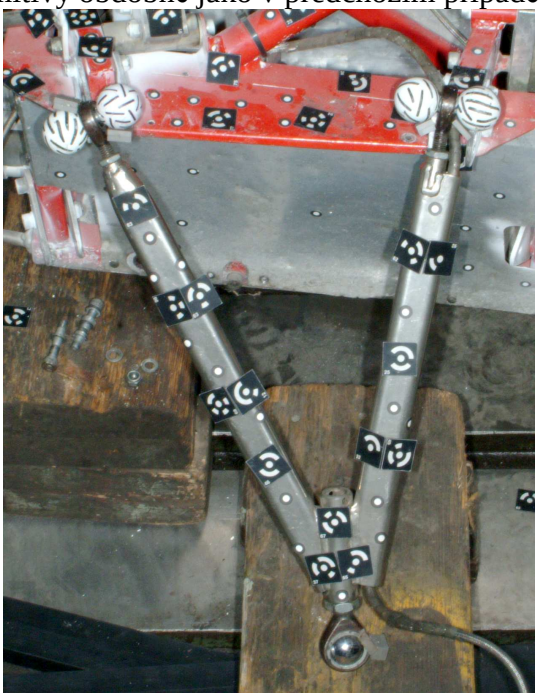
Obr. 28 body proložené válcem a **Obr**. **29** body proložené kružnicemi

5.2.3 Metoda s kulovými tělesy – volně ložená součást zavěšení

Výhodou tohoto způsobu měření je možnost získání kinematických bodů každé součásti mechanismu zavěšení zvlášť. Potom je možné vkládat projekty součástí do jiných projektů měření, například rámu či karoserie. Při měření používáme stejné pomocné prvky jako v kapitole 5.1. Například pro měření úplně nedostupného úchytu je tento způsob nenahraditelný. Dá se použít i pro určení vlivu předpětí při zamontování součásti, jako je například rameno lichoběžníkové nápravy tvaru A.

Postup měření:

Na volně položené rameno jsme přichytili ocelové koule s bílým podkladem a černými čarami. Změřili fotogrammetrickým zařízením Tritop. Přenesli jsme do tohoto měření souřadný systém z projektu měření úchytů za pomoci kulových těles a zjistili souřadnice bodů vzniklých proložením primitivy obdobně jako v předchozím případě.



Obr.30 Měření volně položeného ramene

5.3 Porovnání výsledků měření použitých metod

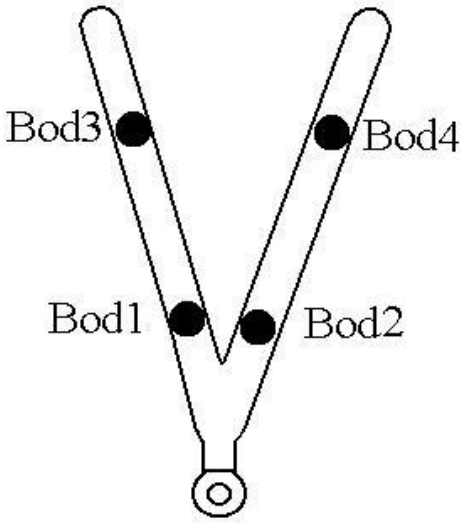
V následující kapitole budou uvedeny výsledky měření a jejich vzájemné porovnání. U některých výsledků bude uvedeno i částečné zhodnocení výsledků a příčin vybraných odchylek.

Pojmenování úchytů:

Definujme si ještě pojem levý úchyt ramene. To je úchyt horního ramene přední lichoběžníkové nápravy, který je blíž přední části vozu. Pravý úchyt je blíže zadní části formule Ford.

5.3.1 Metoda odkývání ramene lichoběžníkové nápravy uchyceného v jednom úchytu v porovnání s metodou měření úchytů s kulovými tělesy

Ukážeme si vzájemnou rozdílnost přímé a nepřímé metody. Obě metody byly naměřeny systémem Tritop. Metoda kývání je popsána v kapitole 5.2.1 a měříme úchyt za pomoci změn poloh ramene. Metodou s kulovými tělesy měříme úchyty přímo na rámu jak je uvedeno v kapitole 5.1.1



Obr.31 Schéma rozložení měřených bodů na rameni a jejich číslování

Tab. 1 Porovnání přímého měření úchytů a měření nepřímého

Porovnání bodů získaných metodou odkývání za pomoci koule vzniklé ze čtyř bodů a bodů úchytů získaných za pomoci kulových těles. Jedná se o levý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Střed kývání bodu 1	-86,60	-350,97	40,53
Střed kývání bodu 2	-88,93	-354,42	40,63
Střed kývání bodu 3	-86,25	-350,41	40,48
Střed kývání bodu 4	-86,48	-353,56	40,79
Bod pomocí koulí	-92,11	-359,40	41,75

V tabulce je vidět velká odchylka mezi metodami, řádově v milimetrech. Ve směru y je to řádově 9 mm! Metodu s kulovými tělesy budeme, vhledem k menšímu počtu potřebných projektů a tím i minimální odchylce pozice počátku souřadného systému a tím i nízké odchylce měření nekódovaných bodů, brát jako přesnější. Odchylky mezi jednotlivými středy úchytů vzniklými z každého z bodů 1, 2, 3 a 4 ve čtyřech polohách proložením koule už jsou řádově v desetinách milimetru. Největší odchylka je ve směru x a to je 7 desetin milimetru.

5.3.2 Porovnání metody odkývání – středy úchytů zjištěné pomocí primitiv, pomocí vypočtených středů a srovnání s metodou s kulovými tělesy

5.3.2.1 Srovnání vypočtených poloh levého úchytu a poloh bodů úchytu získaných proložením koulemi (viz. kapitola 5.2.1)

Zde chceme vidět rozdíl mezi vypočtenými hodnotami a výsledky souřadnic pomocných koulí vytvořených v programovém rozhraní systému Tritop. Vypočtené polohy kinematických bodů jsme získali za pomocí souřadnic bodu, který byl změřen ve čtyřech polohách ramene. Výpočet byl proveden dle vztahu(1). Oboje výsledky ještě srovnáváme s přímou metodou měřenou podle postupu, který je uveden v kapitole 5.1.1

Tab. 2 a **3** Porovnání vypočtených poloh kinematických bodů, bodů vytvořených v programovém rozhraní fotogrammetrického systému Tritop a měření pomocí kulových těles levého úchytu

Porovnání bodů získaných metodou odkývání za pomoci koule vypočtené pomocí souřadnic pěti bodů a bodů úchytů získaných za pomoci kulových těles. Jedná se o levý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Střed kyvu bodu 1	-86,63	-351,10	40,55
Střed kyvu bodu 2	-88,97	-354,47	40,64
Střed kyvu bodu 3	-88,97	-354,47	40,64
Střed kyvu bodu 4	-86,42	-353,51	40,78
Bod pomocí koulí	-92,11	-359,40	41,75

Porovnání bodů získaných metodou odkývání za pomoci proložení bodu ve čtyřech polohách koulí a bodů úchytů získaných za pomoci kulových těles. Jedná se o levý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Střed kyvu bodu 1	-86,60	-350,97	40,53
Střed kyvu bodu 2	-88,93	-354,42	40,63
Střed kyvu bodu 3	-86,25	-350,41	40,48
Střed kyvu bodu 4	-86,48	-353,56	40,79
Bod pomocí koulí	-92,11	-359,40	41,75

V tabulkách **2**. a **3**. jsou patrné rozdíly mezi středy tvořenými ve fotogrammetrickém systému Tritop a středy uchycení ramen vypočtenými dle vzorce(1). Největší odchylkou jsou(bod 3 ve směru y) 4 milimetry. Opět je vidět značný rozdíl mezi měřením a výpočtem. Při srovnání s metodou s kulovými tělesy je zde opět odchylka až 9 milimetrů ve směru y.

5.3.2.2 Srovnání vypočtených poloh pravého úchytu a poloh bodů úchytu získaných proložením koulemi (viz. kapitola 5.2.1)

Další tabulka ukazuje obdobné porovnání, jen porovnává druhý – pravý úchyt.

Tab.4 a **5** Porovnání vypočtených poloh kinematických bodů, bodů vytvořených v programovém rozhraní fotogrammetrického systému Tritop a měření pomocí kulových těles pravého úchytu

Porovnání bodů získaných metodou odkývání za pomoci koule vzniklé z pěti bodů a bodů úchytů získaných za pomoci koulí. Jedná se o pravý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Střed kyvu bodu 1	32,66	-159,52	43,54
Střed kyvu bodu 2	31,26	-162,36	43,43
Střed kyvu bodu 3	29,94	-166,10	43,49
Střed kyvu bodu 4	24,78	-175,20	42,93
Bod pomocí koulí	38,15	-147,21	43,95

Porovnání bodů získaných metodou odkývání za pomoci koule vypočtené pomocí souřadnic čtyř bodů a bodů úchytů získaných za pomoci kulových těles. Jedná se o pravý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Střed kyvu bodu 1	32,69	-159,47	43,54
Střed kyvu bodu 2	32,37	-159,99	43,51
Střed kyvu bodu 3	31,08	-163,69	43,57
Střed kyvu bodu 4	34,02	-156,65	43,67
Bod pomocí koulí	38,15	-147,21	43,95

5.3.2.3 Vliv odchylky jedné souřadnice bodu 1

Dále zhodnotíme vliv odchylky jedné souřadnice na výsledky výpočtu souřadnic středů uchycení. Odchylka Δ bude desetina milimetru.
Tabulka vypočtených hodnot levého úchytu v horní poloze podle vztahu (1).

Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Bod1	-86,63	-351,10	40,55

$x := 145.5$ $y := -414.$ $z := -147.6$ $\Delta := 0.1$

$x_1 := 205.4$ $y_1 := -423.6$ $z_1 := -12.3$ $x_\Delta := x + \Delta$

$x_2 := 193.6$ $y_2 := -411.0$ $z_2 := 146.4$

$x_3 := 161.7$ $y_3 := -384.9$ $z_3 := 215.2$

Given

$$\left[\left(x_\Delta - x_0\right)^2 + \left(y - y_0\right)^2 + \left(z - z_0\right)^2\right] = r^2$$
$$\left[\left(x_1 - x_0\right)^2 + \left(y_1 - y_0\right)^2 + \left(z_1 - z_0\right)^2\right] = r^2$$
$$\left[\left(x_2 - x_0\right)^2 + \left(y_2 - y_0\right)^2 + \left(z_2 - z_0\right)^2\right] = r^2$$
$$\left[\left(x_3 - x_0\right)^2 + \left(y_3 - y_0\right)^2 + \left(z_3 - z_0\right)^2\right] = r^2 \qquad (2)$$

$$\text{Find}\left(x_0, y_0, z_0, r\right) = \begin{pmatrix} -87.15 \\ -351.774 \\ 40.562 \\ 305.903 \end{pmatrix}$$

Je patrné, že výsledná souřadnice po přidání Δ k první hodnotě souřadnice x, má odchylku největší ve směru y 0,67 mm .Ve směru x je to 0,52 mm a v poslední odlišnost je ve směru z a to 0,01 mm. Odchylku ve směru z lze z důvodu nízké hodnoty zanedbat. Vyplívá z toho to, že metoda odkývání ať za pomoci primitiv fotogrammetrického zařízení Tritop, tak výpočtová, má velmi nízkou přesnost. Proto pro měření kinematických úchytů zavěšení není příliš vhodná. Ať už z hlediska časové náročnosti, tak i z hlediska přesnosti měření.

5.3.3 Porovnání metody s kulovými tělesy při měření úchytů na rámu a středů úchytů zjištěných pomocí metody vloženého volného ramene.

V kapitole chceme ukázat vliv předpětí ramene v zamontovaném stavu ve srovnání s ramenem nepředepnutým. Každý úchyt má tři výškové možnosti montování. Rameno je při tomto způsobu měření umisťováno do úchytů v různých výškách. Jako například vlevo v horním uchycení a vpravo v dolním. Popis metody a postup měření volné součásti je v kapitole 5.2.3

Tab. 6 Naměřené hodnoty

Uchyceno vlevo v horním úchytu a vpravo v dolním			
	Vložené volné rameno		
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
levý bod ramene	-91,65	-359,39	42,06
pravý bod ramene	43,71	-150,46	25,03
Body úchytů získané za pomoci kulových těles			
levý bod úchytu	-92,11	-359,4	41,75
pravý bod úchytu	43,36	-150,42	24,50

Tab. 7

Uchyceno vlevo ve středním úchytu a vpravo v dolním			
	Vložené volné rameno		
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
levý bod ramene	-89,51	-361,07	31,84
pravý bod ramene	43,89	-150,31	24,93
Body úchytů získané za pomoci kulových těles			
levý bod úchytu	-89,76	-361,95	32,45
pravý bod úchytu	43,16	-150,98	24,54

Tab.8

Uchyceno vlevo ve středním úchytu a vpravo v horním			
	Vložené volné rameno		
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
levý bod ramene	-89,05	-360,16	31,76
pravý bod ramene	38,20	-147,19	44,08
Body úchytů získané za pomoci kulových těles			
levý bod úchytu	-89,39	-360,78	31,49
pravý bod úchytu	38,15	-147,21	43,95

Tabulky ukazují malý rozdíl mezi metodami. Tabulce uchycení vlevo ve středním úchytu a vpravo v dolním je vidět největší odchylka ve směru y a to 9 desetin milimetru, ve směru x jsou to již jen 3 desetiny milimetru. Tyto odchylky připisujeme vlivu předpětí ramene v zamontovaném stavu. Mohou činit právě několik desetin milimetru.

5.3.4 Porovnání vložení volného ramene do jiného projektu a středů úchytů zjištěných pomocí systému Atos

Jako další možnost pro srovnání je projekt volně loženého ramene „vložen“ za pomoci transformace souřadného systému do projektu odkývání ramene za jeden úchyt. Jde nám o zjištění rozdílů ve výsledcích měření mezi nepřímou metodou vkládání ramene a přímou za pomoci pomocných těles zařízením Atos.

Tab.9 a **10** Porovnání nepřímé metody měření volného ramene s měřením systémem Atos

Porovnání bodů získaných metodou vložení volného ramene do projektu odkývání ramene. Body uchycení jsou získané za pomoci kulových těles. Jedná se o levý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Vložené rameno do měření 3	-92,25	-360,70	41,95
Body naměřené systémem Atos			
levý bod úchytu	-92,18	-359,53	41,78

Porovnání bodů získaných metodou vložení volného ramene do projektu odkývání ramene. Body uchycení jsou získané za pomoci koulí. Jedná se o pravý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Vložené rameno do měření 5	38,78	-146,47	44,37
Body naměřené systémem Atos			
pravý bod úchytu	38,01	-147,19	43,93

Vzniklé odchylky jsou způsobeny transformací souřadného systému, nedokonalým usednutím kulových těles do otvorů a také chybou měření.
Faktory ovlivňující přesnost měření zařízením Atos jsou: transformace souřadného systému, usazení pomocného válcového tělesa s vůlí, chyba měření-nízký počet bodů v navazujících snímcích(viz. kapitola 4.1.2) Ve skutečnosti je obtížné zjistit jaká konkrétní chyba danou odchylku způsobuje.

5.3.5 Porovnání přímých metod měření úchytů na rámu

Dalšímu srovnání podrobíme metody přímého měření úchytů na rámu experimentálního vozidla. Nejdříve bude uvedeno měření pomocí systému Tritop. použitá metoda měření je uvedena v kapitole 5.1.1

Tab.11 Naměřené hodnoty přímou metodou pomocí kulových těles

Body naměřené pomocí kulových těles			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
levý horní bod úchytu	-92,11	-359,40	41,75
levý střední bod úchytu	-89,39	-360,78	31,49
levý dolní bod úchytu	-86,61	-362,28	21,52
pravý horní bod úchytu	38,15	-147,21	43,95
pravý střední bod úchytu	40,64	-148,68	34,24
pravý dolní bod úchytu	43,36	-148,68	24,54

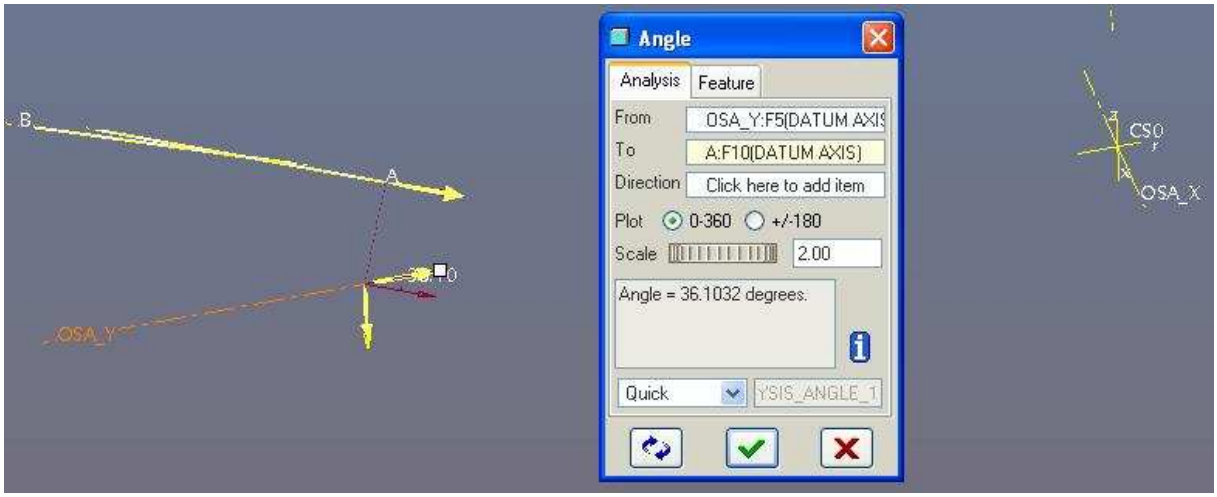
Tab.12 Naměřené hodnoty přímou metodou pomocí systému Atos

Body naměřené systémem Atos			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
levý horní bod úchytu	-92,18	-359,53	41,78
levý střední bod úchytu	-89,62	-360,9	31,3
levý dolní bod úchytu	-86,58	-362,36	21,14
pravý horní bod úchytu	38,01	-147,19	43,93
pravý střední bod úchytu	40,39	-148,46	33,96
pravý dolní bod úchytu	43,34	-150,27	24,18

Nejvyšší odchylka je mezi měřením souřadnice levého dolního úchytu a to je 0,38 milimetru.
Vzniklé odchylky jsou způsobeny transformací souřadného systému, nedokonalým usednutím kulových těles do otvorů a také chybou měření.
Faktory ovlivňující přesnost měření zařízením Atos jsou: transformace souřadného systému, usazení pomocného válcového tělesa s vůlí, chyba měření-nízký počet bodů v navazujících snímcích(viz. kapitola 4.1.2) Předpoklad vyšší přesnosti než u měření systémem Tritop se vyhodnocením měření splnil.

5.3.6 Porovnání metody odkývání při uchycení ve dvou bodech

Zvolili jsme pro toto hodnocení grafickou metodu pro snadné a přehledné měření a hodnocení. Využili jsme proto CAD systém ProEngeneer Wildfire 3.0. V následujícím zhodnocení výsledků budeme porovnávat osy kyvu ramene uchyceného ve dvou bodech. Tyto osy byli vytvořeny metodou uvedenou v kapitole 5.2.2.
Osu kývání získanou za pomoci válce nazveme **A**. Osu tvořenou za pomoci dvou kružnic nazveme **B**. Porovnáváme úhly vychýlení os kývání ramene vůči osám souřadného systému v rovinách XY a YZ



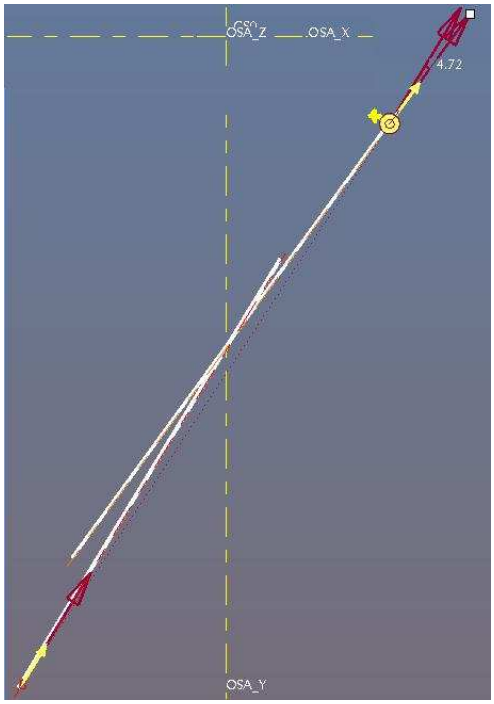
Obr. 32 Systém měření úhlů vůči ose Y

Úhel osy **A** vůči ose Y v rovině XY je 36,103° , to lze vidět na Obr. 31. Další úhlové hodnoty jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab.13 Naměřené úhly os kývání ramene A a B vůči osám souřadného systému v rovinách XY a YZ

Úhly vůči souřadnému systému projektu			
	Rovina XY		Rovina YZ
	Osa X	Osa Y	Osa Z
Osa A	126,073°	36,103°	88,719°
Osa B	121,423°	31,428°	90,53°
Úhel os vůči sobě		Rovina XY	4,719°

Úhel os vůči sobě je znázorněn na Obr. 33

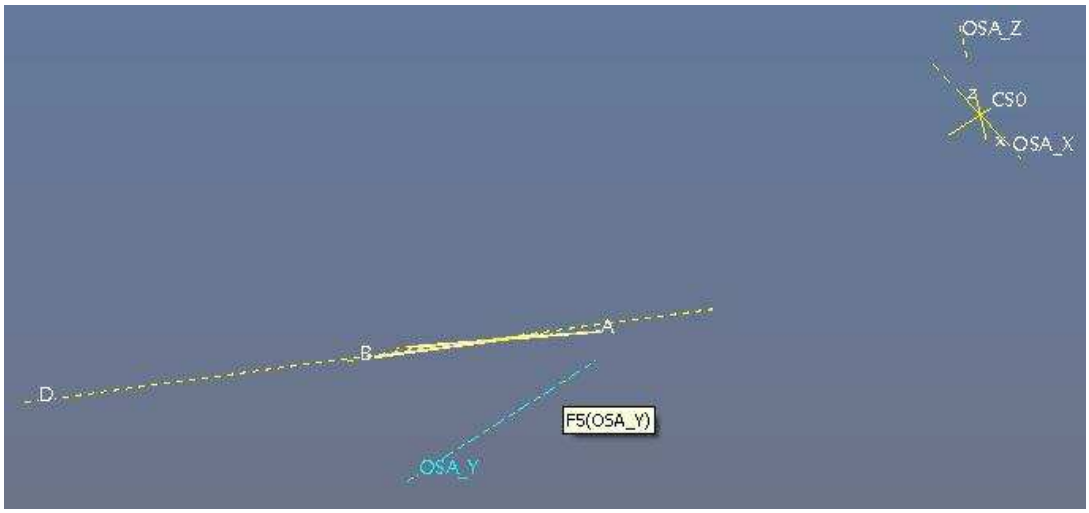


Obr. 33 Úhel mezi osou A a B v rovině XY

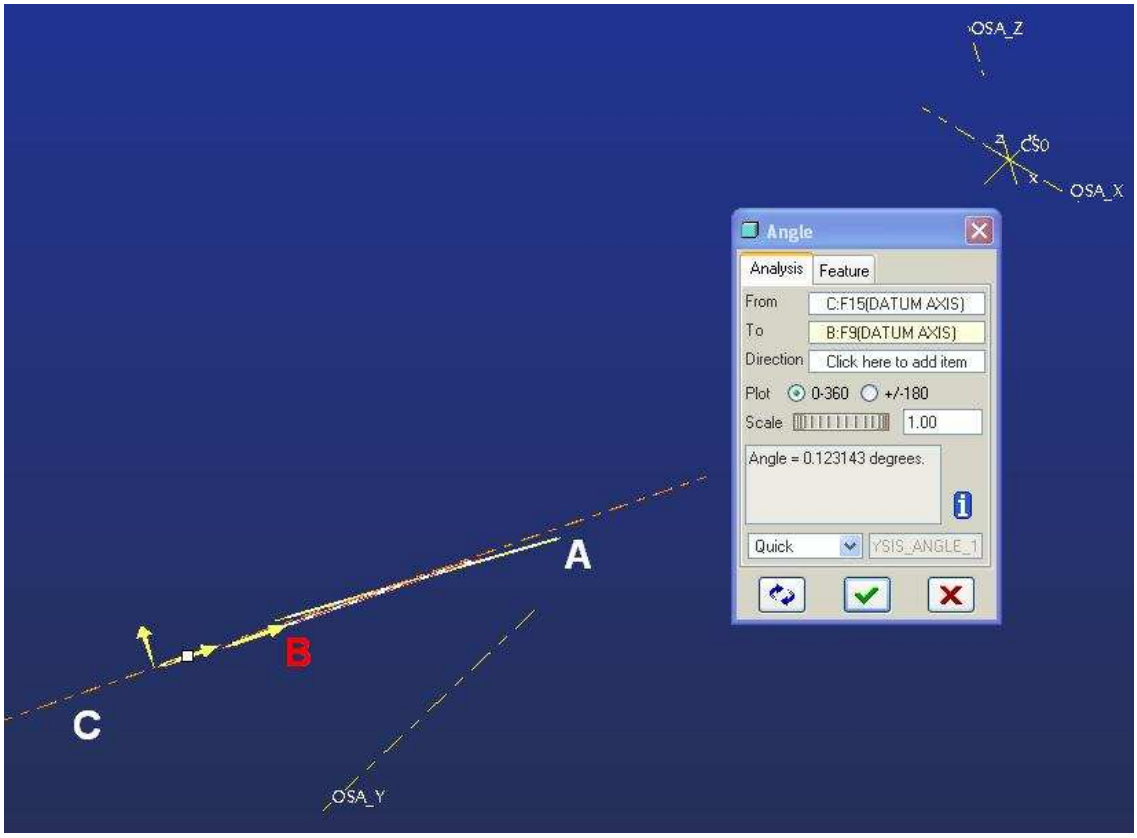
Další porovnání je s osou **C** vzniklou za pomoci bodů z metody s kulovými tělesy a s osou **D** vytvořenou proložením bodů naměřených 3D skenerem Atos. Srovnání ukazuje následující rozšířená tabulka 14.

Tab. 14 Tabulka naměřených úhlů os kývání A, B, C, D vůči osám souřadného systému X, Y, Z v rovinách XY a YZ

Úhly vůči souřadnému systému projektu			
	Rovina XY	Rovina YZ	
	Osa X	Osa Y	Osa Z
Osa A	126,073°	36,103°	88,719°
Osa B	121,423°	31,428°	90,53°
Úhel osy B vůči C		Rovina XY	0,123°
Osa C	121,54°	31,549°	90,506°
Osa D	121,521°	31,517°	90,495°



Obr.34 Pozice os v prostoru



Obr. 35 Měření úhlu mezi osami **B** a **C**

Měřením jsme zjistili, že nejméně přesná je metoda tvorby osy kývání pomocí proložení bodů válcem. Ostatní úhly dalších porovnávaných metod se nějak zásadně neliší.

5.3.7 Metoda vložení volného ramene

Volné rameno bylo vloženo do čtyřech jiných projektů měření. Dostali jsme souřadnice poloh kinematických bodů závěsu, které jsme podrobili statistickému zpracování.

Tab.15

Porovnání bodů získaných metodou vložení volného ramene do projektu odkývání ramene. Body uchycení jsou získané za pomoci koulí. Jedná se o levý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Měření1	-91,59	-361,32	42,29
Měření2	-91,92	-360,16	42,36
Měření3	-92,25	-360,70	41,95
Měření4	-86,42	-353,51	40,78

Tab. 16

Porovnání bodů získaných metodou vložení volného ramene do projektu odkývání ramene. Body uchycení jsou získané za pomoci koulí. Jedná se o pravý úchyt, horní poloha.			
Souřadnice	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Měření1	39,16	-146,42	44,48
Měření2	38,94	-146,44	44,50
Měření3	38,77	-146,45	44,36
Měření4	38,71	-146,31	44,20
Měření5	38,78	-146,47	44,37

Příklad výpočtu odchylek měření pro tuto metodu:
Levý úchyt, statistiky měření
Všechny číselné hodnoty jsou udávány v milimetrech
Osa X
Aritmetický průměr X

$$x_a := \begin{pmatrix} -91.59 \\ -92.01 \\ -92.25 \\ -86.42 \end{pmatrix} \qquad n := 4 \qquad a := \sum x_a \qquad a = -362.27 \qquad X := \frac{1}{n} a \qquad X = -90.567$$

Směrodatná odchylka jednoho měření S_X Směrodatná odchylka aritmetického průměru s_X:

$$b := \sum \left(X - x_a\right)^2 \qquad b = 23.159$$

$$S_x := \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot b} \qquad S_x = 2.778$$

$$s_x := \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot b} \qquad s_x = 1.389$$

Další hodnoty už jsou uvedeny tabulkovou formou.

Tab.17 Tabulka statistických hodnot vypočítaná z měření

	Levý úchyt		
	X	Y	Z
Aritmetický průměr	-90,567	-358,923	41,845
S_X	2,778	3,639	0,732
s_X	1,389	1,82	0,0366
	Pravý úchyt		
Aritmetický průměr	38,872	-146,418	44,382
S_X	0,182	0,063	0,12
s_X	0,081	0,028	0,054

6. Měření kinematických úchytů nápravy McPherson

Požadavkem je co možná nejméně rozmontovat mechanismus zavěšení. Většinou je ale minimálně částečné rozebrání závěsu nutné. Měření je značně obtížné, důvodem je špatný přístup zespodu vozidla. Každý výrobce využívá více či méně odlišné konstrukce nápravy McPherson, proto je těžké vyvinout univerzální metodu měření kinematických úchytů náprav použitelnou na všechny druhy podvozků. Problémem digitalizačních zařízení Atos a Tritop je velká prostorová náročnost pro provedení měření. Takže je nutné měřené vozidlo umístit na zvedák, aby byl umožněn přístup k částem nápravy. I tak se ale do nějakých míst, potřebných pro snímání překrývajících se snímků nebo naskenování dostatečného počtu referenčních bodů(viz. kapitola 4.1.2 a 4.2.2), nedostaneme.
Nejobtížněji zjistitelný kinematický bod zavěšení je střed uchycení horní části pružící a tlumící jednotky nápravy McPherson. Prvek je uchycen otáčivě v ložisku a toto ložisko je umístěno v pryžovém lůžku s poměrně nízkou tuhostí. V zamontovaném stavu se při zatáčení pohybuje celá pružící a tlumící jednotka jak otáčivě, tak stranově a s ní i kinematický bod.

Obr. 36 Ukázka zavěšení Mc Pherson Škody Fabia

6.1 Měření optickými zařízeními Tritop a Atos

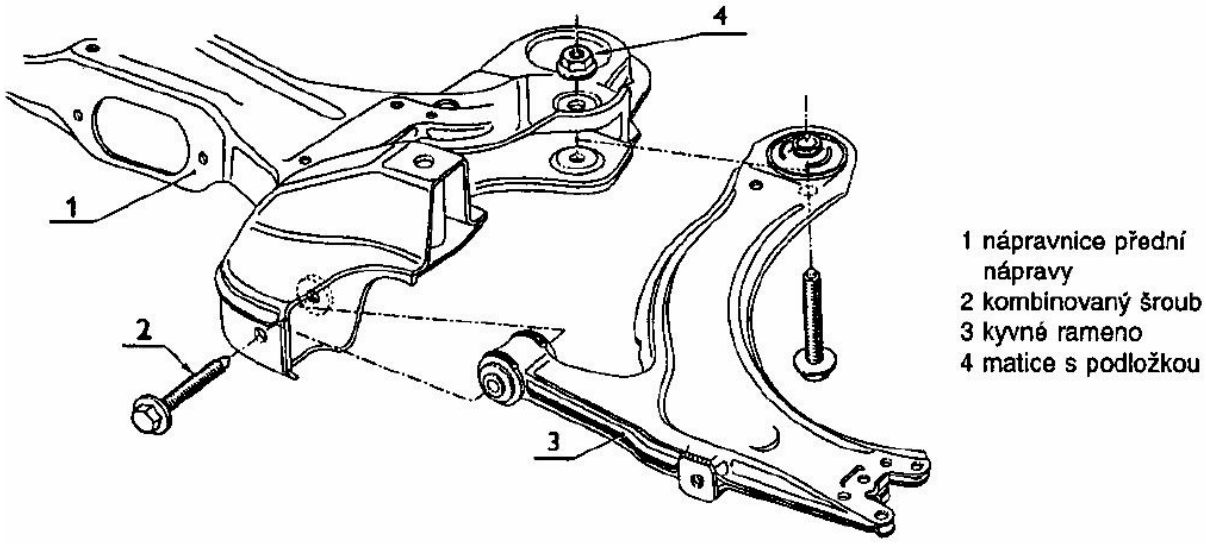
6.1.1. Přímé měření úchytů na karoserii

Vozidlo musí být kvůli přístupu k měřeným částem na sloupovém zvedáku. Po rozmontování nápravy lze přímo měřit úchyty ramene. Je nutné k tomu využít pomocná tělesa, jako jsou násuvné body, válec s osou, a nebo vektorové terče(podrobnější popis je v kapitole 5.1.)

Problém nastává u měření kulového kloubu, u kterého střed přímo neurčíme. Lze jej doměřit kýváním, ale jsou nutné přípravky s kontrastními vlastnostmi označující polohu osy kužele kloubu. Tento postup použijeme při měření využitím Tritopu. U měření Tritopem může nastat problém jak uchytit kalibrační tyče zespodu vozu tak, aby se v žádném případě nepohnuly.
U měření systémem Atos lze naskenovat část kulové plochy kulového kloubu při odstraněné gumové prachovce. Proložením vzniklé plochy koulí v programovém rozhraní získáme střed kloubu – střed proložené koule. Hrozí poškození prachovky při demontáži.

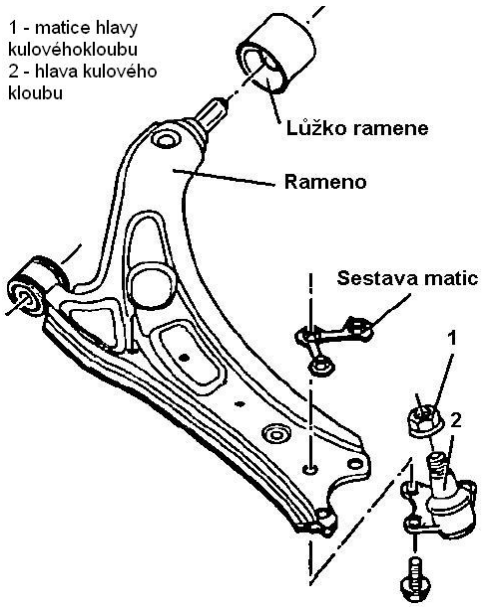
6.1.2. Nepřímé měření kinematických bodů zavěšení

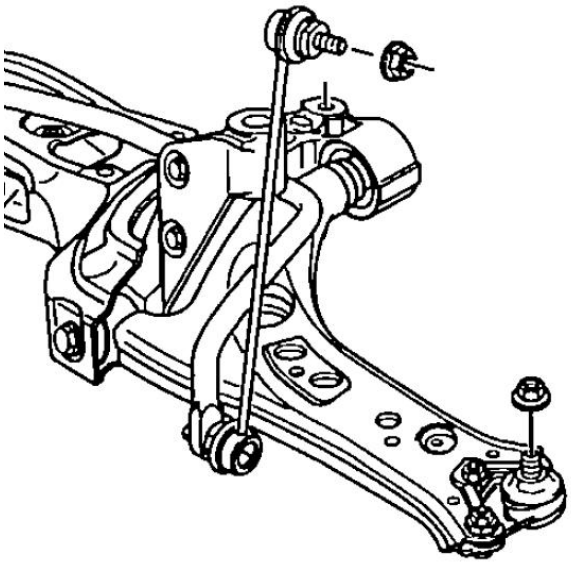
Použijeme metodu odkývání za jeden úchyt. Pozice pryžových kloubů ramena vozidla například Škoda Octavia I umožňuje použít odkývání, při zamontování v jednom kloubu, jenom zadního kloubu (viz. Obr. 37). Kývání ramene upevněného za jeden z úchytů není dostatečně přesné, ale je nevyhnutelné. Dále můžeme měřit osu kývání ramene zamontovaného v nápravnici. Vyjde nám osa kývání.



Obr.37 Ukázka ramene a jeho uchycení vozu Škoda Octavia[11]

Rameno typu jako je Škoda Fabia I můžeme odkývat uchycené ve dvou kloubech. Upevnění pouze v jednom pryžovém lůžku a měření ramene v několika polohách nám neumožňuje tuhost pryže, rameno dostatečně nevyosíme také kvůli nedostatku volného prostoru v nápravnici, jak je patrné z Obr.38. Dostaneme pouze osu kývání. Středy kloubu doměříme díky pomocným bodům a posuvnému měřítku. Měření kulového kloubu Tritopem bez přípravku nelze změřit a musíme jej odkývat.





Obr.38 Rameno Škoda Fabia/Roomster Rameno zamontované v nápravnici[12]

Natáčením pružící a tlumící McPherson jednotky řízením získáme rejdovou osu podobným způsobem jako u metody kývání ramene zamontovaného ve dvou úchytech. Na ose leží jak střed kulového kloubu ramene, tak střed uchycení vzpěry McPherson. Polohu kinematického úchyt jednotky zjistíme pomocí stranového pohybu referenčních bodů na měřeném objektu.

6.2 Metoda geometrická identifikace automobilového zavěšení založená na analýze pohybu součástí – překlad[5]

Metoda je založena na měření souřadnic referenčních bodů na každé součásti mechanismu při různých případech zatížení. Tato měření umožňují výpočet pohybu součástí pracujícího mechanismu, bez nutnosti rozebrání mechanismu. S využitím těchto informací, je navržena metodu identifikace všech kloubů(vazeb) které jsou na mechanismu zavěšení kol. Numerické ověření této metody je vedeno na zavěšení pseudo - Mc.Pherson.

6.2.1 Zjišťování pohybu součástí

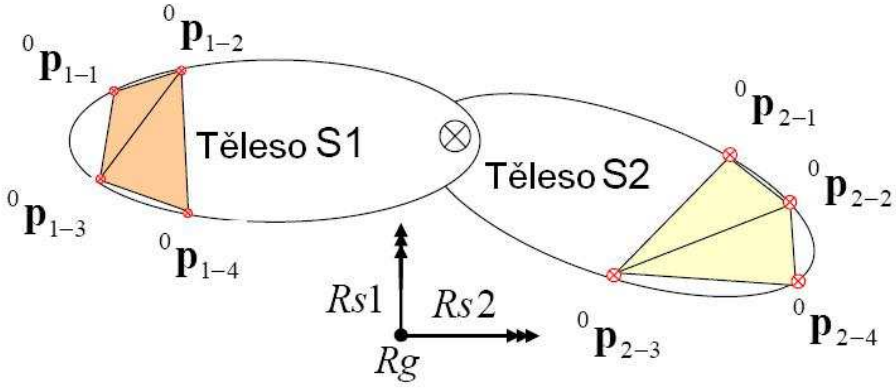
V případě výpočtu pohybu součásti na sestaveném zavěšení jsou na každé součásti mechanismu umístěny čtyři referenční body, také nazývány „značky“. Značkami jsou malé konické otvůrky na součástech v místech kde lze snadno změřit souřadnice na sestavené nápravě za pomoci přenosného zařízeni pro měření souřadnic vybaveného kulovou sondou. Víme že minimální počet bodů pro výpočet pozice a orientace pevné součásti v prostoru jsou tři. Nicméně, byly použity čtyři značky kvůli zlepšení spolehlivosti v případě chyby měření. Není vyžadováno přesné umístění značky. Značky umisťujeme dostatečně daleko od sebe tak, aby byly dobře přístupné pro měření souřadnic. První měření je prováděno při standardním případu zatížení vozidla: dva lidé o hmotnosti 75kg vpředu a plná nádrž. Toto měření musí být prováděno ve stejném souřadném systému užitém pro modelování zavěšení.
Globální souřadný systém *Rg* je definován tak, že osa Z je orientována vertikálně, osa X směřuje vpřed podle podélné osy vozidla, počátek souřadného systému je ve středu mezi dvěma kontaktními plochami pneumatik. Souřadnice každé ze značek jsou změřeny a

výsledky jsou uloženy v souboru typu IGES. Analýzou souboru určíme soustavu čtyř pozičních vektorů pro každou součást *s*:

$$\left[{}^{0}\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rg} = \left[{}^{0}x_{s-a} \quad {}^{0}y_{s-a} \quad {}^{0}z_{s-a}\right]^{T} \quad 1 \le a \le 4. \tag{2}$$

V rovnici, je index *0* přiřazen případu zatížení, index *s* určuje číslo součásti a index *a* značí číslo značky.

Počáteční stav mechanismu reprezentuje Obr. 39.



Obr. 39 a – Referenční případ zatížení

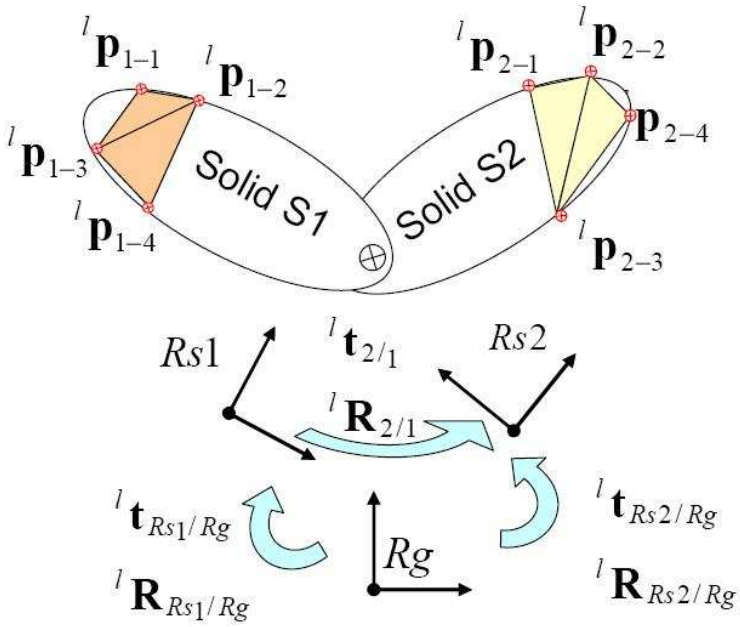
Pro výpočet pohybu součásti je nutné definovat lokální souřadný systém *Rs* na každé součásti *s*. Pro zjednodušení následujících výpočtů, všechny *Rs* převedeme do *Rg*. Důsledkem je shoda souřadnic značek v *Rs* a *Rg*:

$$\left[\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rs} = \left[{}^{0}\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rg} \tag{3}$$

Aby bylo možné analyzovat pohyb součásti v mechanismu, musí být souřadnice značek změřeny při různých polohách pérování. Následně je proto nutné měnit zatížení vozidla a v případě přední nápravy pohnout řízením. Pro každý případ zatížení *l*, stlačení mezi pozicí *l* a *lmax*, je měřena pozice každé značky:

$$\left[{}^{l}\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rg} = \left[{}^{l}x_{s-a} \quad {}^{l}y_{s-a} \quad {}^{l}z_{s-a}\right]^{T} \tag{4}$$

Kde index *l* znamená případ zatížení.



Obr. 40 b – Případ zatížení *l*

Souřadnice všech značek jedné součásti měřené při referenčním zatížení a jiný případ zatížení l jsou provázány tanslačně-rotační transformací:

$$\left[{}^{l}\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rg} = {}^{l}\mathbf{t}_{Rs/Rg} + {}^{l}\mathbf{R}_{Rs/Rg}\left[\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rs} \qquad (5)$$

V rovnici ${}^{l}\mathbf{t}_{Rs/Rg}$ představuje vektor traslace *Rs* relativně k *Rg* a ${}^{l}\boldsymbol{R}_{Rs/Rg}$ je matice rotace představující orientaci *Rs* vůči *Rg*. Výpočet translace a rotace je úplná úloha orientace a spočívá v minimalizaci kritéria ε dle rovnice:

$$\varepsilon = \sum_{a=1}^{4} \left\| \left[{}^{l}\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rg} - {}^{l}\mathbf{t}_{Rs/Rg} - {}^{l}\mathbf{R}_{Rs/Rg}\left[\mathbf{p}_{s-a}\right]_{Rg} \right\|^{2} \qquad (6)$$

V případě výpočtu kloubu spojujícího dvě součásti *S1* a *S2* je nutné vyjádřit pohyb jedné součásti vůči druhé. Pohyb součásti *S2* relativní k součásti *S2* je reprezentován translací $t_{2/1}$ a rotací $R_{2/1}$.Tyto dvě rovnice popisují pozici *Rs2* relativně k *Rs1* a jsou vypočteny pomocí:

$$\begin{aligned} {}^{l}\mathbf{t}_{2/1} &= {}^{l}\mathbf{R}^{T}_{Rs1/Rg}\left({}^{l}\mathbf{t}_{Rs2/Rg} - {}^{l}\mathbf{t}_{Rs1/Rg}\right) \\ {}^{l}\mathbf{R}_{2/1} &= {}^{l}\mathbf{R}^{T}_{Rs1/Rg} \cdot {}^{l}\mathbf{R}_{Rs2/Rg} \end{aligned} \qquad (7)$$

Na konci měřících operací je pro každý pár součástí v mechanismu známo číslo *lmax* translačně-rotačních transformací. Další sekce vysvětluje jak použít tyto relativní posunutí k výpočtu pozic a orientací kloubů.

6.2.2 Identifikace pozice a orientace kloubu

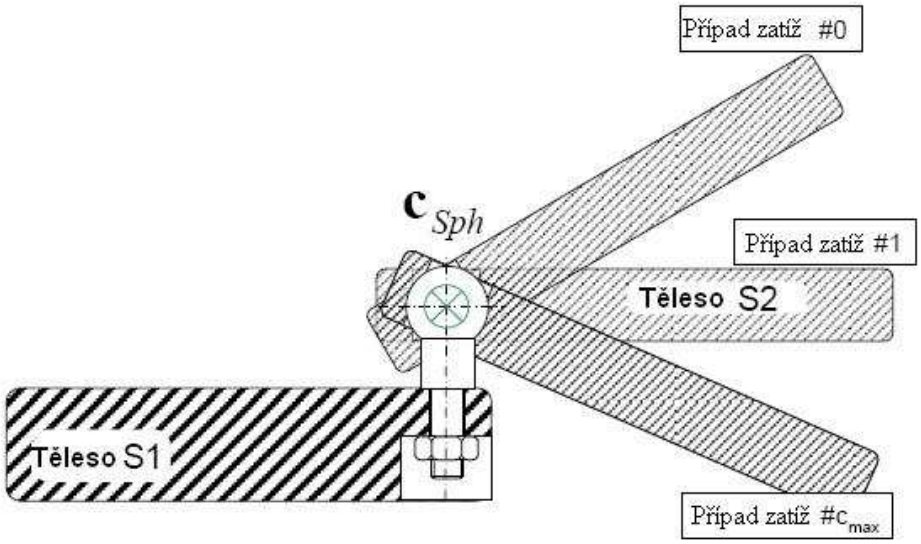
A. Kulový kloub

Pokud kulový kloub spojuje součásti *S1* a *S2*, pak střed kloubu je jediný bod *S2* který se nemůže pohnout vůči S1. Relativní posunutí je prezentováno v Obr.41. Výsledně, středem kulového kloubu je bod, který nebyl modifikován žádnou z *lmax* translačně-rotačních transformací:

$$\mathbf{c}_{Sph} = {}^{l}\mathbf{t}_{2/1} + {}^{l}\mathbf{R}_{2/1} \cdot \mathbf{c}_{Sph} \quad \forall \quad l \in \left[l \ldots l_{\max}\right] \qquad (8)$$

kde c_{Sph} je pozice vektoru středu sférického kloubu:

$$\mathbf{c}_{Sph} = \lfloor x_{Sph} \; y_{Sph} \; z_{Sph} \rfloor \tag{9}$$



Obr. 41

Identifikace vektoru $\boldsymbol{c}_{Sph}$ je možná i za pomoci soustavy lineárních rovnic. Nejprve je modifikována rovnice (8) na jeden neznámý vektor.

$$\left({}^{l}\mathbf{R}_{2/1} - Id_3\right)\mathbf{c}_{Sph} = -{}^{l}\mathbf{t}_{2/1} \;\forall\, l \in [l \ldots l_{\max}] \tag{10}$$

Kde Id_3 je jednotková matice 3x3. Potom všechny případy zatížení jsou považovány za řetězec různých translačně-rotačních transformací.

$$\begin{bmatrix} {}^{l}\mathrm{R}_{2/1} - Id_3 \\ \vdots \\ {}^{l}\mathrm{R}_{2/1} - Id_3 \\ \vdots \\ {}^{\max}\mathrm{R}_{2/1} - Id_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Sph} \\ y_{Sph} \\ z_{Sph} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^{l}\mathrm{t}_{2/1} \\ \vdots \\ -{}^{l}\mathrm{t}_{2/1} \\ \vdots \\ -{}^{l}\mathrm{t}_{2/1} \end{bmatrix} \tag{11}$$

Rovnice (10) je systém tří rovnic l_{max} o třech neznámých. Toto je nenucený problém lineární optimalizace, který může být řešen přímými metodami [8].

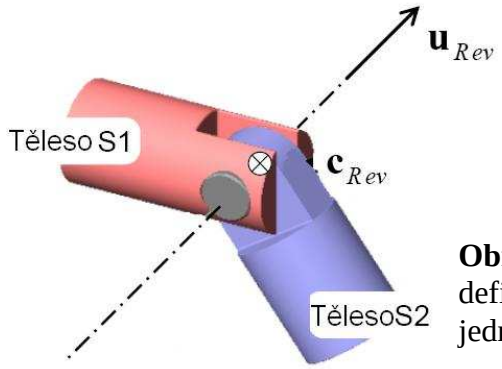
B. Rotační kloub

Pokud rotační kloub spojuje součásti *S1* a *S2*, identifikace musí určit pozici a orientaci osy tohoto kloubu na součástech. K popisu této osy jsme zvolili určující bod $\mathbf{c}_{Rev}$ a jednotkový vektor $\mathbf{u}_{rev}$ jak je vidět na Obr.42. V případě ideálního rotačního kloubu, všechny body součásti *S2* ležící na ose jsou nehybné na součásti *S1*. Proto lze každý bod na ose ověřit:

$$\mathbf{c}_{\mathrm{Re}v} = {}^{l}\mathbf{t}_{2/1} + {}^{l}\mathbf{R}_{2/1} \cdot \mathbf{c}_{\mathrm{Re}v} \quad \forall \quad l \in [l \ldots l_{\max}] \tag{12}$$

Tato rovnice je shodná s rovnicí (7) a stejně jako u kulového kloubu můžeme definovat systém tří skalárních rovnic l_{max} jak je prezentováno v rovnici (10). Matice přidružená tomuto systému bude nazývána $\mathbf{M}_{2/1}$:

$$M_{2/1} = \begin{bmatrix} {}^{l}\mathbf{R}_{2/1} - Id_3 \\ \vdots \\ {}^{l}\mathbf{R}_{2/1} - Id_3 \\ \vdots \\ {}^{l_{\max}}\mathbf{R}_{2/1} - Id_3 \end{bmatrix} \tag{13}$$



Obr. 42 Rotační kloub definovaný použitím bodu a jednotkového vektoru

V zásadě je nekonečno řešení těchto rovnic. Potom matice $\mathbf{M}_{2/1}$ muže být jednotková a mít jádro o rozměru 1. Jádro může být překlenuto jednotkovým vektorem $\mathbf{u}_{\mathrm{Rev}}$ který značí orientaci osy rotačního kloubu.

$$\ker(\mathbf{M}_{2/1}) = \{k\,\mathbf{u}_{\mathrm{Rev}}\}, k \in IR \Rightarrow \mathbf{M}_{2/1}\mathbf{u}_{\mathrm{Rev}} = \mathbf{0} \qquad (14)$$

Pokud je $\mathbf{c}_{Rev}$ partikulární řešení rovnice (11) pak můžeme ověřit že každá suma $\mathbf{c}_{Rev}$ a násobek $\mathbf{u}_{Rev}$ má řešení:

$$\left({}^{l}\mathbf{R}_{2/s1} - Id_3\right)\cdot \mathbf{c}_{\mathrm{Rev}} = -{}^{l}\mathbf{t}_{2/1} \Rightarrow \left({}^{l}\mathbf{R}_{2/s1} - Id_3\right)\left(\mathbf{c}_{Rrev} + k\mathbf{u}_{\mathrm{Rev}}\right) = -{}^{l}\mathbf{t}_{2/1} \forall k \in IR \qquad (15)$$

Ale ve skutečnosti, kvůli nejistotám měření a skutečnému chování součástí a kloubů, $\mathbf{M}_{2/1}$ není singulární. Potom je možné nalézt bod $\mathbf{c}_{Rev}$ který minimalizuje nejmenší čtvereční kritérium rovnici 11. K výpočtu orientace osy použijeme jednotlivé hodnotové rozkládání $\mathbf{M}_{2/1}$:

$$\mathbf{M}_{2/1} = \mathbf{U}\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3\end{bmatrix}\mathbf{R}^{T}_{\mathrm{Rev}} \qquad (16)$$

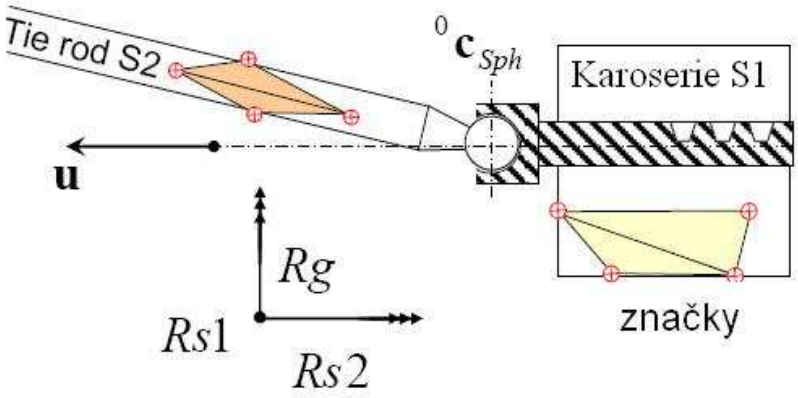
V tomto vyjádření, λ_1,λ_2 a λ_3, jsou jednotlivé hodnoty $M_{2/1}$ a R_{Rev} je rotační matice 3x3 indikující jednotlivé směry. Pokud má $\mathbf{M}_{2/1}$ blízko k jednotkové matici, pak by jednotlivé hodnoty měli být daleko menší než dvě další. Jednotlivé směry korespondují s jednotlivými hodnotami je nejlepší odhad osy rotace rotačního kloubu. Pokud λ_3 je nejnižší jednotlivá hodnota, $\mathbf{u}_{Rev}$ je dána:

$$\mathbf{u}_{\mathrm{Rev}} = \mathbf{R}_{\mathrm{Rev}}\begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix}^{T} \qquad (17)$$

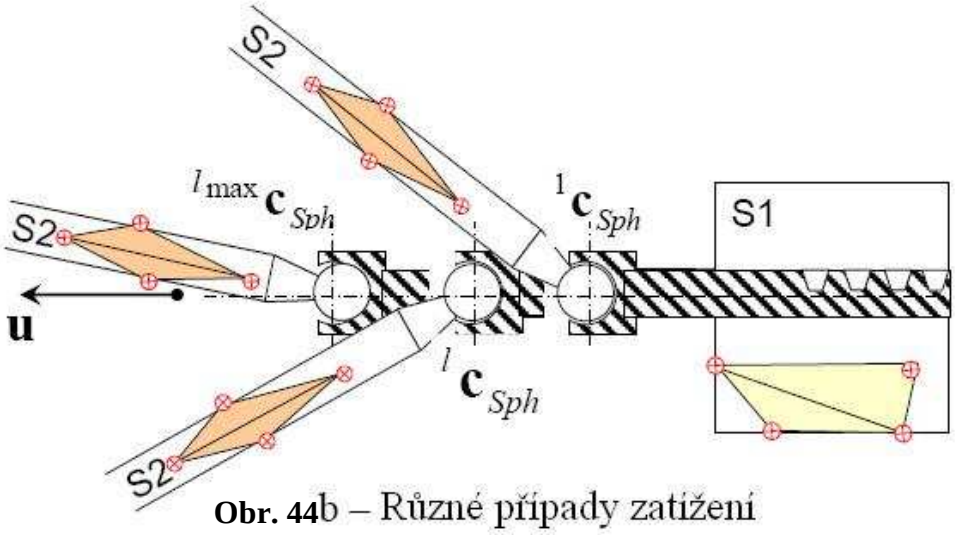
V automobilovém zavěšení je důležité umístění kulového kloubu spojujícího hřeben řízení se spojovací tyčí, které má velký vliv na chování vozidla. Ale není možné experimentálně zjistit posunutí hřebenu řízení. Tato součást je chráněna a zastavěna ostatními součástmi. Proto budeme polohu tohoto kloubu $\mathbf{c}_{Sph}$ a translační směr $\mathbf{u}$ počítat z vypočteného pohybu spojovací tyče vůči karoserii.

Obrázek 41 reprezentuje tento systém. Obrázek 43a ukazuje mechanismus při referenčním zatížení. Pozice ${}^{0}\mathbf{C}Sph$ a směr $\mathbf{u}$ může být definována v globálním souřadném systému *Rg*. Obr. 44b představuje různé možné pozice spojovací tyče při zatáčení. Je vidět, že střed kulového kloubu $l\mathbf{c}_{Sph}$ se pohybuje po směru $\boldsymbol{u}$. Hřeben řízení je spojen s karoserií translační vazbou. Střed kulového kloubu $\mathbf{c}_{Sph}$ se pohybuje po přímce pokud zatáčíme s řízením. Pokud spočteme tenzor setrvačnosti mraku bodů představovaného všemi $l\mathbf{c}_{Sph}$, moment setrvačnosti ve směru $\boldsymbol{u}$ bude nulový. Následné pozice $\mathbf{c}_{Sph}$ na karoserii *S1*jsou dány:

$${}^{l}\mathbf{c}_{Sph} = {}^{l}\mathbf{t}_{2/1} + {}^{l}\mathbf{R}_{2/1}\cdot c_{Sph} \quad \forall \quad l \in [l \ldots l_{\max}] \qquad (18)$$



Obr. 43 a – Referenční zatížení



Obr. 44b – Různé případy zatížení

Těžiště mraku bodů G je dáno:

$$\mathbf{G} = [x_G \quad y_G \quad z_G]^T = \frac{1}{l_{\max}} \sum_{l=1}^{l\max} {}^l\mathbf{c}_{Sph} \tag{19}$$

potom je možné vypočíst tenzor setrvačnosti τ_G mraku bodů v těžišti za pomoci této rovnice:

$$\tau_G = \sum_{l=1}^{l\max} \begin{bmatrix} {}^lz_\Delta^2 + {}^ly_\Delta^2 & -{}^lx_\Delta \cdot {}^ly_\Delta & -{}^lx_\Delta \cdot {}^lz_\Delta \\ -{}^lx_\Delta \cdot {}^ly_\Delta & {}^lz_\Delta^2 + {}^lx_\Delta^2 & -{}^lz_\Delta \cdot {}^ly_\Delta \\ -{}^lx_\Delta \cdot {}^lz_\Delta & -{}^lz_\Delta \cdot {}^ly_\Delta & {}^ly_\Delta^2 + {}^lx_\Delta^2 \end{bmatrix} \tag{20}$$

kde je x_Δ, y_Δ a z_Δ jsou dány:

$${}^l\mathbf{c}_\Delta = [{}^lx_\Delta \quad {}^ly_\Delta \quad {}^lz_\Delta]^T = {}^l\mathbf{c}_{Sph} - \mathbf{G} \tag{21}$$

Z tenzoru setrvačnosti můžeme spočítat vlastní hodnoty a vlastní vektory:

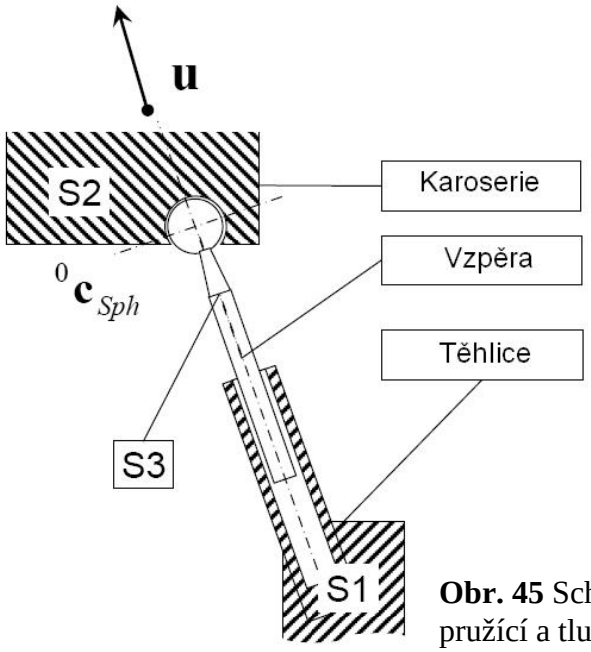
$$\tau_G = [u \quad v \quad w] \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} [u \quad v \quad w]^T \tag{22}$$

V této rovnici **u**,**v**, a **w** jsou vlastní vektory určující osy setrvačnosti. I_1, I_2, a I_3 jsou charakteristické hodnoty představující momenty setrvačnosti. Pokud jsou všechny body $l\mathbf{c}_{Sph}$ na jedné přímce, pak by jedna hybnost měla být nulová a odpovídající charakteristický vektor má translační směr, směr hřebenu řízení. Ale ve skutečnosti , kvůli nepřesnostem měření a

skutečnému chování kloubů a součástí, nemůže být nalezena ideálně nulová hybnost. Nicméně jedna charakteristická hodnota by měla být daleko menší než ostatní.
K nalezení pozice kulového kloubu autoři zvolili hledání bodu, který minimalizuje nejmenší hodnotu τ_G. Tento nelineární úlohu řešíme za pomoci Nelder Meadova jednosměrného algoritmu.

D. Pružné klouby

Pružné klouby, také nazývané silentbloky, jsou rozsáhle používány v automobilových zavěšeních ke zmírnění vibrací a zlepšení komfortu vozidla. Silentblok je většinou vyroben tak že, mezi dvěma ocelovými válci různého průměru je navulkanizována guma. Tyto klouby představují problém. Jejich geometrická identifikace tak jako jejich chování závisí na parametrech tuhosti a působících silových zatíženích. V této fázi procesu modelování jsou oboje tato data neznámá. Proto jen nutné aproximovat umístění pružného kloubu za pomoci metody pro kloub kulový.



Obr. 45 Schematické znázornění pružící a tlumící vzpěry McPherson

E.Pružící a tlumící vzpěra McPherson

Nejběžnějším zavěšením kol na osobních vozidlech je náprava McPherson a její deriváty.V tomto typu zavěšení je těhlice spojena s karoserií jednotkou pružiny s tlumičem. Spojení nechává těhlici tři stupně volnosti rotace a jeden translace vzhledem ke karoserii. Proto je možné použít metodu prezentovanou v předchozí části pro zjištění osy jednotky a pozici spoje jednotky s karoserií. Ale zde je spojení karoserie a jednotky zajištěno pružným kloubem. Následkem toho, výsledkem nemusí být přesné umístění kloubu.

6.2.3 Numerické ověření

Proto abychom dokázali metodu prezentovanou v tomto listu, byl napsán program Matlab aby samočinně postupně vykonával výpočty popsané výše. Program je schopen načítat soubory měření IGES. Posunutí jsou vypočtena pro každý stav zatížená. Po té je aplikován identifikační algoritmus na každý kloub podle jeho typu. Výsledný soubor vypíše seznam kloubů s jejich polohami a orientací. První ověření programu bylo provedeno za použití dat obdržených numerickou simulací.

Elastokinematický model pseudo zavěšení Mc Pherson je použit jako referenční systém pro porovnání. Tento model byl vytvořen v simulačním softwaru Adams/Car. Fotografie na obrázku 6 představuje původní mechanismus zavěšení. Na fotografii byla nastíněna poloha značek. Rohy každého z mnohoúhelníků ukazují polohu čtveřice značek na součástech. Obrázek 6 ukazuje odpovídající elastokinematický model. Chování zavěšení je simulováno při proměnlivém svislém zatížení působícím na kolo a pohybující se v rozmezí od 1kN do 7 kN, a hodnota pohybu hřebenu řízení je mezi -40mm a + 40mm. Souřadnice všech referenčních bodů jsou ukládány pro 9 různých poloh modelu zavěšení.

Na základě výsledků je aplikována identifikační metoda a vypočtené polohy kloubů a vazeb jsou porovnány s původními na elastokinematickém modelu.Tabulka 1 udává rozdíl vzdáleností mezi původní polohou každého z kloubů a zjištěnou polohou v milimetrech. Je vidět že polohy kulových kloubů jsou identifikovány správně. Poloha kulového kloubu na hřebenu řízení je také identifikována správně. Ale vypočtená poloha pružných kloubů se liší od původní polohy na referenčním modelu. Nicméně, navržená metoda dává dobrý odhad polohy kloubu. V případě elastického kloubu s vysokou tuhostí dovolujícího pouze malé výchylky je odchylka 1mm. Zatímco v případě volnějšího kloubu umožňující výchylku několik milimetrů je přesnost identifikace 3mm. V případě pružící a tlumící vzpěry McPherson je odchylka 7mm stěží uspokojující. Ale mělo by být vyzvednuto, že orientace osy vzpěry je identifikována správně.

Tab. 18 Výsledky geometrické identifikace

S1	S2	Kloub	Chyba polohy(mm)
Těhlice	Přední rameno	Kulový	0,0
Těhlice	Zadní rameno	Kulový	0,0
Těhlice	Spojovací tyč	Kulový	0,0
Karoserie	Spojovací tyč	kulový + posuvný	0,0
Karoserie	Přední rameno	Pružný	3,2
Karoserie	Zadní rameno	Pružný	1,0
Vzpěra	Karoserie	Pružný + válcový	6,9

7. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit metodiku měření kinematických bodů lichoběžníkové nápravy a nápravy McPherson s využitím zařízení Tritop. Na základě opakovaných měření porovnat vhodnost využití zařízení Tritop a Atos pro měření kinematických bodů zavěšení. Navrhnout vhodné přípravky pro měření kinematických bodů zavěšení s využitím zařízení Tritop.
Metodika měření byla vytvořena za přispění zkušeností vedoucího diplomové práce a studentských projektů z předchozích let. Měření byla realizována na vozidle formule Ford 1600 v laboratoři VUT v budově D5.
Při práci se systémem Tritop se ukázalo, že dodržení podmínek přesného měření není snadné. Konkrétně jde o zajištění polohy kalibračních tyčí. Je nutné měření opakovat pro dosažení požadované přesnosti. Tato skutečnost se jeví jako značná nevýhoda prodlužující dobu měření a tím i následné zpracování naměřených dat. Přesnost metody měření úchytů ramen na rámu pomocí kulových těles je srovnatelná s přesností měření pomocí systému Atos. Ostatní metody měření už nedosahují požadované přesnosti v rozmezí 0,1 až 0,3 mm.
Na základě srovnání lze konstatovat, že při dodržení popsaných podmínek měření, je metoda zjištění kinematických bodů zavěšení kol s využitím systému Tritop vhodná pro běžná dvoustopá vozidla včetně závodních typů s řízenou přední nápravou.
Měření systémem Atos je nejpřesnější z použitých metod. Při obsluze dvou zkušených techniků je i velmi rychlé. Je vhodné pro závodní automobily formulového typu. Systém není příliš vhodný pro vozidla se samonosnou karoserií díky špatnému přístupu ke kinematickým úchytům.
Předmětem dalšího zkoumání by mělo být měření ramene formule Ford v několika polohách pomocí odkývání s využitím zařízení Tritop. Měření by se zpracovalo jako jeden projekt, do kterého bychom přidávali fotografie ramene v různých polohách. Rameno by mělo být uchyceno za jeden nebo dva úchyty k rámu. Eliminovala by se tím chyba polohy souřadného systému vznikající při měření více projektů. Otázkou stále zůstává, jak spolehlivě by program zařízení Tritop načítal přidané snímky ramene po změně polohy, protože u systému není vhodné hýbat měřeným předmětem. Přesnost měření se díky zmíněnému pohybu může značně zhoršit.

Jako přípravky pro měření zavěšení s využitím zařízení Tritop byli vyvinuty násuvné body, které se umisťují místo upevňovacích šroubů ramen nápravy. Byla také zpracována výkresová dokumentace, která je součástí příloh diplomové práce.

Seznam použitých symbolů a zkratek:

a	[mm]	Součet souřadnic
A	[-]	Osa kývání vzniklá metodou odkývání
b	[mm]	Směrodatná odchylka jednoho měření
B	[-]	Osa kývání vzniklá metodou odkývání
$\mathbf{c}_{Sph}$	[mm]	Vektor pozice středu kulového kloubu
$\mathbf{c}_{rev}$	[mm]	Vektor pozice bodu ležícího na ose rotačního kloubu
C	[-]	Osa kývání vzniklá měřením zařízením Tritop
D	[-]	Osa kývání vzniklá měřením zařízením Atos
G	[-]	Těžiště mraku bodů
$\mathbf{M}_{2/1}$	[-]	Matice přidružená souřadnému systému
n	[-]	Počet provedených měření
r	[mm]	Souřadnice vypočteného poloměru koule
${}^{l}\mathbf{R}_{Rs/Rg}$	[-]	Orientace souř. systému *Rs* vůči *Rg* pro případ zatížení *l*
${}^{l}\mathbf{R}_{2/1}$	[-]	Orientace souř. systému *Rs2* vůči *Rs1* pro případ zatížení *l*
Rg	[-]	Hlavní(globální) souřadný systém pro zavěšení
Rs	[-]	Lokální souřadný systém součásti S
s_X	[mm]	Směrodatná odchylka aritmetického průměru
S_X	[mm]	Směrodatná odchylka jednoho měření
${}^{l}\mathbf{t}_{Rs/Rg}$	[-]	Pozice souř. systému *Rs* vůči *Rg* pro případ zatížení *l*
${}^{l}\mathbf{t}_{2/1}$	[-]	Pozice souř. systému *Rs2* vůči *Rs1* pro případ zatížení *l*
$\mathbf{u}_{rev}$	[mm]	Jednotkový vektor osy rotačního kloubu
x	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 1
x_1	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 2
x_2	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 3
x_3	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 4
x_Δ	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 1 s přírůstkem Δ
y	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 1
y_1	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 2
y_2	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 3
y_3	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 4
z	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 1
z_1	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 2
z_2	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 3
z_3	[mm]	Souřadnice bodu ve směru x poloha 4
x_0	[mm]	Souřadnice vypočteného kinematického bodu ve směru x
y_0	[mm]	Souřadnice vypočteného kinematického bodu ve směru y
z_0	[mm]	Souřadnice vypočteného kinematického bodu ve směru z
x_a	[mm]	Matice hodnot souřadnic x
X	[mm]	Aritmetický průměr
Δ	[mm]	Přírůstek k souřadnici
τ_G	[-]	Tenzor setrvačnosti mraku bodů

Seznam použité literatury:

[1] VLK,F. Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-238-5273-6, Nakladatelství VLK, Brno 2000.
[2] VLK,F. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. ISBN 80-234-6573-0, Nakladatelství VLK, Brno 2000.
[3] GOM mbH: User manual TRITOP v 5.3.0, GOM Optical Measuring Techniques, Germany 2004
[4] POWELL, A.D. Developing a Photogrammetry Based System for Measuring As Assembled Suspension Geometry , Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, Fort Collins 2006.
[5] MEISSONIER, J. FAROUX, J.C. GOGU, G. C.MONTEZIN, C. Geometric identification of a car suspension mechanism based on part displacement analysis. World Congress, Besançon (France), June18-21, 2007
[6] www.mcae.cz/ATOS_CS.html
[7] http://www.mcae.cz/TRITOP_Deformation_CS.html
[8] http://www.solidvision.cz/digitalizace-a-mereni/
[9] http://www.3dgrafika.cz/index.php?id=1150&search=rhino
[10] http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main05.html
[11] CEDRYCH, M.R. Automobily Škoda Octavia a Octavia Combi. ISBN 80-7169-565-3, Grada Publishing, spol. s.r.o., 1999
[12]CEDRYCH, M.R. Automobily Škoda Fabia, ISBN 80-247-0077-8, Grada Publishing, spol. s.r.o., 2001

Seznam příloh:

- CD-ROM s diplomovou prací
- Výkresová dokumentace:
  - 5 – S31 – 01/01 Násuvný bod