

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Virtual Prototyping
Návrh protézy dolní končetiny

POJEDNÁNÍ K STÁTNÍ DOKTORSKÉ ZKOUŠCE

Vědní obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Doc. Ing. Josef ŠUPÁK, CSc.
Doktorand: Ing. David Paloušek
Počet stran: 21
V Brně 21. 7. 2005

OBSAH

1	SEZNAM ZKRATEK	1-3
2	ÚVOD	2-4
3	ÚVOD DO PROBLEMATIKY VIRTUAL PROTOTYPINU	3-5
3.1	POČÍTAČOVÁ PODPORA (CA SYSTÉMY)	3-5
3.1.1	<i>Integrace CA systémů</i>	3-6
3.2	VIRTUAL PROTOTYPING A PRODUKT LIFECYCLE MANAGEMENT	3-7
4	VIRTUAL PROTOTYPING	4-8
4.1	DEFINICE VIRTUAL PROTOTYPING.....	4-8
4.2	MODEL	4-9
4.2.1	<i>Geometrický model</i>	4-9
4.2.1.1	Jádro	4-9
4.2.1.2	Datové formáty.....	4-9
4.2.1.3	Vizualizace	4-10
4.2.1.4	2D→3D	4-10
4.2.1.5	Fyzikální vlastnosti.....	4-10
4.2.1.6	Vytvoření prototypových řad.....	4-10
4.2.1.7	Kolizní stavy	4-10
4.2.1.8	Výkresová dokumentace	4-10
4.2.1.9	Paralelní konstruování	4-10
4.2.2	<i>Model MKP</i>	4-11
4.2.2.1	Software pro CAE	4-12
4.2.3	<i>Technologický model</i>	4-12
4.2.3.1	Software pro CAM	4-12
4.2.3.2	Základní vlastnosti a možnosti CAM programů:.....	4-12
5	VYUŽITÍ DIGITÁLNÍCH DAT V NÁVRHOVÉ ETAPĚ	5-13
5.1	RAPID PROTOTYPING	5-13
5.2	REVERSE ENGINEERING – 3D DIGITALIZACE.....	5-13
5.2.1	<i>3D digitalizace</i>	5-14
5.2.2	<i>Systém Tritop a Atos</i>	5-14
6	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	6-14
7	ZVOLENÝ POSTUP ŘEŠENÍ	7-15
7.1	TVORBA 3D DIGITÁLNÍHO MODELU	7-15
7.2	INŽENÝRSKÉ VÝPOČTY	7-15
7.3	DALŠÍ VÝSTUPY	7-16
8	DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	8-17
8.1	NÁVRH PROTÉZY DOLNÍ KONČETINY POMOCÍ NÁSTROJŮ VIRTUAL PROTOTYPINGU.....	8-17
8.1.1	<i>Protézy</i>	8-17
8.1.2	<i>Konstrukce protézy</i>	8-18
9	LITERATURA	9-19
9.1	ZÍSKANÉ POZNATKY A ZÁVĚR.....	9-20
10	LITERATURA	10-21

1 SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam anglicky	Význam zkratky česky
CA	Computer Aided	Počítačová podpora
CAA	Computer Aided Assembly	Počítačová podpora montáží
CAD	Computer Aided Design	Počítačová podpora konstruování
CADD	Computer Aided Design and Drafting	Digitalizační zařízení
CAE	Computer Aided Engineering	Počítačová podpora inženýrských výpočtů
CAEA	Computer Aided Engineering Analysis	Počítačová podpora v oblasti analýz
CAI	Computer Aided Inovation	Počítačová podpora inovací
CAI	Computer Aided Inspection	Počítačově automatizovaná kontrola kvality
CAIS	Computer Aided Information System	Počítačová podpora projektování informačních systémů
CAL	Computer Aided Logistic	Počítačová podpora logistiky
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačová podpora výroby
CAMP	Computer Aided Management Production	Počítačová podpora managementu výroby
CAO	Computer Aided Organisation	Počítačová podpora organizaci
CAP	Computer Aided Programming	Počítačová podpora programování
CAP	Computer Aided Planning	Počítačová podpora procesu plánování
CAPE	Computer Aided Production Engineering	Problematika technologičnosti, tvorba technologických postupů
CAPP	Computer Aided Process Planning	Počítačová podpora v oblasti plánování
CAQ	Computer Aided Quality	Počítačová podpora kvality, řízení jakosti
CA-R	Computer Automatic-Robots	Počítačová automatizace robotů
CASE	Computer Aided Software Engineering	Počítačová podpora softwarovému inženýrství
CAT	Computer Aided Testing	Počítačová automatizace měření a testování
CIM	Computer Integrated Manufacturing	Počítačově integrovaná výroba
CMPP	Computer Management Procese Planing	Počítačová podpora procesu plánování výroby součástí
CRM	Customer Relationship Management	Řízení vztahu se zákazníkem
EDM	Engineering Data Management	Elektronická správa dokumentů
EIS	Engineering Information System	Výkonný informační systém
ERP	Enterprise Resource Planning System	Systémy (software) pro podnikové řízení, plánování a sledování
FEA	Finite Element Analysis	Metoda konečných prvků
FM	Facility Management	Správa majetku, systém pro evidenci, údržbu a analýzu dat
HRM	Human Resource Management	Správa a řízení lidských zdrojů
HTML	Hyper Text Markup Language	Jazyk virtuálních objektů na webu
IGES	Initial Graphics Exchange Specification	Výměnný souborový formát pro CAD data
MKO		Metoda konečných objemů
MKP		Metoda konečných prvků
MIS	Management Information System	Automatizovaný řídicí informační systém
PDM	Product Data Management	Elektronická správa dat o výrobku
PLM	Product Lifecycle Management	Správa produktových dat během celého životního cyklu výrobku

RP	Rapid Prototyping	Rapid Prototyping (technologie)
STEP	STandard for Exchange of Product model data	Výměnný souborový formát (ISO 10303)
VP	Virtual Prototyping	Virtuální navrhování
VRML	Virtual Reality Modeling Language	Jazyk virtuální reality
VET	Viewpoint Experience Technology	Řešení publikování 3D dat na webu

2 Úvod

Snaha plně popsat (geometricky, fyzikálně apod.) výrobek a odhalit možné vady a provozní problémy ještě během návrhu, vede k potřebě používat takové nástroje, které zaručí minimalizaci nákladů, optimalizaci výroby a dodržení požadované kvality. Zvláště minimalizace nákladů a současné dodržení stanovené kvality vybízí k nasazení softwarových nástrojů, které umožní získat komplexní informace z oblasti geometrie, výpočtů a simulace a umožní zkrácení doby výroby.

Využití výpočetní techniky v oblasti strojírenství je v současné době již nutností a v podstatě standardem. Díky rychlému vývoji v oblasti elektrotechniky, zvláště mikroprocesorové techniky, jsou softwarové nástroje používané dříve jen velkými firmami dostupné i pro menší subjekty a uživatele. Největší rozvoj zaznamenala zřejmě oblast počítačové podpory konstruování (CAD). Ale i v oblastech inženýrských výpočtů (CAE) a počítačové podpoře výroby (CAM) dochází k prudkému vývoji a orientaci na různé skupiny uživatelů. I přes nutnost specializace v jednotlivých odvětvích strojírenského průmyslu (konstrukce, technologie, výpočtové nástroje, řízení podniku, marketing a další) je poptávka po integraci a ujednacení jak softwarových nástrojů pro dané firemní řešení, tak celého systémového řešení.

Možnost ověřit chování budoucího produktu ještě před samotnou výrobou poskytuje prostor pro zjištění kritických provozních stavů a odhalení možných příčin závad. K dispozici je několik softwarových nástrojů. Pro numerické řešení deformačně-napjatostních úloh se standardně využívá metody konečných prvků (případně dalších numerických metod v závislosti na typu úlohy). Pro odhalení dynamického chování soustav jsou často používány tzv. multibody systémy, které na základě znalosti geometrie a kinematiky simulují reálně možné provozní stavy.

Těžištěm celého návrhového procesu je hlavně samotný model, především popis jeho geometrie, který vstupuje v podstatě do všech etap celého životního cyklu výrobku. Navrhovaný model součásti však není pouze geometrickou prezentací budoucího výrobku, ale data je možné použít k mnohem komplexnějšímu popisu. Většina výrobků se neobejde v etapě návrhu bez základních výpočtů (oblasti statických a dynamických výpočtů, proudění, termodynamiky apod.). Ale stejně důležitou etapou vzniku nového výrobku je etapa výroby. Špatně navržená technologie výroby může zavinit finanční ztráty. Oblast virtuálního navrhování podporuje procesy předcházející těmto situacím.

Předložená práce se zabývá problematikou návrhu, simulace a optimalizace především strojírenských součástí a následným využitím digitálních dat v životním cyklu výrobku. Objasňuje postavení a začlenění Virtual prototypingu v rámci podnikové struktury a definuje vstupy a výstupy dalších navazujících oblastí využívajících digitální data. Principy virtuálního prototypování budou demonstrovány na modelu (kompletním výrobku) protězy dolní končetiny. Práce popisuje v základních rysech problematiku protéz dolních končetin a dosažené výsledky ve spolupráci s firmou ING corporation.

3 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VIRTUAL PROTOTYPINU

Pro odhalení chování součástí a sestav (statických a dynamických soustav, fyzikálních jevů) je s ohledem na zlevnění, ale i zrychlení výroby téměř nutností používat počítačové podpory, konkrétně nástrojů, které umožňují metodicky přistoupit k danému problému. Jedním z těchto nástrojů může být právě virtuální prototypování.

Základní vlastnosti nástrojů Virtual prototypingu

- *různé strojírenské disciplíny* - většina současných strojů, zařízení a dalších systémů jsou výrobky zasahující do nejrůznějších oborů. Obvykle pracují s jevy z různých oblastí mechaniky, dynamiky, elektrotechniky, magnetizmu, fyziky tekutin, termodynamický jevů, apod.
- *různé úrovně pohledu na problém* - možnost popsat chování nebo jevy z pohledu funkčnosti nebo principu, ale také možnost detailního zkoumání jevu nebo problému na stanovené úrovni (např. ověření kinematiky převodu-zkoumání jevů v ložisku).
- *různé úrovně zjednodušení* - V určité situaci může být jednoduchý lineární model nebo zjednodušující parametr plně dostačující pro provedení výpočtu. Na druhé straně nelineární model založený na metodě konečných prvků může být nezbytný pro stejnou součást v jiné situaci (např. v jiném zátěžném stavu).
- *různé způsoby popisu modelu* - někdy je zapotřebí popsat vnitřní topologii nebo geometrii, jindy pouze postačuje popis vnějšího chování (možnost nahrazení modelu např. silou nebo vnějším zatížením)
- *různé způsoby simulace a analýzy* - možnost zkoumání časově stálých nebo proměnných jevů, zkoumání rychlých nebo přechodových jevů (v případě mechanických systémů pak dynamika, kinematika, statika apod.)
- *různé úrovně znalostí a dovedností* - uživatelské prostředí nástrojů by mělo umožňovat práci jak např. studentům nebo nezkušeným uživatelům, tak i inženýrům, kteří denně nepoužívají tyto softwarové produkty v plné šíři a nejsou specialisty
- *zpětnou vazbu* - možnost dle výsledků ovlivňovat a měnit vstupní parametry a hodnoty, určit stupeň přesnosti nebo výsledné hodnoty
- *konektivitu* - vzájemná spolupráce mezi jednotlivými softwarovými produkty (CAD/CAE/CAM), používání standardů
- *vzdálenou spolupráci* - umožnění spolupráce vzdálených nebo oddělených týmů, zpřístupnění dat a technologií menším podnikům, umožnění řešit reálné problémy studentům prostřednictvím např. sítě Internetu (možnost využívat školních licencí apod.)

Prostředky a programové produkty sloužící k simulaci a optimalizaci vytváří a zároveň jsou součástí oblastí CAD/CAE/CAM a multibody systémů [18].

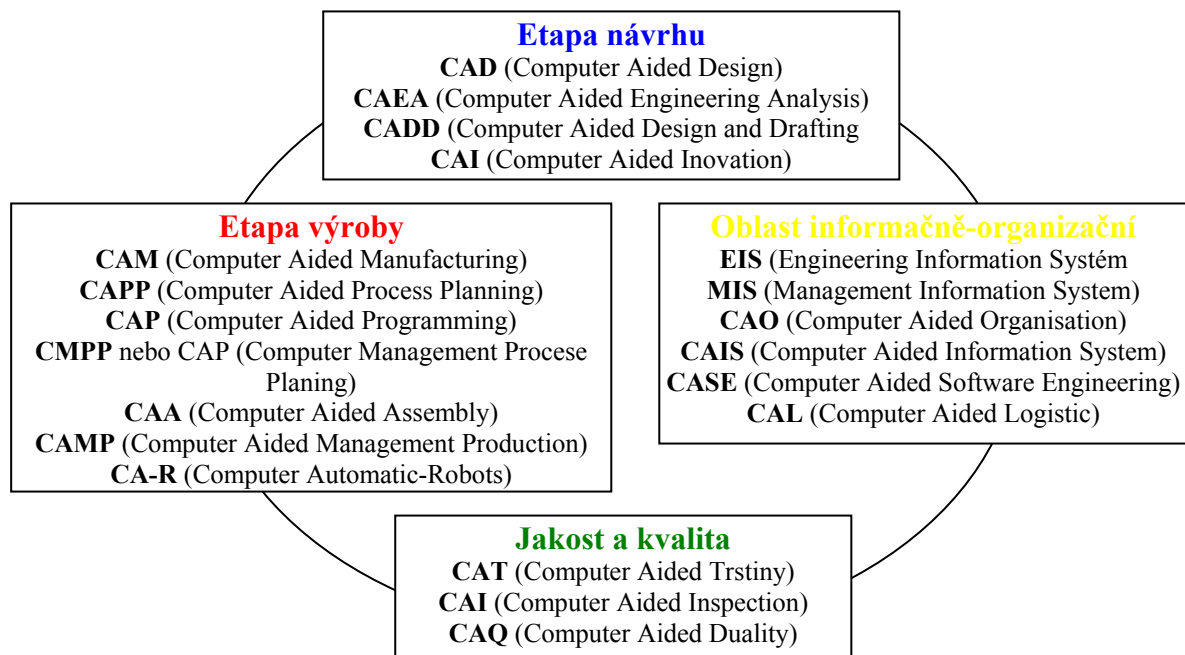
3.1 Počítačová podpora (CA systémy)

Firmy jsou vystaveny celosvětové konkurenci a na jejich výrobky jsou kladeny vysoké požadavky (výkon, efektivita, hmotnost, design, spolehlivost, trvanlivost, cena a další). Nároky na zkrácení doby vývoje technického objektu jsou neustále vyšší a morální životnost výrobku se neustále zkracuje. Je třeba vyvíjet rychle a efektivně, vyrábět levně a kvalitně. Cílem podniku je s co nejnižšími náklady dosahovat vysokých zisků. Toho lze docílit minimalizací nákladů již na počátku celého výrobního procesu. Cenu mohou pozitivně ovlivnit konstruktéři a technologové ovládající nástroje pro návrh, optimalizaci a ověření vyrobitelnosti výrobku. Značnou úsporou je omezení počtu prototypů a následné zabránění zmetkové výrobě. Vyrobit levně kvalitní výrobek znamená jistotu, že bude dodržena funkčnost a budou splněny předem dané podmínky. Počítačová podpora (CA systémy) umožňuje zkrátit dobu vývoje od návrhu, analýzy, kontroly,

výroby, automatizace, podnikové logistiky a další. Téměř na každou činnost v podniku lze aplikovat počítačovou podporu. [6]

Mezi nejdůležitější podnikové a vnitropodnikové činnosti patří:

- informační (získávání informací pro jednotlivé fáze řešení)
- tvůrčí (vytváření nových přístupů, metod, objektů)
- rozhodovací a řídicí
- organizační (podmínky k realizaci)



Obr. 3. 1: Uplatnění CA systémů v etapách výroby

3.1.1 Integrace CA systémů

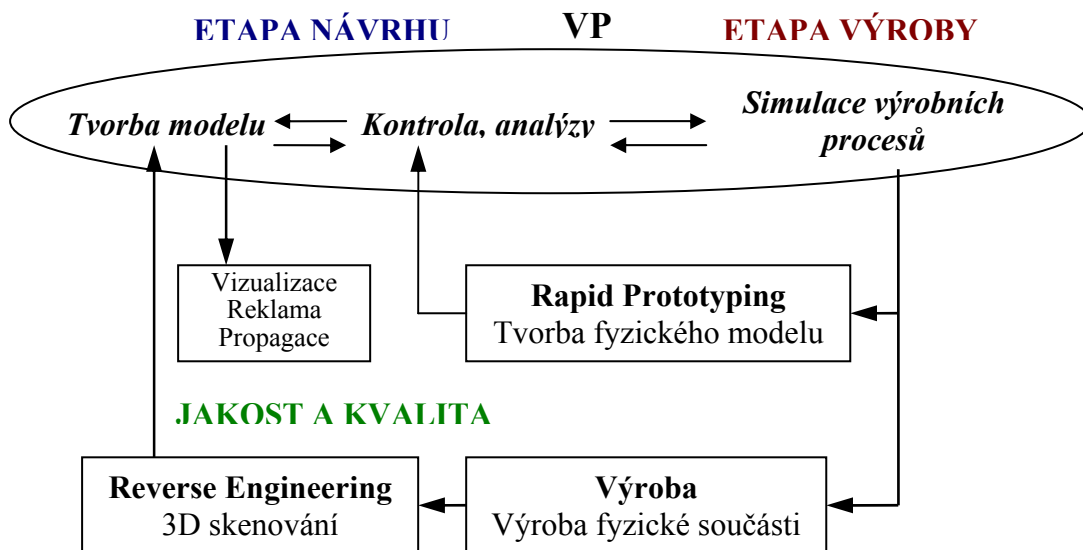
Integrace počítačové podpory zaznamenala několik úrovní vývoje. Jednotlivé oblasti stojící nejprve osamocně, přinesly jen malé zvýšení efektivity inženýrských činností. Teprve sloučení, integrace, provázanost přináší potřebné zrychlení, zlevnění, zefektivnění procesu návrhu a samotné výroby.

Úroveň 0: počítačové podpory vzniku TO jsou izolované

Úroveň 1: integrace se realizuje na úrovni jednotlivých etapách vzniku TO, hlavně v oblasti návrhu (CAD, CADD, CAD\CAE).

Úroveň 2: Integrace mezi jednotlivými etapami vzniku TO (CAD\CAM, CAM\CAQ, CAD\CAEA\CAQ\CAM)

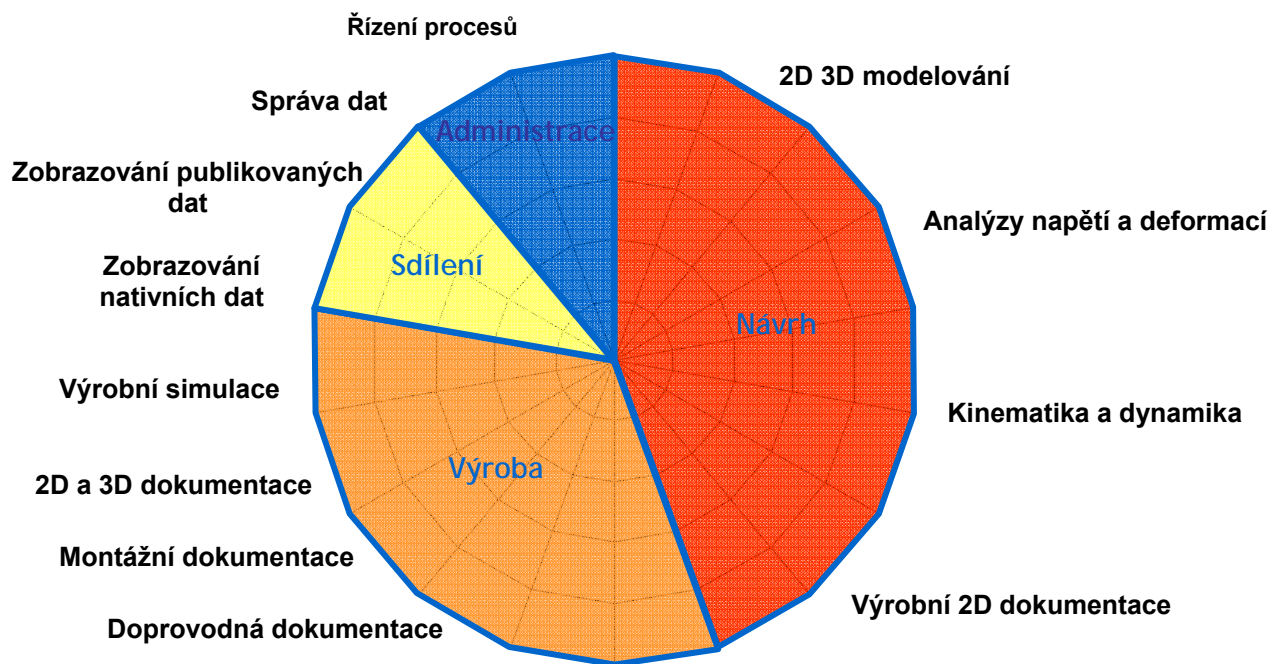
Úroveň 3: Tento stav je reprezentován CIM [1], počítačově integrovaná výroba zasahuje od návrhu přes výrobu, řízení kvality, až po distribuci, propagaci, reklamu.



Obr. 3. 2: Virtual Prototyping v etapách výroby

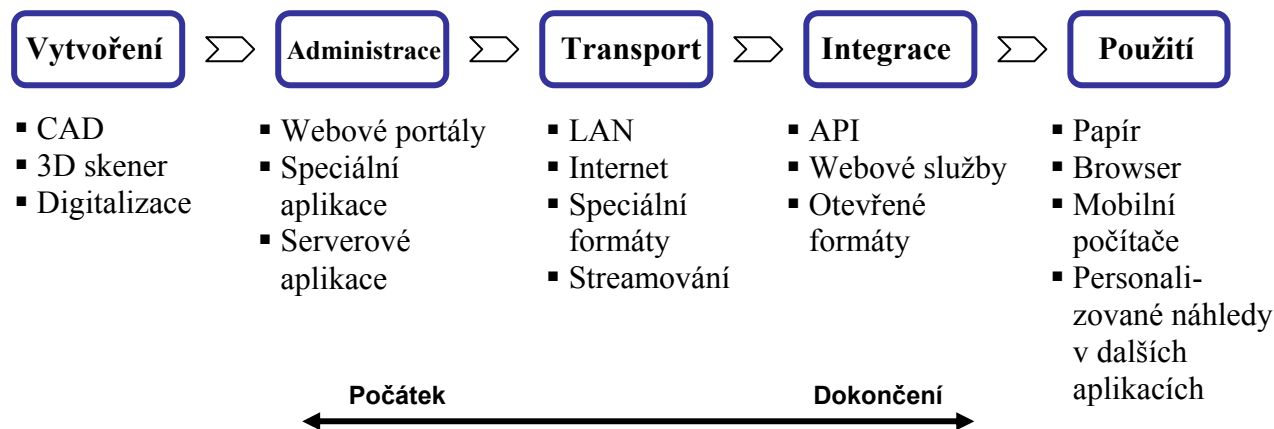
3.2 Virtual Prototyping a Produkt Lifecycle Management

Základním požadavkem pro všechny subjekty zúčastněné na návrhu, výrobě, distribuci, prodeji, reklamě atd., je rychlý a jednoduchý přístup ke všem aktuálním informacím o daném výrobku (reklama, servis, prodej, vliv zákazníka apod.). Podmínkou poskytování těchto dat je v oblasti Lifecycle Managementu kvalitní (přesná, rychlá a sofistikovaná) komunikace. Těžištěm komunikace jsou pak digitální data výrobku, respektive modelu. Nejedná se pouze o geometrický popis v podobě 3D modelu nebo 3D výkresovou dokumentaci.



Obr. 3. 3: Poměrné zastoupení jednotlivých činností v rámci PLM [13]

PLM (Produkt Lifecycle Management) je možné vyložit jako řízení informací o výrobku v celém jeho životním cyklu. Systémy PLM jsou určeny pro řízení všech činností souvisejících s výrobkem po celý jeho životní cyklus od návrhu až po likvidaci. [10]



Obr. 3. 4: Digitální návrhová data [13]

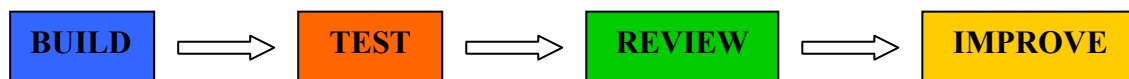
4 Virtual Prototyping

4.1 Definice Virtual Prototyping

Pojem Virtual Prototyping je možné vyložit několika způsoby. Slovo VIRTUAL lze přeložit jako virtuální, myšlený, zdánlivý, fiktivní. Slovo PROTOTYPING je průběhovým tvarem slova PROTOTYPE, což lze přeložit jako pravzor, prototyp, model. Spojení slov tedy může znamenat myšlený vzor, zdánlivý model, virtuální prototyp. V oboru strojírenství se pod tímto pojmem rozumí vytváření digitálních modelů (nejen geometrických) součástí, jejich kontrola a analýza (pevnostní, dynamická, řešení kinematiky, únavy apod.), simulace provozních stavů, propojení na ostatní části počítačové podpory navrhování strojních součástí a výrobků. Cílem této oblasti je vytvářet takové modely výrobku, které dají konstruktérovi, technologovi, ale i managerům, prodejcům a vedení firmy představu o budoucím výrobku, o jeho funkčnosti, o jeho fyzikálních vlastnostech a chování v provozních podmínkách a konečně i o vyrobiteľnosti.

Virtuální prototypy jsou definovány jako počítačová simulace technického problému a jeho subsystémů. Stupeň funkčního chování je srovnatelný s odpovídajícími fyzickými prototypy. Virtuálním prototypováním lze zredukovat počet fyzických modelů nebo i zcela vyloučit jejich použití. [11]

Náklady na stavbu fyzických modelů stoupají s narůstajícími geometrickými rozměry nezávisle na počtu detailů. Např. v automobilovém průmyslu je to použití fyzických prototypů s rozměry až do cca 10 m, podle druhu vozidla, v leteckém průmyslu dosahují rozměry modelů až 50 m. U investičních celků a zařízení je systém fyzických modelů sotva realizovatelný a virtuální prototypování se nabízí jako zvláště výhodná technologie.



Obr. 4. 1: Schéma Virtual Prototypingu dle firmy Mechanical Dynamics [18]

4.2 Model

Model není pouze geometrická kopie reálné součásti. V pojetí Virtual Prototypingu se může jednat o model geometrický, model matematický (diferenciální rovnice), model výpočtový (numerická řešení), model technologický (ověřující technologické postupy), model komplexně popisující zamýšlený výrobek (popis geometrie, hmotové vlastnosti, materiál, barva, atd.). Každý model vzniká v nějakém prostředí. V našem případě v prostředí určitého programu, softwaru. A právě tyto programy určují jak bude model sestaven a jak bude prezentován. Základním stavebním kamenem je **model popisující geometrii** budoucího výrobku.

4.2.1 Geometrický model

V oblasti Virtual Prototypingu je převážně používán prostorový geometrický model. Ten je nejčastěji vytvářen v tzv. CAD systémech. Moderní 3D CAD program již mnohdy překračuje starší pojetí klasického CADu, který byl určen převážně pro tvorbu geometrie a nabízí uživateli další funkce, jako databázové informace, tvorbu prezentací, komunikaci prostřednictvím Internetu, řízení konstruování v týmu a další. Mezi nejdůležitější funkce však patří především tvorba základní geometrie, informace o barvě a povrchu, informace o materiálu. Standardem jsou informace o fyzikálních vlastnostech dílů, tvorba sestav s přehlednou architekturou napojení dílů, snadná modifikace dílů, stabilita, vytváření kvalitní výkresové dokumentace.

Geometrický model slouží jako vstup pro další inženýrské aplikace využívající dat z CAD programu. S ohledem na další využití geometrie zde vystupuje problematika přenosu dat pomocí různých formátů. Kvalitní CAD modelář by měl tedy umožňovat export do několika základních datových formátů (standardů).

4.2.1.1 Jádru

V zásadě existují dva způsoby modelování závislé na použitém modelovacím jádře a to objemové a plošné modelování. Oba typy reprezentace modelu jsou rozšířeny. Objemové modelování převládá v oblasti strojírenských a stavařských CAD systémů (často kombinace objemového i plošného modelování), plošné modelování se s výhodou používá v oblasti volnoplošného modelování, modelování obecných tvarů, reverzního inženýrství, modelování plechů, designu. Většina CAD programů používá kombinaci obou typů modelování, tzv. hybridní modelování, většinou s důrazem na jeden z typů. Modelovací jádra je možné rozdělit v zásadě na tři typy:

- ACIS - (používá např. Autodesk), vyrábí Spatial Technologies Inc., koupeno v roce 2000 společností Dassault Systèmes, geometrická reprezentace typu hraniční reprezentace (Boundary Representation), otevřená, objektově orientovaná architektura, umožňuje objemově modelovat s možností tvorby plošných objektů (hybridní modelování)
- Parasolid v současnosti Granite(TM) One- (používá např. Pro/Engineer, SolidEdge), vyrábí EDS, objemové jádro s možností modelování ploch
- Jádra vyvíjená výrobci 3D systémů - např. VariCAD (jádro Antares), Autodesk (Shape Manager) a další.

4.2.1.2 Datové formáty

S modelovacím jádrem souvisí i datový formát. Většina vývojářů, ale i uživatelů CAD, CAI, CAM systémů si uvědomuje, že má-li být jejich výrobek konkurenceschopný, musí umožňovat spolupráci s ostatními programy dalších výrobců. Tento problém je aktuální již od vzniku prvních CAD programů, v době globalizace a pronikání na zahraniční trhy. Možnost ukládat data do některého ze standardních formátů (IGES, STL, SAT, PARASOLID, STEP) je nezbytné pro

další zpracování v programech CAE a CAM. V případě, že CAD neobsahuje požadovaný formát, je možné zakoupit speciální interface (softwarové rozhraní) pro překlad do některého standardního formátu nebo přímo do formátu CAE/CAM aplikace. Znamená to ovšem další výdaje.

4.2.1.3 Vizualizace

3D model samozřejmě přináší výhodu přímé vizualizace a optického ověření. Zvláště významnou oblastí použití vizualizačních nástrojů je automobilový průmysl, architektura a stavebnictví, design. Většina kvalitních 3D modelářů obsahuje renderovací nástroj (render) [12], který umožňuje fotorealistické zobrazení modelu. Často jsou však používány samostatné programy pro rendering. Mezi nejčastěji používané metody renderingu patří ray tracing a ray casting [2].

4.2.1.4 2D→3D

Pokročilé CAD systémy umožňují navrhovat na základě 2D náčrtů kinematické schéma sestavy a simulovat tak pohyb komponentů. Takto vytvořený 2D model slouží k ověření funkčnosti sestavy dílů a k pochopení kinematických vazeb. Následně je základem pro vytvoření objemových těles.

4.2.1.5 Fyzikální vlastnosti

3D model může obsahovat nejen údaje o geometrii, ale i informace o barvě, povrchu, materiálu. Tyto informace pak mohou být použity v rámci výkresové dokumentace. Materiálové vlastnosti jsou využívány jako vstupní parametry výpočetních systémů.

4.2.1.6 Vytvoření prototypových řad

Velkou výhodou 3D modelu je možnost vytvoření univerzálního dílu, např. šroubu, který je možné opakovaně použít s různými hodnotami rozměrů. Konstruktor si tak vytváří svou vlastní knihovnu dílů (součástí CADu je často databáze normalizovaných dílů).

4.2.1.7 Kolizní stavy

Velkou výhodou je možnost vyhodnotit kolizní stavy jednotlivých dílů v sestavě. Je tak možné předejít problémům při vlastní fyzické montáži a předem odhalit situace, které nemusí být s výkresové dokumentace patrné.

4.2.1.8 Výkresová dokumentace

Výkresová dokumentace je generována z 3D modelu. U parametrických modelářů to pak přináší výhodu propojení 2D a 3D. Změny provedené na 3D modelu součásti se promítnou do 2D. Výkres je tedy vždy aktuální vzhledem ke změnám na prostorové modelu.

Součástí CAD programů bývá často nástroj pro tvorbu prezentací, montážních postupů, variant polohy dílů v sestavě.

4.2.1.9 Paralelní konstruování

Při konstrukci v týmu nebo v několika pracovních skupinách je nezbytné pracovat současně na jedné sestavě.

- Konstruování v rámci lokální sítě - každý konstruktér (tým) pracuje na své součásti. Ta je pro ostatní uživatele dostupná pouze pro prohlížení. Po dokončení práce nebo úprav je součást odemknuta a zpřístupněna ostatním uživatelům.
- Konstruování přes Internet – součást nebo sestava je vydána do internetu (nakopírována na server) pomocí internetové aplikace většinou přímo od výrobce CAD programu. Autorizovaní uživatelé přistupují na server pomocí této administrativní aplikace a data si

stáhnou k sobě na lokální počítač. Pro ostatní uživatele je součást (sestava) uzamčena pro změny do doby vydání součásti uživatelem.

4.2.2 Model MKP

S nástupem výpočetní techniky se otevřely možnosti v oblasti numerické matematiky, která umožnila řešení velmi složitých úloh. V oblasti strojírenských inženýrských výpočtů [5] se v zásadě používají dvě numerické metody, metoda konečných prvků (MKP) a metoda konečných objemů (MKO).

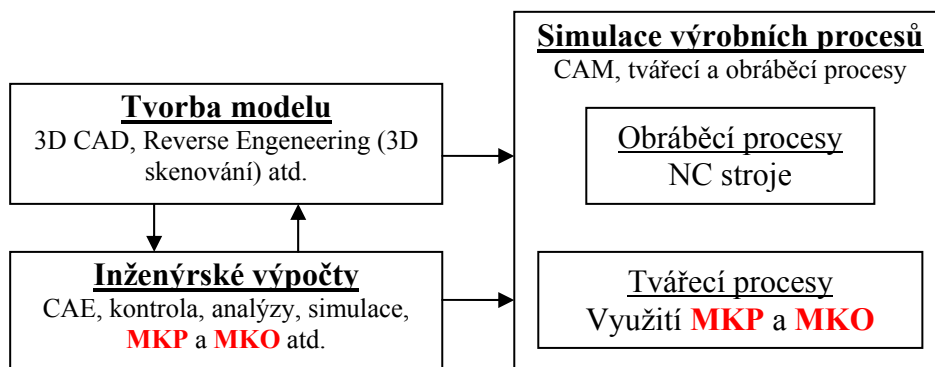
Metoda MKP je doménou především specialistů-výpočtářů. Firmy vyvíjející MKP programy se však začaly orientovat i na konstruktéry, kteří nemají hluboké znalosti a zkušenosti v oblasti inženýrských výpočtů. Kromě poměrně složitých výpočtářských systémů jsou k dispozici "odlehčené" verze, které konstruktérovi zodpoví otázky napětí a deformací, vlastních frekvencí apod. Tyto malé programy [8] používají zjednodušení a automatizaci postupu výpočtu.

Vlastnosti MKP programů určených pro konstruktéry:

- jednoduchý import geometrie
- uživatelský interface podobný CAD programům
- jednoduché zadávání okrajových podmínek a zatížení
- automatické generování sítě
- automatické zjemňování sítě
- automatické zjednodušení tvaru
- automatická detekce typu vazby
- automatické generování zprávy s výsledků
- možnost vizualizace

Vstupem do systémů používajících MKP nebo MKO je geometrie (v případě MKO inverzní geometrie). Její kvalita a přesnost pak ovlivňuje výpočet a další případné zpracování výsledků.

V současnosti je možné simulovat jevy téměř ze všech technických oborů. Lze numericky počítat úlohy statiky, kinematiky, dynamiky, lomové mechaniky, úlohy šíření tepla, zvuku, vibrací, výpočty elektromagnetických polí, proudění a další.



Obr. 4. 4: Využití MKP a MKO v návrhové a výrobní etapě

4.2.2.1 Software pro CAE

Základní vlastnosti a možnosti CAE programů:

- výpočty jednotlivých součástí
- výpočty sestav
- základní výpočty při statickém zatížení (napětí, deformace)
- výpočet vlastní frekvence
- dynamická analýza
- výpočty únavy
- možnost optimalizace hmotnosti a tvaru součástí
- výpočet přestupu tepla
- výpočty proudění
- možnost dalšího rozšíření (výpočty elektromagnetických polí, šíření zvuku, apod.)
- přímá provázanost a zpětná vazba do CAD systému
- kvalitní vizualizace a prezentace výsledků
- import standardních datových formátů

4.2.3 Technologický model

Technologie výroby je nepostradatelnou součástí výrobního procesu. Virtual prototyping pokrývá tuto oblast okrajově. Přesto však technologický proces může zásadně ovlivnit funkci výsledné součásti. Při tvářecích procesech (např. lití, lisování, ohýbání) může docházet k technologickým chybám, což vede ke zvýšení nákladů a zmetkovosti výroby. Systémy CAM disponují nástroji pro simulaci procesů lití, kování, obrábění. Umožňují vizualizovat tvářecí procesy, odhalovat chyby, generovat trajektorie obráběcích nástrojů a NC kódy na různých typech obráběcích strojů, apod.

Do pojmu Virtual Prototyping nebývá někdy oblast virtuální výroby (simulace výrobních procesů) zahrnována. Záleží spíše na výkladu a přístupu firem zabývajících se touto problematikou.

4.2.3.1 Software pro CAM

V oblasti CAM programů je k dispozici poměrně velká softwarová základny. V současnosti jsou softwarově podporovány oblasti NC obrábění, kování a lití. V oblasti kování a lití se významně uplatňuje metoda konečných prvků a metoda konečných objemů. Je zde patrný posun do oblasti CAE výpočtů a obě oblasti (CAE/CAM) se v tomto ohledu přibližují. Podstatným faktorem rozhodujícím o koupi je univerzálnost a podpora výrobních zařízení.

4.2.3.2 Základní vlastnosti a možnosti CAM programů:

Simulace obrábění: revize dráhy nástroje, generování dráhy nástroje, dokončovací operace, hrubování, navrtání, zapichování, řezání závitů, frézování, více-osé obrábění, soustružení, knihovny obráběcích postupů, asociativita dráhy nástroje s modelem, standardizace technologických postupů, načítání standardních datových formátů.

Lití: gravitační i tlakového lití, řešení tuhnutí během lití, vyhodnocování kompletního teplotního pole, odhalení míst s pod tlakem, odhalení vzniku bublin, výpočet tuhnutí odlitku, analýza velikosti a umístění staženin, ověření návrhu vtokové soustavy.

Kování: předpovědi teplotních, rychlostních a napěťových polí, předpověď vzniku přeložek a jiných vad při tečení, predikce vzniku vnitřních vad ve tvářeném materiálu, předpověď možnosti vzniku nebezpečných napětí (lomů) v nástroji, predikce opotřebení nástroje, určení zbytkových pnutí, volba různého pořadí tvářecích operací, možnosti místního zjemňování síťování a četnosti přesíťování.

Další technologie: tvorba vstřikovacích forem, lisování a simulace hlubokého tažení plechů, databáze materiálů, nástrojů a řezných podmínek.

5 VYUŽITÍ DIGITÁLNÍCH DAT V NÁVRHOVÉ ETAPĚ

5.1 Rapid Prototyping

Technologie Rapid Prototyping [4] umožňuje velmi rychlé vyrábění fyzických modelů, prototypů. Historie metody sahá do 80 let minulého století, kdy byla vyvinuta technika stereolitografie. V současnosti se využívá v oblastech výroby forem, nástrojů, k inženýrským simulacím, uplatnění nachází v koncepčním konstruování, designu, malosériové výrobě (Rapid tooling) apod. Přínosem je především tam, kde je zapotřebí vyrobit fyzický model a ověřit jeho funkčnost a design, jako např. v automobilovém průmyslu. Použití tohoto nástroje výrazně zrychluje celý proces vývoje výrobku, snižuje náklady a v neposlední řadě zlepšuje kvalitu.

Vstupem je 3D geometrický model, vytvořený v CAD programu. Konečná data jsou pak převedena nejčastěji do formátu STL. Takto připravená data jsou pak načtena do speciálního softwaru RP. Geometrie je rozdělena do příčných řezů s definovaným nastavením kroku (vzdálenost řezů), formát SLI. Dalším krokem je navržení podpůrné konstrukce v průběhu vytváření modelu.

Výroba fyzického modelu pak probíhá opačným postupem než klasickou výrobou obráběním nebo tvářením (tedy odebráním materiálu), ale je tvořen postupně po vrstvách. Přené metody nejčastěji používají techniku působení laseru na různé materiály, např. vytvrzování fotopolymeru, spékání kovového, plastového nebo keramického prášku, vrstvením plastické fólie nebo papíru napuštěného zpevňující hmotou, nanášení termoplastů v podobě tenkého vlákna. Levnější a někdy i rychlejší metodou je využití tzv. 3D tiskáren, které pracují na principu nanášení materiálu pomocí trysky nebo tiskové hlavy.

Mezi technologie, které jsou souhrnně označovány termínem Rapid Prototyping patří:

- Stereolitografie
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Laminated Manufacturing (LM)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Fused Deposition Modelling (FDM)
- Metody Model Maker 3D Plotting a Ballistic Particle Manufacturing
- Multi-Jet Modelling

5.2 Reverse Engineering – 3D digitalizace

Reverzní inženýrství se používá v oblastech, kde neexistuje 3D digitální model součásti. Tato technologie vytváří 3D digitální model z reálné součásti. Uplatní se při rekonstrukci starých dílů, (ke kterým neexistuje výkresová dokumentace) které je např. potřeba zkontrolovat pomocí MKP. Také při výrobě nových součástí v kombinaci s RP nachází uplatnění v nejrůznějších oblastech průmyslu (např. při vývoji nového designu, rekonstrukce, kontrola kvality apod).

Designérský návrh (např. model z hlíny nebo dřeva) se naskenuje a převede do některého CAD systému. Pracuje se s tzv. mraky bodů. Řádově se může jednat statisíce až miliony bodů (záleží na přesnosti a velikosti objektu). Data mohou být po úpravách použita např. pro CAM výrobu nebo Rapid prototyping.

Dalším odvětvím použití Reverse Engineeringu je kontrola kvality a jakost (Quality Control). Pomocí 3D skeneru je možné rychle vyhodnotit přesnost a dodržení rozměrů výroby. Většinou je

možné hodnotit pouze vnější rozměry. Pro vyhodnocení vnitřní geometrie je zapotřebí víceméně použít destruktivních skenerů [17].

5.2.1 3D digitalizace

3D skenery je možné rozdělit na nedestruktivní a destruktivní. Destruktivní skenery jsou schopny nasnímat i vnitřní geometrii. Mezi nejčastěji používané typy 3D digitizérů patří optické, laserové, mechanické nebo magneticko-rezonanční. Výběr skeneru ovlivňuje požadovaná přesnost (pro strojírenské účely setiny až tisíce milimetrů). Dalším faktorem je rychlost snímání objektu a pracovního prostoru (rozměrově až desítky metrů).

Data jsou pak dále zpracována některým ze speciálních programů, který dokáže pracovat s nasnímaným mrakem bodů. Z těchto bodů je pak možné vytvořit křivky nebo plochy a sestavit digitální model výrobku. Ten je pak exportován do nějakého standardního formátu (IGES, VDA, STEP, STL, DXF), které jsou dostupné pro CAD systémy.

5.2.2 Systém Tritop a Atos

Systém Tritop slouží k získávání diskrétních bodů na objektu. Systém snímání je bezkontaktní, takže je možné snímat i objekty zahřáté na vysokou teplotu a to při dodržení přesnosti až 0,02 mm. Objekt se pokryje retro body, které se nasnímají digitálním fotoaparátem a jsou dále softwarově zpracovány. Součástí snímku musí být speciální kalibrační tyč.

Systém ATOS (Advanced Topometric Sensor) je mobilní optické 3D souřadnicové zařízení dosahující vysoké hustoty dat. Měření je založeno na principu triangulační metody a digitálního Image processingu. Skenovaný objekt je označen kontrolními značkami (referenční body), které slouží k vypočtení polohy měřících senzorů. Při měření je na objekt promítnuta sada proužků světla, které jsou pomocí dvou kamer nasnímány z různých úhlů. Data jsou dále zpracována s vysokou přesností pro každý pixel. Zvýšení přesnosti lze dosáhnout použitím dat ze systém Tritop. [15]

6 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Virtual prototyping (někdy označován jako Digital prototyping) je poměrně komplexní a rozsáhlá oblast využití počítačové podpory. Pokrývá tvorbu digitálních modelů, umožňuje simulovat provozní a kritické stavy, které jsou v praxi obtížně ověřitelné. Výstupy jsou pak využity v celém životním cyklu výrobku, od tvorby prototypu (Rapid prototyping, Reverse engineering), přes výroby (oblast CAM systémů), až po řízení kvality, propagaci, reklamu, údržbu atd. Významným přínosem je modifikovatelnost a konzistentnost digitálních dat, zvláště pak v případech vývoje nového technického objektu.

Cílem práce je popsat a vysvětlit problematiku Virtual prototypingu v rámci Product Lifecycle Managementu. Formou praktického řešení konstrukce protézy dolní končetiny budou objasněny základní výhody použití patřičných softwarových nástrojů v návrhové etapě výrobku. 3D digitální data budou využita pro další navazující etapy výroby a bude ukázáno jejich využití v podnikové struktuře. Ve spolupráci s firmou ING corporation bude dokončen model protézy a bude vyroben funkční prototyp. Součástí práce bude příprava potřebných dat pro malosériovou výrobu a ověření vyrobitelnosti jednotlivých komponentů protézy. Bude tak předloženo kompletní řešení využívající digitální data s konkrétním reálným výstupem.

Výsledky inženýrských analýz budou porovnány se získanými daty reálných zkoušek. 3D geometrický digitální model bude využit pro simulace chování protézy ve vybraném multibody systému. Zde se otvírá možnost predikovat motorické chování pacienta ještě před reálným

použitím protézy. Završením disertační práce bude z výsledků formulovat závěry nebo případná doporučení pro další vývoj protéz dolních končetin.

V práci budou uplatněny poznatky z grantové činnosti:

Autodesk Academia 2002 - DesignSpace pro Inventor

Autodesk Academia 2003 – Paralelní konstruování pro Inventor

Grant Fond vědy FSI Brno 2002 – Virtual Prototyping

Autodesk Academia Grant 2004 - Modelování v programu Autodesk Inventor

Autodesk Academia Grant 2005 - Potrubní systémy a kabeláže v programu Autodesk

7 ZVOLENÝ POSTUP ŘEŠENÍ

7.1 Tvorba 3D digitálního modelu

Podkladem pro vytvoření 3D digitálního modelu bude výkresová dokumentace staršího modelu náhrady dolní končetiny a designérský návrh.

Základní kritéria pro volbu CAD modeláře:

Parametrizace a modifikace

Vzhledem k tomu, že model bude vytvářet ve spolupráci s designérem předpokládá se, že na modelu bude postupně docházet k úpravám, je nutná možnost jednoduše modifikovat model např. pomocí parametrických kót.

Export dat

Pro účely ověření smontovatelnosti a doladění designu bude vyroben fyzický model pomocí metody Rapid Prototyping. Program by měl umět disponovat softwarovým interfacem, který umožní ukládat data do standardizovaných datových formátů. Jsou upřednostňovány především formáty SAT, STEP (datové formáty určené především pro přenos objemových dat), které se uplatní pro přenos do výpočtářských systémů, dále formát STL (formát pro stereolitografii, trojúhelníková plošková reprezentace geometrie modelu) určený pro Rapid prototyping, případně formát VRML, který bude použit pro vytvoření internetové prezentace.

Firemní řešení

Firma ING Corporation pracuje s programem Autodesk Inventor [3]. Je tedy výhodné použít tento program jak z důvodu kompatibility, tak z důvodu znalosti práce s programem.

Design

Vnější tvar a design bude řešen ve spolupráci s Odborem průmyslového designu při Ústavu konstruování. Softwarový modelář musí umožňovat plně převést designérský návrh do digitální podoby. Pro návrh protetického chodila [20] bude využito metod reverzního inženýrství. Pomocí 3D digitalizace budou vytvořeny řezy původním modelem, který bude dále digitálně upraven.

7.2 Inženýrské výpočty

Pro určení kritických míst na modelu protézy bude použita metoda konečných prvků. Prvotní výpočty budou provedeny tzv. “konstruktérskými” MKP programy. V případě potřeby bude výpočet zpřesněn v programu ANSYS se zaměřením na předem stanovená problémová místa.

Kritéria výběru MKP programu:

Na trhu je k dispozici celá škála MKP programů. V případě návrhu protézy bude použit program spolupracující s CAD modelářem. K dispozici jsou produkty firem Ansys Inc.- DesignSpace, MSC software - NASTRAN, SRAC (Structural Research & Analysis Corporation) - COSMOS. Tyto firmy vyvíjí MKP software určený jak pro specialisty, tak pro návrháře a konstruktéry. V případě „malých“ MKP je většina funkcí automatizována a i grafické rozhraní je provedeno podobně jako v CAD programech. Konstruktor tak dostává jednoduchý nástroj pro provedení základních výpočtů. Výpočet je však nutné brát jako prvotní přiblížení. Detailní analýzu je pak nutné provést v některém větším systému.

Požadované vstupy

Metoda konečných prvků pracuje s 2D nebo 3D geometrií modelu. Pro výpočet bude použita výsledná geometrie z parametrického modeláře. Okrajové podmínky budou stanoveny na základě normy ISO 10328. Geometrie bude použita i pro simulace kinematiky chůze pomocí virtuálního skeletu kostry člověka vybraným multibody systémem [14], předpokládá se využití systému ADAMS [18]. Výsledné hodnoty zatížení budou použity jako vstupní hodnoty pro metodu konečných prvků.

- Možnost načítat sestavy
Programy umožňují provádět výpočty na celých sestavách. Jednotlivé vazby mezi součástmi jsou automaticky detekovány a nahrazeny patřičnými silovými vazbami.
- Typy výpočtů
Program bude umožňovat výpočty napětí a deformací, další funkce (teplotní analýza, vlastní frekvence, dynamické namáhání apod.) nejsou vyžadovány, jsou však často součástí daného programu.
- Propojení s CAD
Program bude přímo načítat geometrii modelu z CAD programu bez nutnosti exportovat data do jiného (standardizovaného) formátu.
- Výstupy
Programy určené pro konstruktéry většinou vypočítané hodnoty sestaví do přehledné zprávy a umožňují u grafickou prezentaci výsledků. Program by měl také zvládat hmotnostní optimalizaci. Na základě těchto informací bude rozhodnuto o případných tvarových změnách.

7.3 Další výstupy

Součástí práce bude vytvoření prezentačních materiálů pro účely prodeje a reklamy.

Požadované výstupy

3D digitální model bude použit pro vytvoření webové prezentace. Využito bude datové technologie VRLM nebo sofistikovanější VET (Viewpoint Experience Technology, dříve znám jako Metastream 3 - MTS3) [19] pro tvorbu streamovaných animací. Prezentace určená pro Internet bude umožňovat prohlížení 3D modelu přímo na internetových stránkách. Animace budou exportovány do formátu AVI.

Software

Základní pohledy na výrobek budou získány fotorealistickým zpracováním 3D digitálního modelu a to v programu 3D Studio MAX firmy Discreet. Tento program bude použit pro rendering [12]. Podporuje formát programu Autocad Inventor bez nutnosti převádět data do jiného (standardního nebo univerzálního) formátu. Program bude použit i pro tvorbu animací.

8 DOSAŽENÉ DÍLČÍ VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

8.1 Návrh protézy dolní končetiny pomocí nástrojů Virtual prototypingu

8.1.1 Protézy

Jedna z možných definic protézy dle ISO 8549: Externě aplikovaná pomůcka, která nahrazuje část chybějící nebo nedostatečně vyvinuté končetiny, popř. celou končetinu.

Rozdělení protéz dolní končetiny

Protézy lze rozdělit dle několika základních kritérií. Nejčastěji je rozdělujeme podle typu amputace, uspořádání, určení a provedení [7], [9].

1. Typ amputace

- Hemipelvektomie
- Exartikulace v kyčli
- Amputace ve stehně
- Exartikulace v kolenu
- Amputace v bérce
- Amputace v hleznu
- Amputace v noze

2. Uspořádání

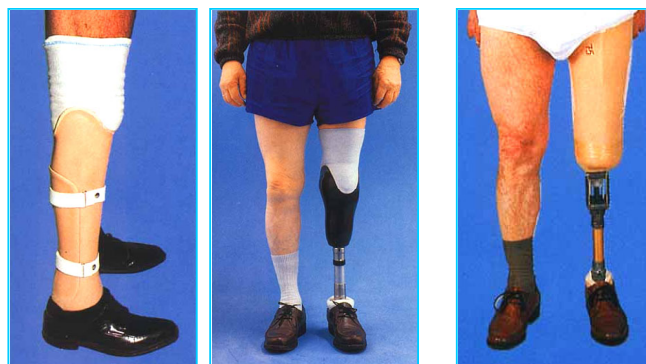
- Exoskeletární (klasické)
- Endoskeletární (modulární)

3. Určení

- Interim (včasné) protézy
- Protéza pro prvovybavení
- Funkční protéza
- Speciální typy protéz

4. Provedení

- Lůžko protézy
- Klouby
- Chodidlo
- Adaptéry
- atd.



Amputace v noze (hleznu)

Amputace v bérce

Exartikulace v kolenu



Amputace ve stehně

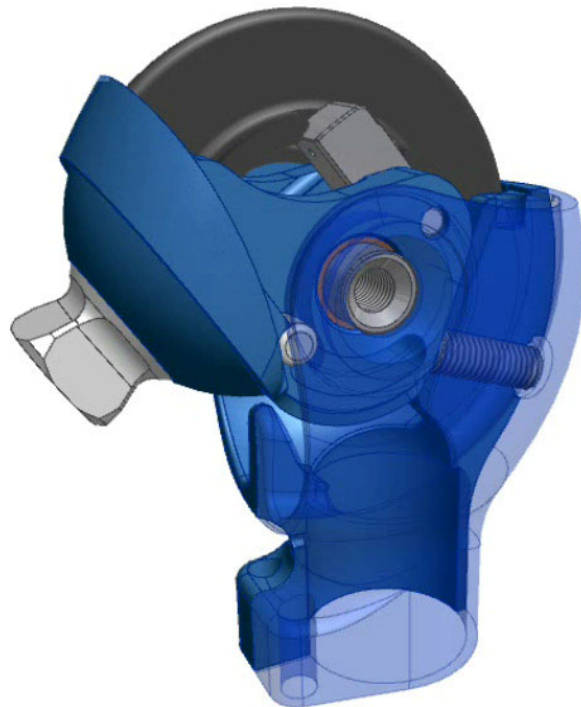
Exartikulace v kyčli

Obr. 8. 1: Základní typy protéz DK [15]

8.1.2 Konstrukce protézy

Práce bude zaměřena na protézu dolní končetiny. Typ amputace je amputace ve stehně, protéza bude navržena jako endoskeletární, a slouží pro účel prvovybavení po operaci. Protéza bude složena z lůžka protézy, kolenního kloubu, spojovacího adaptéru, hlenového kloubu a chodidla.

Ve spolupráci s Odborem průmyslového designu a firmou ING corporation byl navržen design a koncepce nové protézy dolní končetiny. Protéza je určena pro tzv. prvovybavení. Základním požadavkem je stabilita protézy. Pacient se po amputaci učí v první fázi chodit a používat jednodušší protetickou pomůcku. Celá náhrada je pevná a neotáčí se kolem své osy. V okamžiku, kdy se pacient dostatečně sžije s protézou a je motoricky schopný, přistoupí se k vyřazení blokovacího mechanismu. Byl zhotoven 3D digitální model a posléze i fyzický výrobek kolenního jednoosého kloubu se západkou. Pro realizaci modelu byl využit 3D parametrický systém Autodesk Inventor (firemní řešení firmy ING corporation). Systém umožňuje zjistit kolizní stavy a ověřit kinematiku modelu. Autodesk Inventor disponuje modulem pro numerická řešení deformačně-napjatostních úloh, čehož bude později využito k ověření hlavních dílů sestavy protézy. Nezanedbatelnou výhodou je možnost parametrizace modelu. V průběhu prací docházelo k častým designerským úpravám a právě parametrizace značně zjednodušuje manipulaci s modelem. Po získání zkušeností s modelováním v programu Autodesk Inventor bylo rozhodnuto nadále tento modelář používat.



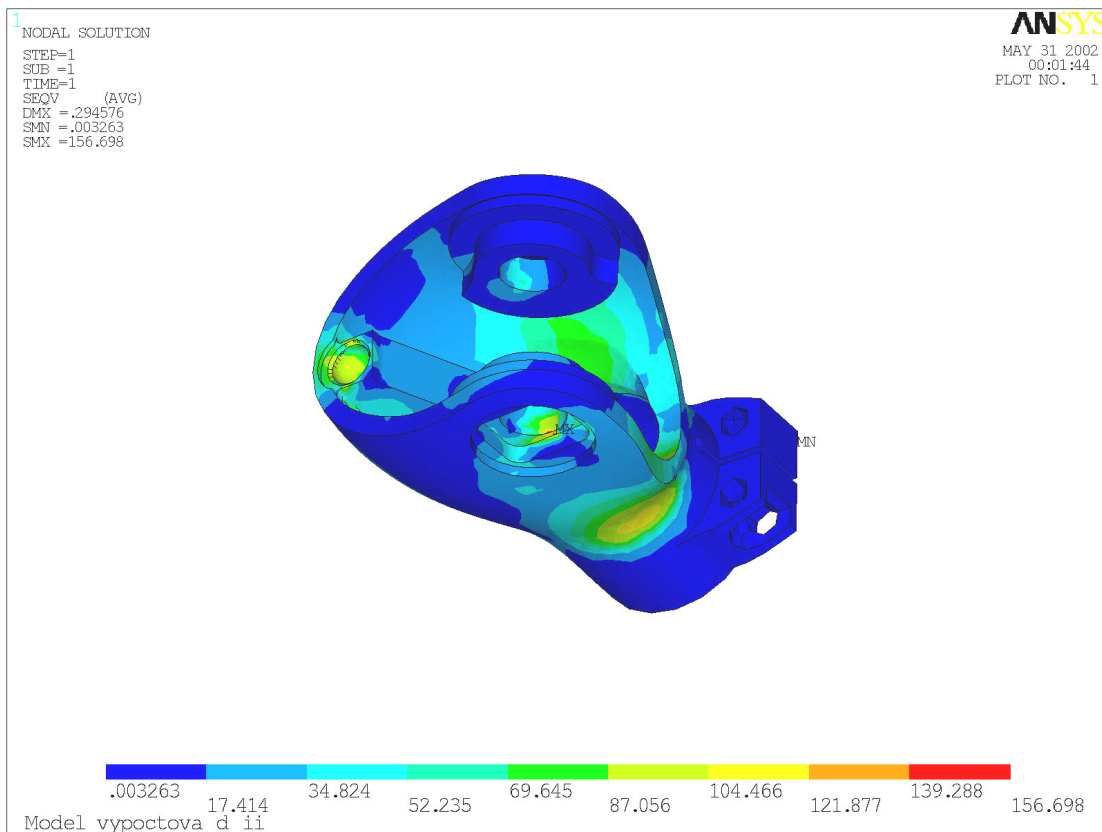
Obr. 8. 2: Digitální 3D model kolenního kloubu

Výstupní 3D digitální data byla použita opět na tvorbu fyzického modelu pomocí Rapid prototypingu (metodou FDM). Fyzický model umožnil realizovat kontrolu smontování kloubu. Zde byl odhalen problém na vnitřním plastovém krytu (na obr. 6, černě), který byl následně odstraněn konstrukční úpravou. Model byl dále povrchově upraven.



Obr. 8. 3: Výstup z Rapid prototypingu

Pro posouzení mechanického namáhání byly provedeny numerické kontroly pomocí metody konečných prvků na vybraných dílech.



Obr. 8. 4: Redukované napětí dle podmínky plasticity HMM

9.1 Získané poznatky a závěr

Prakticky byl ověřen postup modelování a tvorba 3D geometrie. Využití 3D parametrického modeláře Autodesk Inventor přineslo zrychlení práce, usnadnilo generování výkresové dokumentace, ale především tvorbu kvalitního geometrického modelu. Právě bezchybný popis geometrie modelu je základem pro bezproblémový vstup do dalších softwarových nástrojů digitálního prototypování. Dále byly získány zkušenosti s technologiemi Rapid prototypingu, zejména metodou Fused deposition modelling. Využití této metody přineslo zlevnění výroby prototypu a konečně i malosériové výroby.

Numerické výpočty pomocí metody konečných prvků je výhodné ověřovat aspoň ve dvou výpočtářských systémech. Standardním nástrojem je řešení firmy ANSYS. V úvahu přichází však i programy od dalších firem. Vezmeme-li v potaz, že se jedná o objemové díly střední složitosti, je možné využít tzv. konstruktérských MKP programů. Poměrně dobrým řešením je program COSMOS DesignStar, který umožňuje velmi rychle zpracovat 3D digitální modely z většiny známých CAD systémů. Výhodou je také existence komunikačního rozhraní pro modely programu Autodesk Inventor. Dále je možné využít přímo integrovaného výpočtářského modulu v programu Autodesk Inventor. Obdobným řešením jsou programy DesignSpace a Workbench od firmy ANSYS. Oba produkty disponují komunikačním rozhraním pro načítání buď nativních dat Inventoru nebo standardizovaných datových formátů.

10 LITERATURA

- [1] Bejček, V. *CIM-počítačová podpora výrobního procesu*, Brno, Nakladatelství VUT Brno, 1992. ISBN 80-214-0517-1.
- [2] Beneš, B., Felkel, P., Sochor, J., Žára, J.,: *Vizualizace*. Praha, ČVUT 1997.
- [3] Fořt, P. – Kletečka, J. *Autodesk Inventor: adaptivní modelování v průmyslové praxi*. 1. vydání. Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0389-7.
- [4] Gebhardt, A. *Rapid Prototyping*. 1st ed, 2003. Munich: Carl Hanser Verlag 2003. ISBN 1-56990-281-X.
- [5] Huebner, K. H. - Dewhurst, D. L. - Smith, D. E. - Byrom, T. G. *The Finite Element Method for Engineers*. 4 edition, 2001. Wiley-Interscience, 2001. ISBN 0471370789.
- [6] Janíček, P.: *Řešení problémů modelování*, Brno, PC-DIR Real 1998
- [7] Lusardi, M. - Nielsen, C. *Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation*. 1st edition, 2000. Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 0750698071.
- [8] Macánek, S. *Srovnání MKP produktů určených pro konstruktéry*. Brno, 2004. 52 s. Diplomové práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Vaverka.
- [9] Mensch, G. - Kaphingst, W. *Physiotherapie und Prothetik nach Amputation der unteren Extremität (Rehabilitation und Prävention)*. 1 edition, 1997. Springer, 1997. ISBN 3540627693
- [10] Ostrý, S.: *Je PLM pouze další módní slovo?*, Computer design, 2/2003, str. 18, Computer Press, a. s., Praha 2003. ISSN 1212-4389.
- [11] Shigley, J. [et. al.] *Mechanical Engineering Design*, 7 edition, McGraw-Hill, 2004. ISBN 0072921935
- [12] Žára, J. - Beneš, B. - Felkel, P. *Moderní počítačová grafika*. 1. vyd. Praha, Computer Press, 1998. ISBN 80-7226-049-9.

Elektronické zdroje informací

- [13] Čierny, M. *Product Lifecycle Management* [CD-ROM]. c2003. Praha: Autodesk, 2003 [cit. 3. 2. 2005].
- [14] BioMechanics Research Group. *Orthopedics* [online]. c2005. [cit. 20.7.2005]. Dostupné z: <<http://www.lifemodeler.com/index.htm>>.
- [15] ING corporation. *Protézy* [online]. [cit. 5. 6. 2004]. Dostupné z: <<http://www.ingcorporation.cz/index.htm>>.
- [16] MCAE Systems. *3D digitalizace a měření* [online]. c2005. [cit. 2.7.2005]. Dostupné z: <<http://www2.mcae.cz>>.
- [17] Navrátil, R. *Reverse Engineering* [online]. c2000. [cit. 5. 6. 2005]. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz>>.
- [18] MSC Software Corporation. *Software* [online]. Last revision 7th of October 2004, [cit. 1. 6. 2005]. <<http://www.mscsoftware.com/products/>>.
- [19] Okino Computer Graphics. *Viewpoint-VET Geometry Export Converter* [online]. c2005, [cit. 7. 7. 2005]. Dostupné z: <http://www.okino.com/conv/exp_vet.htm>.
- [20] Rosický, J. *Ortopedická protetika* [online]. Protetická chodidla a jejich vlastnosti. [cit. 10. 7. 2005]. URL:<<http://www.ortopedickaprotetika.cz/ViewCategoryContents.php?Cat=3>>.