

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta aplikovaných věd  
Katedry informatiky a výpočetní techniky

## **Bakalářská práce**

# **Modelování hmatového dojmu z různých materiálů pomocí haptiky**

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi byly v rámci této bakalářské práce nápomocni. Za jejich nápady a připomínky. Můj dík patří těmto osobám: Prof. Ivana Kolingerová, Ing. Václav Purchart a Ing. Petr Vaněček, Ph.D.

## **Zadání ze sekretariátu**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne .....

Tomáš Pašek .....

## **Abstract**

My work is based on the program by Ing. Purchart, imitating sand spading. My goal was to implement haptic force generation using Phantom Omni device (SensAble). My program is able to model several kinds of material in haptic feedback. The results were user-tested. Results are described in this text.

# Obsah

1	Úvod.....	7
2	Fyzikální pojetí materiálu .....	8
2.1	Tvrдост .....	8
2.2	Pružnost .....	9
2.3	Tření.....	10
2.3.1	Tření klidové.....	10
2.3.2	Tření smykové .....	11
2.3.3	Tření vrtné.....	12
2.3.4	Tření valivé .....	12
2.4	Přilnavost .....	13
3	Haptika.....	14
3.1	Haptické zařízení Phantom .....	14
3.2	Haptické knihovny .....	15
3.2.1	HDAPI .....	15
3.2.2	HLAPI.....	16
4	Existující haptické metody.....	17
4.1	Náhodná drsnost .....	17
4.2	Tření pomocí háčků .....	17
4.3	Texturové metody .....	18
4.4	Spojitosť síly .....	18
5	Celková síla.....	21
5.1	Materiály bez deformace .....	21
5.2	Materiály s deformací .....	21
6	Navržené řešení.....	24
6.1	Vlastnosti materiálu .....	24
6.2	Prototypy materiálů.....	28
6.3	Celková síla.....	28
7	Implementace.....	30
8	Výsledky .....	31
8.1	Celková síla.....	31
8.2	Vlastnosti materiálů .....	32
8.3	Testování.....	32
8.3.1	Podoba testování .....	33
8.3.2	Výsledky testování.....	33
9	Závěr .....	36
	Literatura.....	37

# 1 Úvod

Cílem této práce je poskytnout reálný hmatový vjem na povrchu různých materiálů a při rytí v písku ve virtuální realitě. Je nutné naučit se existující haptické metody a jednu z nich využít nebo vymyslet vlastní metodu.

K práci využívám existující program Ing. Purcharta. Program je schopný imitovat rytí v písku ve 3D modelu písečné pláže. Program využívá trojúhelníkovou síť nadefinovanou na vstupu, jejíž úpravy probíhají v reálném čase (při zarytí rydla vznikají vrypy). Mým úkolem je zapojení haptického zařízení Phantom (od firmy Sensable) do tohoto programu a udělat návrh a implementaci metod vhodných pro imitování hmatového vjemu. Dále pak vytvořit několik návrhů pro různé materiály. Zařízení Phantom bohužel není schopné vytvořit dostatečně velkou sílu, aby s ním bylo možné důvěryhodně imitovat tvrdé materiály, jako je dřevo nebo beton, proto není zřejmě vytvoření věrohodné hmatové odezvy tvrdých materiálů lehké.

Práce se zaměřuje na fyzikální pojetí materiálů, dále vysvětluje pojem haptika a seznámí čtenáře s haptickým zařízením a haptickými knihovnami. Poté jsou v práci uvedeny existující haptické metody. Na základě předchozích bude vysvětleno generování celkově působené síly materiálem a mnou navržené řešení. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky a poznatky v průběhu vypracování práce, stejně jako implementace a potíže s ní spojené.

Práce je součástí projektu MŠMT LH 11006 Interaktivní geometrické modely pro simulaci přírodních jevů a davů.

## 2 Fyzikální pojetí materiálu

K vytvoření virtuálního modelu reálného materiálu si musíme uvědomit, jakými veličinami musíme materiál v programu definovat. Jsou to tvrdost, pružnost, tření a přilnavost. Materiály můžeme dělit na nedeformovatelné a deformovatelné. Za nedeformovatelné materiály považujeme například beton nebo dřevo, i když se tím dopustíme nepřesnosti. Pokud by rydlo bylo vybaveno ocelovým hrotem, jistě bychom s ním do dřeva udělali vryp. Deformovatelné materiály jsou sypké. Jasným příkladem je písek samotný. Dále se ale může jednat o různé gelové kuličky, sníh atd. Každý materiál musí mít svoji tvrdost a pružnost. Tvrdost určuje, jak snadno dokážeme proniknout povrchem materiálu. Pružnost je u deformovatelných materiálů zanedbatelná, jelikož z větší části zanikne při erozi částic. Budeme-li se pohybovat po povrchu materiálu, bude vznikat tření mezi materiálem a rydlem. Přitlačíme-li rydlo proti materiálu, dojde k jevu, který se nazývá přilnavost.

### 2.1 Tvrdost

Tvrdost lze definovat jako odpor materiálu proti vnikání jiného, tvrdšího tělesa (indentoru) definovaného tvaru. Na měření tvrdosti známe několik metod [1]:

- a) Tvrdost podle Brinella – vtlačována je malá kulička z tvrdokovu, měřeno je zatížení, působící na kuličku, a plocha vtisku (kulový vrchlík). Tvrdost podle Brinella je potom rovna poměru těchto změřených veličin.
- b) Tvrdost podle Vickerse - vtlačován je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^{\circ}$ . Měřeno je opět zatížení a plocha vtisku, tvrdost podle Vickerse je rovna jejich poměru.
- c) Tvrdost podle Berkoviche je analogická tvrdosti podle Vickerse, pouze indenter má tvar trojbokého diamantového jehlanu. Metoda má výhodu experimentálního rázu – trojboký jehlan lze vybrousit do téměř ideální špičky. Ta hraje roli zejména při malých velikostech vtisku.
- d) Tvrdost podle Knoop je opět podobná tvrdosti podle Vickerse, diamantový indenter má takový tvar, že vtisk má dvě různé diagonály, jednu kratší a druhou



delší. Metoda je vhodná k měření tvrdosti tenkých vrstev a křehkých materiálů (i malé zatížení způsobí vtisk o poměrně velké ploše).

- e) Tvrdost podle Rockwella – vtiskována je buď tvrdá kulička nebo diamantový kužel. Měřeno je zatížení a hloubka vtisku, z níž se dá snadno vypočítat plocha vtisku. Tato metoda je vhodná pro drsnější povrchy, neboť k měření nepotřebujeme optický mikroskop.

Z uvedených metod je zřejmé, že tvrdost je závislá na ploše vtisku a zatížení nebo hloubce vtisku. Materiál tedy musí působit proti rydlu silou, která bude umocněna plochou rydla. Tvrdost materiálů se liší podle druhu materiálu. Tvrdost lze tedy chápat jako konstantní sílu  $T$  násobenou plochou rydla  $S_{rydla}$ , přičítanou k celkové síle, která se do výpočtu zahrnuje okamžitě po kontaktu s tělesem.

Jedná se tedy o složku síly:

$$F_{tvrdost} = T * S_{rydla}, \quad (2.1)$$

kde  $T$  je síla působící proti rydlu [N] a  $S_{rydla}$  je plocha rydla [m].

## 2.2 Pružnost

Pružnost materiálu můžeme chápat jako snahu materiálu zaujmout původní tvar poté, co na těleso přestala působit vnější síla, která ho deformovala. Čím větší síla na těleso působí, tím větší síla působí na rydlo. Výsledná síla bude tedy přímo úměrná hloubce deformace [1]. U sypkých materiálů se pružnost stává zanedbatelnou z důvodu eroze (pokud máme špičaté rydlo). Částice se přesunou po okraji rydla namísto působení síly proti rydlu. Pružnost u sypkých materiálů bude znát až při působení rydla s velkou plochou. Pružnost je tedy přímo úměrná ploše rydla.

Pružnost lze tedy chápat jako koeficient  $p$  násobící plochu rydla  $S_{rydla}$  a hloubku vrypu  $h$ . Při kontaktu s povrchem tělesa bude nulová.

Jedná se tedy o sílu:

$$F_{pružnost} = p * S_{rydla} * h, \quad (2.2)$$

kde  $p$  je bezrozměrný koeficient pružnosti,  $S_{rydla}$  je plocha rydla [m] a  $h$  je hloubka vrypu [m].

## 2.3 Tření

Tato kapitola byla vypracována na základě práce [6]. Pod pojmem tření rozumíme vzájemné působení různých stýkajících se těles, které si navzájem zabraňují v relativním pohybu. Tření můžeme dělit na vnější a vnitřní. Vnější tření nastává například v případě hranolu ležícího na nakloněné rovině. Vnitřní tření vzniká mezi částmi jednoho tělesa, například u plynů a kapalin.

Další možné dělení tření je na suché a kapalinové vazké. Suché tření vzniká mezi dvěma plochami, které se dotýkají bez přítomnosti kapalné nebo plynné mezivrstvy. Kapalinové vazké tření je tedy tření mezi povrchem pohybujícího se pevného tělesa a kapalinou nebo plynem, ve kterém se pohybuje.

Jiné dělení lze uvažovat dle druhu pohybu těles, a to dělení na smykové, klidové a valivé. Všechna tyto tření jsou suchá.

Při tření vzniká speciální síla, kterou nazýváme třecí síla a značíme ji  $F_t$ . Její odlišnost tkví ve směru jejího působení. Zatímco jiné síly mohou pohyb brzdit nebo naopak podporovat, tato síla působí vždy proti směru pohybu tělesa a její orientace směřuje podél povrchu stýkajících se těles.

### 2.3.1 Tření klidové

Na základě fyzikálních pokusů bylo zjištěno, že při přechodu tělesa z klidu do pohybu je potřeba vynaložit větší sílu, než když je těleso v pohybu. Klidové (statické) tření je tedy větší než tření v pohybu a platí:

$$F_{tk} = \mu * G, \tag{2. 3}$$

kde  $F_{tk}$  je klidová třecí síla [N], která brání vzniku pohybu jednoho tělesa, zatímco je na povrchu jiného tělesa.  $\mu$  představuje koeficient klidového tření a jedná se o bezrozměrný koeficient úměrnosti, který je určen materiálem stýkajících se těles, jemností ploch, nečistotami mezi plochami aj.  $G$  představuje sílu kolmou k třecí ploše [N].

Těleso se neuvede do pohybu, dokud na něj nebude působit vnější síla  $F_v$  orientovaná podél třecí plochy těles, která dosáhne mezní hodnoty. Tuto hodnotu

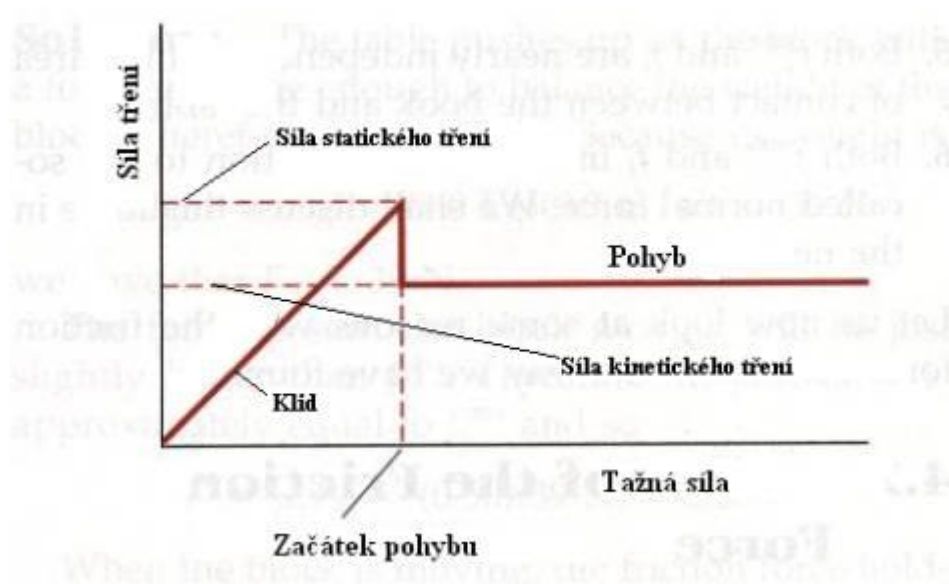
nazýváme mezní síla klidového tření. Vnější síla tedy pro relativní pohyb tělesa musí splnit podmínku  $F_{tk} < F_v$ .

### 2.3.2 Tření smykové

Smykové tření vzniká při pohybu těles po sobě rovnými plochami. Závisí na látce a drsnosti. Je mírně závislé na rychlosti pohybu. S rostoucí rychlostí se smykové tření snižuje, proto může při vysokých rychlostech dojít ke smyku. Tření není závislé na velikosti třecích ploch, závisí na velikosti působeného tlaku, tzn. je úměrné kolmé (normálové) síle  $N$ . Pro smykové tření platí experimentálně ověřený Coulumbův-Amontův zákon:

$$F_{ts} = k * N, \quad (2.4)$$

kde  $k$  je bezrozměrný koeficient tření závislý na typu povrchu třeného tělesa a  $N$  síla kolmá k třecí ploše [N]. Přechod mezi klidovým a statickým třením lze pozorovat Obr 2.3.1.



Obr. 2.3.1: Závislost síly tření na tažné síle(čase). Převzato z [1].

Každé těleso tedy musí mít dva různé koeficienty  $\mu$  (statický) a  $k$  (dynamický). Statický koeficient bude platit při nulové a nízké vzájemné rychlosti pohybu těles, dynamický bude platit při větších rychlostech.

### 2.3.3 Tření vrtné

Při smykovém tření může nastat speciální případ, který vzniká, pokud je styčná ploška velice malá. Například roztočíme-li hračku „káču“ na dřevěné desce. Dochází tedy k rotaci jednoho tělesa na ose kolmé k druhému tělesu. Vzniklé tření nazýváme vrtné.

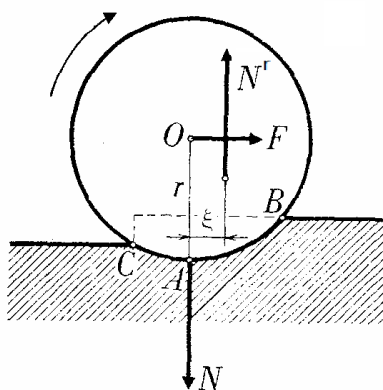
Ze vzorce pro smykové tření víme, že síla smykového tření  $F_{ts}$  je přímo úměrná kolmé síle působící na druhé těleso. Pro vrtné tření tedy platí rovnost:

$$F_{ts} = k * N, \text{ resp. } F_{ts} = k * P,$$

kde  $N$  je síla kolmá k třecí ploše [N],  $P$  je síla normálového tlaku [N] a  $k$  je bezrozměrný koeficient smykového tření závislý na druhu povrchu tělesa.

### 2.3.4 Tření valivé

Valivé tření nastává při valivém pohybu kolovitého tělesa na jiném tělesu. Předpokládejme kolo o poloměru  $r$  valící se po vodorovné rovině. Dále definujme sílu  $F$  potřebnou k rovnoměrnému pohybu kola po rovině. Kolo působí na rovinu kolmou silou  $N$ , čímž deformuje (stlačuje) rovinu druhého tělesa (viz Obr. 2.3.2).



Obr. 2.3.2: Převzato z [2]

Rovina působí na kolo stejně velkou silou  $N^r$ , která má ale opačný směr. Těleso deformuje při pohybu rovinu před sebou (vzdálenost AB) a částečnou deformaci zanechává i za sebou (vzdálenost AC). Síla  $N^r$  proto na těleso působí v posunutém

bodě vzdáleném  $\xi$  před osou tělesa. Dvě protichůdné síly  $N$  a  $N^r$  tedy vytvářejí dvojici s momentem  $M = N\xi$ , kde  $\xi$  vyjadřuje vzdálenost sil  $N$  a  $N^r$ . Otáčení vzniklé touto dvojicí směřuje v protisměru otáčení kola.

Aby byl pohyb kola po rovině rovnoměrný, musíme na těleso působit tažnou silou  $F$ , která působí v ose kola a jejímž ramenem je poloměr  $r$ . Síla se musí rovnat momentu tažné síly  $F$ , tedy platí vzorec:

$$N\xi = Fr, \text{ resp. } T = \xi \frac{N}{r},$$

kde  $T$  je síla valivého tření [N],  $\xi$  je součinitel valivého tření [m],  $N$  je tlak mezi tělesy [N] a  $r$  je poloměr kola [m].

## 2.4 Přílnavost

Přitlačíme-li dvě různá tělesa proti sobě tlakovou silou  $L$ , může dojít k jevu, který nazýváme přílnavost. Poté hledáme normální tahovou sílu  $L'$  takové velikosti, která tělesa od sebe opět oddělí. Poměr normální tahové síly potřebné k odtrhnutí a tlakové síly označujeme jako součinitel přílnavosti  $f'$ . Vzoreček tedy vypadá takto:

$$f' = \frac{L'}{L}, \tag{2.5}$$

kde  $L$  je tlaková síla [N],  $L'$  je tahová síla [N] a  $f'$  je bezrozměrný součinitel přílnavosti.

Přílnavost je u materiálů velice málo častý jev, jelikož je ovlivňována několika faktory: malou velikostí styčné plochy, znečištěním povrchů a působením pružných sil. Zvláště pak pružné síly narušují přílnavost nejvíce.

Z praxe můžeme jmenovat několik materiálů s vysokou přílnavostí. Jsou to například žvýkačka, suchý zip, plastelína nebo čisté indium.

### 3 Haptika

Haptika je ve virtuálním světě poměrně novým pojmem. Haptiku lze definovat takto [4]: „Haptika je zkoumání člověka cítěním a manipulací pomocí dotyku.“ Převedeme-li to na virtuální svět, získáváme pro haptiku definici:

„Haptika je způsob přijímání informací prostřednictvím přímého vjemu z dotekového zařízení a manipulace s ním.“

Jinými slovy, haptika nám umožňuje ohmatat si virtuální svět.

#### 3.1 Haptické zařízení Phantom

Zařízení PHANTOM OMNI® HAPTIC DEVICE je zařízení s 3D rozhraním produkující hmatovou odezvu, která umožňuje získávat hmatový vjem z virtuálního světa jako ze skutečného světa. Zařízení je zobrazeno na Obr 2.3.3.



Obr. 2.3.3: Haptické zařízení PHANTOM OMNI® HAPTIC DEVICE.

Zařízení je schopné pohybu ve třech osách a generování síly pro každou osu pohybu zvlášť. Zařízení se ovládá pomocí „pera“, které je přichyceno na konec ramena. Pero je možné libovolně posouvat a otáčet. Na peru jsou dvě tlačítka, na která se dají namapovat různé akce. Zařízení je od firmy SensAble.

## **3.2 Haptické knihovny**

Haptické knihovny OpenHaptics vytvořené firmou SensAble Technologies jsou prostředkem, jak do již existující aplikace zapojit haptické vjemy. Uživatel může s pomocí knihoven cítit a pracovat s virtuálními předměty v trojrozměrném prostoru. Uplatnění aplikací využívající zpětné silové vazby můžeme nalézt například v medicíně, hrách, vojenských aplikacích. Haptické knihovny jsou navrženy podle vzoru OpenGL. Ovládají se jako stavový automat, a je tedy snadné je zapojit do existující aplikace. Renderování haptické scény využívá shodný kód jako renderování grafické scény. Renderovanou scénu pak stačí doplnit o definici vlastností materiálů. K haptickému rozhraní se přistupuje pomocí knihoven HDAPI nebo HLAPI, rozdíl je v úrovni přístupu [4], podrobněji bude vysvětleno v následující kapitole.

### **3.2.1 HDAPI**

Knihovna HDAPI je nízkourovňové rozhraní pro renderování scény, které je základní vrstvou pro další komponenty (například i pro HLAPI). Umožňuje přímé renderování síly, přímé řízení běhu ovladačů, konfiguraci ovladačů a ladicí prostředky. Z tohoto důvodu je určena spíše vývojářům, kteří znají základní haptické přístupy. Při využití této knihovny je nutné vytvořit efektivní algoritmy renderující zpětnou vazbu a detekující kolize. Knihovnu je nutné využít při inicializaci a konfiguraci zařízení (`hdInitDevice`) a při uvolnění zařízení (`hdDisableDevice`) i v případě, že se programátor rozhodne pro knihovnu HLAPI.

Knihovna nabízí tyto funkce:

- Zjištění stavu zařízení (pozice, orientace, rychlost, stav tlačítek)
- Zjištění charakteristiky zařízení (typ modelu, verze, sériové číslo, rozměry prac. plochy, teplota motoru, kalibrační schopnosti)
- Nastavení stavu zařízení (síla, kroutící moment)

- Zpracování chybových hlášení
- Kalibrace
- Plánovač

### **3.2.2 HLAPI**

Knihovna HLAPI je vysokoúrovňová knihovna pro jazyk C. Využívá knihovnu HDAPI ke komunikaci s haptickým zařízením. Knihovna je vhodná pro rozšíření hotových grafických aplikací o hmatový vjem. Podobně jako OpenGL je knihovna HLAPI vystavěna jako stavový automat, jehož stav mění příkazy. Knihovna si uchovává vlastní stavy – pozici kurzoru a orientaci kurzoru. Zpětná vazba je zajištěna definováním událostí. Při události (např. dotyk povrchu, zmáčknutí tlačítka..) dojde k vyvolání funkce zpětného volání (callback).

Knihovna nabízí tyto funkce:

- Generování tvarů (OpenGL primitiv)
- Silové efekty (gravitace, tření)
- Nastavení vlastností povrchu (tuhost, možnost dotyku, tlumení)
- Události (reakce na pohyb, dotyk, konec dotyku, tlačítka)



## 4 Existující haptické metody

K řešení problému imitování materiálů haptikou bez přímého naprogramování fyzikálních vzorců vzniklo několik metod, jejichž výstupy produkují uspokojivé hmatové vjemy [3]. V závěru kapitoly se budu věnovat problému spojitosti haptické síly.

### 4.1 Náhodná drsnost

Každé těleso má odlišný povrch, který lze rozpoznat hmatem. Například na dřevu můžeme cítit jednotlivé letokruhy, na textilií vzor látky, na písečné pláži jednotlivá zrnka písku. Pro co nejrealističtější imitaci materiálů je vhodné zohlednit povrchové nerovnosti těles. Pro různé materiály se mohou použít různé metody generování drsnosti. Pro tvrdé a hrubé materiály, jako jsou beton či asfalt, nebo pro imitování zrnka písku je nejjednodušší metodou náhodné generování procentuální změny tření a síly působící proti rydlu na povrchu tělesa. Problém této metody spočívá v nestálosti povrchu, tedy pokud bychom si chtěli ohmatat jedno konkrétní místo na materiálu, bude se zrnitý povrch generovat stále náhodně a jednotlivá zrnka na povrchu budou pokaždé jinde. Tato metoda by byla nepoužitelná pro složitější povrch materiálů, jako je například dřevo. Každý materiál musí mít nadefinován rozsah parametru *drsnost*, představující možnou procentuální změnu ve tření tělesa. Parametr *drsnost* může nabývat hodnot z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Získáváme tedy nový interval  $\langle 0; drsnost \rangle$ , z něhož generujeme pro každý bod materiálu náhodné číslo a tím i povrchovou nerovnost připomínající písečná zrnka.

### 4.2 Tření pomocí háčků

Jeden ze způsobů imitování statického tření může být využití háčků. Háček je bod, který produkuje gravitační pole do určité (kruhové) vzdálenosti. Pokud je rydlo v této vzdálenosti, táhne ho háček do středu gravitačního pole. Při překonání nadefinované vzdálenosti od háčku přestane na rydlo působit přitažlivá síla a tření se může generovat podle známých fyzikálních vzorců. Tato metoda je vhodná pro doplnění texturových metod (viz níže).

### **4.3 Texturové metody**

Každý materiál má určitou texturu povrchu. K imitování této textury je známo několik postupů.

Při využití háčků vysvětlených v kapitole 4.2. můžeme na statické body v textuře nadefinovat konečnou množinu háčků (podle vzhledu textury). Každý z háčků generuje svoje vlastní gravitační pole, které bude přitahovat rydlo, pokud se k němu přiblíží a budou tak vznikat různě velká tření v různých částech textury.

Jiný postup se zakládá na vytvoření 2D nebo 3D sítě pro texturu. Jedním z přístupů může být nadefinování síly pro každý bod v síti. Jiný způsob je definování síly pouze do středu buněk sítě. Výpočet sil v ostatních bodech textury pak musí probíhat za využití jiných metod. Je možné využít např. Gaussův šum nebo texturovací vzory. Vhodné jsou i fraktály, jelikož v přírodě je možné je na mnoha místech nalézt. Pokud se využití fraktálů rozšíří o Fourierovy řady nebo šумы s různou frekvencí a amplitudou, můžeme získat mnohem realističtější a sofistikovanější detaily povrchu.

Další možný způsob generování hmatové textury je přímé využití textury materiálu. Na základě dopadání světla na povrch různých materiálů získává materiál tmavší či světlejší barvu. Ve většině případů je nejtmaší barva v místech, kde má povrch materiálu díry, rýhy, póry a naopak nejsvětlejší jsou nejvýše položené povrchové nerovnosti. Převědeme-li texturu do odstínů šedi, získáme pro každý bod textury číslo nabývající hodnot 0 až 255 vyjadřující barvu v daném bodě. Budeme-li předpokládat, že se světlo nedostává do děr v povrchu a naopak výstupky jsou vysvícené, získáváme tak jasně danou nerovnost pro každý bod na povrchu materiálu. Na základě hodnot textury budeme ovlivňovat všechny složky síly, a materiál tak získá složitý povrch, který působí realisticky.

### **4.4 Spojitost síly**

Na začátku této kapitoly je potřeba vysvětlit pojem haptický update, potřebný k pochopení dalších postupů. Haptický update je nepravidelná událost, při níž haptické zařízení odesílá informace o svém stavu počítači. Mimo jiného tak počítači předává svoji pozici. Průběh haptických updatů je možné pozorovat na Obr. 4.4.1.

Pokud je trojúhelníková síť povrchu materiálů složená z velkých trojúhelníků (tzn. rydlem se nacházíme v ploše jediného trojúhelníku), dochází k velkým změnám

povrchových normál mezi sousedními trojúhelníky. Vznikají tedy ostré hrany, které mohou způsobovat velké nespojitosti v generované síle při pohybu rydla. Řešení tohoto problému může být navýšení počtu trojúhelníků (pokud máme k dispozici dostatečný výpočetní výkon) nebo využití některé z metod na zjemnění přechodu mezi trojúhelníky.

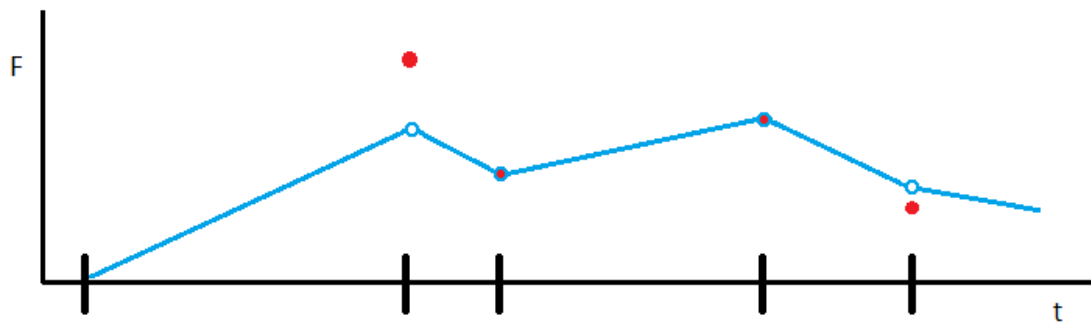
Takovouto metodou může být například Phongovo stínování upravené pro haptiku [7]. Tato metoda se využívá v renderování počítačové grafiky pro trojúhelníkové modely. Pomocí Phongova stínování se zdají být předměty hladké, bez viditelných hran trojúhelníků v síti a barevné přechody jsou spojitě. Algoritmus prochází celou trojúhelníkovou sítí (resp. viditelnou část sítě) a spočítá normálu každého vrcholu sítě. Normály pro ostatní body, které leží v ploše každého trojúhelníku, se spočtou bilineární interpolací s využitím normál vrcholů. Obdobný postup lze využít i pro haptické renderování. Aktuální síla by byla vždy výsledkem aktuální interpolace. Na rozdíl od grafického renderování by v haptickém renderování nebylo potřeba procházet všechny trojúhelníky. K výpočtu síly postačí pracovat s trojúhelníky, které byly zasaženy rydlem, případně s nejbližšími sousedy.

Jiný přístup k docílení spojitě síly a realističtějšího vjemu je interpolace mezi předchozí a současnou silou. K interpolaci se dá přistoupit několika různými způsoby, z nichž každý má svoje klady a zápory.

Jedním z přístupů je interpolace časová. Pro určitý časový úsek  $\Delta t$  povolíme maximální možnou změnu síly  $F_{max}$ , tedy například, že za 0,2 sekundy můžeme změnit sílu maximálně o 0,3 N. Pokud bude rozdíl síly předchozí a současné větší než  $F_{max}$ , nastaví se nová síla jako součet síly předchozí s  $F_{max}$ . Výhoda této metody je zaručení spojitosti síly a pro rychlé počítače i zaručení realistického vjemu. Problém ale nastává u pomalých počítačů, jejichž update haptického zařízení probíhá jen několikrát za sekundu. Snadno poté nastává situace, kdy je změna síly příliš velká a její hodnoty se kvůli nedostačujícím haptickým updatům nestihne dosáhnout. Dochází tak k velké nerealističnosti hmatového vjemu. Další problém může nastat u různě zatěžovaných počítačů, například pokud se na počítači spouští různý počet náročných aplikací najednou. Update haptického zařízení může kolísat a způsobit tak podobné jevy jako na pomalém počítači. Koeficienty  $F_{max}$  a  $\Delta t$  je totiž nutno pevně stanovit na začátku běhu programu.

Jiný přístup je zpětná interpolace opožděná o jeden haptický update. Pamätujeme si sílu spočtenou při předchozím haptickém updatu a sílu spočtenou při

aktuálním haptickým updatu. Mezi těmito silami provedeme interpolaci, kdy aktuální síla bude rovna předchozí síle navýšené o maximální možnou změnu síly za jeden snímek  $F_{max}$ . Sílu navyšujeme do té doby, dokud nedosáhneme požadované aktuální síly, nebo dokud nenastane nový haptický update. Při novém haptickém updatu spočteme novou aktuální sílu a opět se k ní začneme blížit se silovým krokem  $F_{max}$ . Průběh této interpolace je k vidění na Obr. 4.4.1.



Obrázek 4.4.1: Černé svíslé čáry představují haptické updaty na časové ose. Červené tečky představují požadovanou sílu, modré tečky představují skutečně dosaženou sílu, červenomodré tečky představují shodu požadované a skutečné síly. Modré čáry představují průběh síly.

Nevýhoda této metody je ve faktu, že se v podstatě pohybujeme v minulosti. Hmatový vjem, který pocítujeme, vždy přísluší hmatovému vjemu minulého haptického updatu. Na rychlém počítači, jehož počet haptických updatů je velmi vysoký, je toto zpoždění zanedbatelné. Problém je u pomalého počítače, kdy se může stát, že přejedeme rydlem do plochy, která negeneruje žádnou sílu, nebo mimo plochu, a přesto ještě nějakou chvíli cítíme hmatový vjem. Další nevýhodou je závislost kroku  $F_{max}$  na počtu grafických snímků celého programu. Tedy aby byl silový krok stejný v každém okamžiku běhu programu (a nedocházelo tak k nechtěnému „kopání“ haptického zařízení), je nutné krok  $F_{max}$  ovlivňovat aktuálním počtem grafických FPS [frame per second / snímky za sekundu]. Toto opatření ale zajistí, že se síla bude měnit s konstantním krokem nezávisle na rychlosti počítače. Aplikace se tím stává snadno přenositelná.

## 5 Celková síla

Po shrnutí již vysvětlených dílčích silových složek můžeme přejít k výpočtu celkové síly. Výpočet síly je odlišný pro deformovatelné a nedeformovatelné materiály.

### 5.1 Materiály bez deformace

Výpočet síly pro nedeformovatelné materiály je mnohem jednodušší než výpočet síly pro deformovatelné materiály. Celkovou sílu získáme jednoduchým součtem tvrdosti a pružnosti. Do bočních sil započítáme tření ovlivněné drsností  $d$ .

Výpočtový vzorec pak vypadá takto:

$$\begin{aligned} F_z &= F_{tvrdost} + F_{pružnost} \\ F_{xy} &= F_{tř} * d, \end{aligned} \tag{5.1}$$

kde  $F_{tvrdost}$  je síla spočtená ze vzorce 2.1 [N],  $F_{pružnost}$  je síla spočtená ze vzorce 2.2 [N],  $F_{tř}$  je síla spočtená ze vzorců 2.3 a 2.4 (podle rychlosti pohybu) a  $d$  je bezrozměrný koeficient drsnosti vysvětlený v kapitole 4.1.

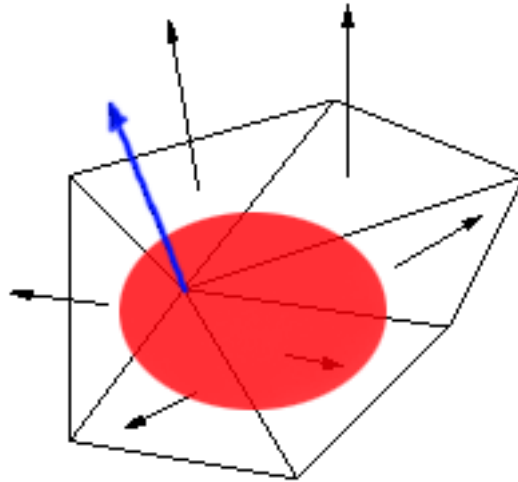
Výslednou sílu je možné ovlivnit dalšími faktory, jako jsou přilnavost (viz vzorec 2.5) nebo haptickými metodami vysvětlenými v kapitole 4.

### 5.2 Materiály s deformací

Případ materiálů s deformací je o něco složitější. Výpočet výsledné síly není jednoduchý z důvodů vzniku vrypů. Je nutné nalézt metodu, která by odpovídala reálnému rytí. Tedy při začátku rytí musí působit síla kolmo vzhůru. Při pohybu rydla do stran musí síla působit vždy proti tomuto pohybu. Navíc musí být síla ovlivněná rychlostí rytí. Čím rychleji ryji, tím větší odpor musí těleso klást.

Nejtriviálnějším řešením je použití vzorce (5.1) pro materiály bez deformace. Vzorec ale nedokáže generovat příslušné boční síly při pohybu uvnitř vrypu, takže se metoda musí rozšířit o výpočet směru a rychlosti pohybu a rozdělení celkově působené síly ve správném poměru do příslušných bočních složek síly.

Metoda, která se zdá být nejlepším řešením, využívá normály trojúhelníkové sítě [8]. Její hlavní princip spočívá v nalezení zasažených trojúhelníků při vniku rydla do tělesa. Z těchto trojúhelníků spočteme celkovou normálu (viz Obr. 5.2.1).



Obr. 5.2.1: Výsledná normála z oblasti zasažené rydlem: červená plocha představuje plochu rydla. Černé šipky představují normálu každého ze zasažených trojúhelníků. Modrá šipka představuje výslednou normalizovanou normálu, která je průměrem normál zasažených trojúhelníků.

K plnému porozumění vzorce pro výpočet celkové normály je nejprve potřeba vysvětlit pojmy norma a normalizace. Norma je funkce, která každému nenulovému vektoru přiřazuje kladné reálné číslo označované jako délka nebo velikost vektoru. Norma se spočítá jako:

$$\|\vec{n}\| = \sqrt{n_0^2 + n_1^2 + \dots + n_r^2},$$

kde  $\vec{n}$  je vektor, jehož normu počítáme,  $n_0, n_1, \dots, n_r$ , jsou jednotlivé složky vektoru a  $\|\vec{n}\|$  je norma vektoru.

Normalizace je funkce, která upravuje jednotlivé složky každého nenulového vektoru tak, aby platil vztah  $\|\vec{n}\| = 1$ . Normalizovaný vektor se spočítá jako:

$$\frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} = \left( \frac{n_1}{\|\vec{n}\|}, \frac{n_2}{\|\vec{n}\|}, \dots, \frac{n_r}{\|\vec{n}\|} \right),$$

kde  $\vec{n}$  je vektor, který normalizujeme,  $\|\vec{n}\|$  je norma vektoru a  $n_0, n_1, \dots, n_r$ , jsou jednotlivé složky vektoru.

Pro úplnost vysvětlím ještě výpočet normály trojúhelníku. Mezi každými dvěma vrcholy dokážeme spočítat vektor  $\vec{u}$ :

$$\vec{u} = (b_1 - a_1; b_2 - a_2; \dots; b_r - a_r),$$

kde  $a_1, a_2, \dots, a_r$  jsou složky prvního vrcholu a  $b_1, b_2, \dots, b_r$  jsou složky druhého vrcholu.

Pro výpočet normály trojúhelníku potřebujeme dva takovéto vektory. Normála trojúhelníku se následně spočte vektorovým součinem:

$$\vec{n} = (\vec{u} \times \vec{v}),$$

kde  $\vec{u}$  a  $\vec{v}$  jsou vektory trojúhelníku a  $\vec{n}$  je normála trojúhelníku.

Nyní už známe všechny potřebné vztahy pro nadefinování vzorce výpočtu celkové normály oblasti zasažené rydlem:

$$\vec{w} = \frac{\sum_{p=0}^r \left( \frac{\vec{n}_p}{\|\vec{n}_p\|} * S_p \right)}{r},$$

kde  $\vec{n}_p$  je normála  $p$ -tého trojúhelníku,  $\|\vec{n}_p\|$  je norma  $p$ -tého trojúhelníku,  $S_p$  je obsah  $p$ -tého trojúhelníku [m],  $r$  je celkový počet trojúhelníků zasažených rydlem a  $\vec{w}$  je celková normála zasažené oblasti.

Výsledná normála směřuje vždy proti směru pohybu.

## 6 Navržené řešení

V této kapitole se pokusím vysvětlit všechny postupy, které jsem využil, a popíši další podproblémy, které jsem musel řešit. Nejprve se zaměřím na jednotlivé vlastnosti materiálu, který je definován tvrdostí, pružností, třením, drsností a texturou. Dále se zaměřím na prototypy materiálů, které jsem na základě těchto vlastností dokázal navrhnout. Nakonec vysvětlím způsob výpočtu celkové síly, který probíhá odlišně pro deformovatelné a nedeformovatelné materiály. Pro nedeformovatelné materiály jsem využil normálovou metodu (popsanou v kapitole 5.2), kterou vymyslel Ing. Petr Vaněček, Ph.D. Tuto metodu mi musel pomoci naimplementovat Ing. Václav Purchart, z důvodu využití některých metod původního programu. Implementace ostatních částí řešení je moje vlastní.

### 6.1 Vlastnosti materiálu

Materiál definuji vlastnostmi tvrdost, pružnost, tření, drsnost a texturou, podrobnosti o těchto vlastnostech byly uvedeny v kapitole 2. Níže uvedené hodnoty koeficientů a sil nebylo možné odvodit z fyzikálních vzorců. Jejich hodnoty byly zjištěny na základě experimentů po implementaci algoritmů v programu.

Plochu rydla  $S_{rydla}$  uvažuji v jednotkové velikosti. Pro nedeformovatelné materiály je tato volba vyhovující z důvodu zmenšené velikosti rydla, které místo tvaru razítka imituje tvar propisky tím, že je celá jeho rycí plocha soustředěná do jednoho bodu. U deformovatelných materiálů tento přístup volit nelze z důvodu neúměrné výpočtové složitosti. Při zarytí rydla a vytvoření vrypu je nutné zjemnit trojúhelníkovou síť vytvořením nových trojúhelníků v okolí vrypu. Pokud je plocha rydla jediný bod, vytváří se při zarytí nové trojúhelníky, jejichž vrcholy jsou buď velice blízké, nebo soustředěné do jediného bodu. Počítání s takovými trojúhelníky vede k neúměrné výpočetní složitosti, numerickým problémům a tím i k pádu programu. Stanovením jednotkové plochy rydla pro deformovatelné materiály se dopouštím chyby, ale současné práce probíhají pouze s malým základním kruhovým rydlem, tudíž chyba je zanedbatelná.

Tvrdost je reprezentována reálnou silou zadávanou v Newtonech. Bohužel haptické zařízení nedokáže generovat tak velkou sílu, aby výsledný hmatový vjem



působil reálně. Maximální možná tvrdost tedy činí 10 N, a sílu tvrdosti  $T$  je tedy možné stanovit v rozmezí 0 až 10 N.

Pružnost je ovlivňována koeficientem pružnosti materiálu  $p$ . Tento koeficient je bezrozměrný a pro zachování realistických vjemů je vhodné jej stanovovat v rozmezí 1 -15. Koeficient pružnosti nesmí být menší než 1, neboť by tak sílu zmenšoval, nuloval či obracel její směřování. Pružnost je nadále ovlivněná hloubkou vrypu  $h$ , tedy rozdílem mezi aktuální pozicí rydla a výškou trojúhelníkové sítě v daném bodě. Čím hlouběji zaryji, tím větší síla tlačí proti mně. Při návratu k povrchu materiálu se síla snižuje.

Tření je působeno pouze na povrchu materiálu. Využil jsem tření klidového a smykového tření (viz kapitoly 2.3.1 a 2.3.2). Výpočet probíhá na základu změny pozice rydla mezi jednotlivými haptickými updaty. Z těchto dvou pozic zjistím rychlost, jakou se rydlo pohybuje a kterým směrem. Podle velikosti rychlosti generuji buď tření statické, nebo dynamické. Tření je posléze ještě nutné přerozdělit do různých os pohybu. Musím zjistit změnu x-ové a y-ové složky pohybu rydla a ve stejném poměru, v jakém jsou změny složek, rozdělit míru působené síly pro každou osu.

Drsnost jsem dříve počítal za použití generátoru náhodných čísel ovlivněným koeficientem *drsnost* (viz kapitola 4.1). Výsledek nabýval hodnot z intervalu  $\langle 0; drsnost \rangle$  a následně jím bylo přenásobeno aktuální tření. Tím docházelo k imitaci nerovností. Výsledný materiál byl zrnitý a libovolně drsný dle koeficientu drsnosti, ale veškeré povrchové nerovnosti byly náhodné a neustále se měnily. Nešlo si tedy osahat jedno konkrétní zrnko. I když tento postup nevedl ke kýženým výsledkům, dokázal jsem si na něm ověřit funkčnost mnou navržené metody využívající grayscale složku textur.

Jelikož bylo potřeba imitovat jakýkoliv povrch s jakoukoli nerovností, aniž by přidání nového materiálu dělalo problémy, navrhl jsem algoritmus využívající černobílou složku textury, která je použita ve vizuální části programu pro zobrazení materiálu. Tuto texturu je nutno desaturovat a uložit ve formátu PGM (Portable Gray Map) v libovolném programu na úpravu obrázků (některý program dělá desaturaci automaticky při převodu do PGM souboru). Soubory typu PGM obsahují typ souboru, komentář k souboru, šířku a výšku uložené textury, maximální barevný rozsah (tedy 255 pokud se v textuře nachází dokonale bílá barva) a pak následují barevné intenzity v jednotlivých pixelech (po výčtu pixelů z jedné řádky oddělených mezerou vždy následuje znak <Enter>) viz Obr. 6.1.1.

```

P2
# Created by IrfanView
10 10
255
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 255 225 225 225 225 255 0 0
0 0 255 225 225 225 225 255 0 0
0 0 255 255 255 255 255 255 0 0
0 0 255 255 255 255 255 255 0 0
0 0 255 255 255 255 255 255 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

```

Obr 6.1.1: Ukázka PGM souboru pro 10 pixelů široký černý čtverec s bílým středem. Výstup byl uložen programem IrfanView.

Samotný algoritmus generování nerovností na povrchu probíhá následovně. Program nejprve načte PGM soubor, podle šířky a výšky textury alokuje místo v paměti pro pole, které naplní intenzitami jednotlivých pixelů. Podle pozice rydla se neustále přepočítává *index* ukazující do pole, na každé pozici je tedy vždy intenzita aktuálního pixelu v daném místě textury. Výpočet nerovností probíhá odlišně pro z-ovou složku síly oproti x-ové a y-ové. Je nutné zdůraznit, že tato metoda neřeší výpočet síly působené tělesem (ten bude vysvětlen v kapitole 8), ale pouze míru úpravy celkové síly. Úprava síly ovlivní působenou svislou sílu a změní její velikost dle intenzity pixelu v daném bodě. Vznikají tak výškové nerovnosti, které vhodně imitují různé praskliny, rýhy či vyvýšeniny na povrchu materiálu.

Celková upravená síla závislá na textuře materiálu v každém jejím bodě se vypočítá jako:

$$Force_z = F_z * ((textura[index]/255) * drsnost + 1),$$

kde  $F_z$  je síla působená tělesem [N],  $textura[index]$  je pole intenzit pixelů na pozici *index* (číslo z intervalu  $\langle 0, 255 \rangle$ ), *index* je ukazatel do pole  $textura[]$ , *drsnost* je bezrozměrné číslo z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Intenzitu pixelu ve vzorci dělím 255 z důvodu nutnosti získat číslo z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Úprava je dále zvětšená o 1 z důvodu potřeby udržet výsledek v intervalu  $\langle 1;2 \rangle$ . Tyto úpravy zajistí, že  $Force_z$  bude stejná nebo vyšší než  $F_z$ . Texturová metoda ji nemůže zmenšit. Jsou tak zachovány vlastnosti materiálu, jako je tvrdost nebo pružnost.

Výpočet zbylých dvou složek síly se liší z důvodu odlišného vnímání působení vodorovných sil oproti svislé síle. Zároveň by velké působení bočních sil pouze na základě textury mohlo působit nerealisticky. Je tedy potřeba určit, do jaké míry bude působit předem spočtené tření  $F_{\text{tření}}$ . Cílem je získat pro bílou barvu menší tření (jeví se jako hladká), a pro černou barvu větší tření (jeví se jako drsná). Toto rozdělení pochází z logické úvahy, kdy se světlo nedostává do vrypů a děr na povrchu materiálu a ty jsou tak temnější viz Obr. 6.1.2.

Upravené boční síly se tedy spočítají takto:

$$Force_{xy} = F_{xy} * ((255 - \text{textura}[\text{index}]) / 255) * 2 * \text{drsnost},$$

kde  $F_{xy}$  jsou předem spočtené boční třecí síly [N],  $\text{textura}[\text{index}]$  je pole intenzit pixelů na pozici  $\text{index}$  (číslo z intervalu  $\langle 0, 255 \rangle$ ),  $\text{index}$  je ukazatel do pole  $\text{textura}[]$ ,  $\text{drsnost}$  je bezrozměrné číslo z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Odečet intenzity pixelu od čísla 255 slouží k zajištění předpokladu, že bílá barva je hladší a černá drsnější.  $\text{drsnost}$  se násobí dvěma z důvodu snížení vlivu změny na tření. Úprava tedy může nabývat hodnot z intervalu  $\langle 0, 2 \rangle$ . Může tak tření zcela vynulovat, nebo až zdvojnásobit.



Obr 6.1.2: Vlevo je ukázka černobílé textury (PGM soubor), který určuje povrchové nerovnosti. Vpravo je samotná textura, která je vidět ve vizuální části programu.

## 6.2 Prototypy materiálů

V programu je realizováno osm materiálů. Přehled materiálů je uveden v tabulce 6.1. Tvrdost  $T$  [N] představuje základní sílu, kterou materiál působí. *drsnost* [-] představuje maximální procentuální využití textury materiálu pro generování povrchových nerovností. Koeficient pružnosti  $p$  [-] představuje míru vznikajících pružných sil. Koeficienty tření  $\mu$  [-] a  $k$  [-] jsou určeny povrchem materiálu. Asfalt a beton jsou netvrďší materiály, vzduch je nejměkčí materiál, který zařízení dokáže imitovat. Vzduch není v programu implementován, zde je uveden jen pro ukázkou nastavení vhodného pro nulovou sílu.

Materiál	$T$ [N]	$p$ [-]	$\mu$ [-]	$k$ [-]	drsnost [-]
Písek (deformovatelný)	6	2	0,06	0,02	0,6
Asfalt	10	1,7	0,05	0,02	1
Textil	6	3	0,07	0,03	0,4
Dřevo	10	1	0,08	0,03	1
Vata	1,5	2	0,08	0,04	0,5
Sklo	10	1	0,0005	0,0002	1
Písek (nedeformovatelný)	10	1	0,06	0,02	0,9
Beton	10	1	0,07	0,03	1
Dlaždice	10	1	0,02	0,01	0,9
Vzduch	0	1	0	0	1

Tabulka 6.1: Tabulka navržených materiálů: druh materiálu, tvrdost  $T$  jako síla působící proti rydlu, pružnost  $p$  jako síla zvětšující se s hloubkou zanoření rydla, koeficient klidového tření  $\mu$ , koeficient smykového tření  $k$  a *drsnost* jako míra nerovností na povrchu.

## 6.3 Celková síla

Pro nedeformovatelné materiály využívám k výpočtu celkové síly vzorec 5.1. Tento vzorec bylo nutné rozšířit o mechanismus přiblížení k povrchu materiálu. Vyskytl se totiž následující problém. V reálném světě mohou jezdit špičkou rydla po tělesu, aniž by na mě těleso působilo velkou protisilou. Cítím pouze tření a drsnost povrchu tělesa. Až v momentě, kdy rydlem zatlačím do tělesa, projeví se tvrdost a pružnost tělesa. Definovaný výpočet síly se chová trochu jinak. Dokud se tělesa nedotýkám, síla je

nulová. Jakmile ale překročím jeho hranici, byť jen o setinu milimetru, vygeneruje se síla podle vzorce, haptické zařízení sebou cukne a vytlačí rydlo daleko od tělesa. Je tedy nutné zavést určitou přibližovací metodu, která bude určovat, na kolik procent působí výsledná síla. Zavedl jsem tedy hranový koeficient. Koeficient je nulový, pakliže jsem v dostatečné vzdálenosti od tělesa. V momentě, kdy se přiblížím k hraně tělesa, začne hranový koeficient růst k jedničce. Až v momentě, kdy ponoření rydla převyšší nadefinovanou hodnotu, začne síla působit naplno (koeficient se nastaví na jedničku). V současném řešení je plocha rydla brána v jednotkové velikosti, jelikož pracuji pouze se základním malým kruhovým rydlem. U složitějších rydel bude nutné počítat plochu rydla.

Pro nedeformovatelné materiály se nejlépe osvědčila normálová metoda popsaná v kapitole 5.2. Za pomoci Ing. Purcharta jsme do haptické smyčky zapojili vyhledávání trojúhelníků zasažených rydlem. Metoda vyhledávající trojúhelníky zasažené rydlem již byla součástí předchozího problému, takže jsme ji jen využili v haptické smyčce. Normála každého z těchto trojúhelníků je spočtena, normalizována, přenásobena plochou trojúhelníků a započtena do celkové sumy normál. Suma normál se na závěr podělí počtem zasažených trojúhelníků a výsledkem je normála zasažené oblasti, jejíž směr je proti směru pohybu rydla a jejíž velikost je přímo úměrná výsledné síle. Tento postup je podrobně vysvětlen v kapitole 5.2. Nutno ještě podotknout, že na základě subjektivního vnímání jsem opět snížil velikost působené síly na osách  $x$  a  $y$  oproti ose  $z$ , jelikož hmatový vjem pak působil mnohem realističtěji.

## 7 Implementace

Program Ing. Purcharta je psán v jazyce C++. Volba tohoto jazyka zajišťuje rychlý běh programu, což je pro real-time aplikaci velice důležité. Mojí prací je modifikace modulu HapticInterface.cpp a hapticHandler.h.

V modulu HapticInterface.cpp jsou metody pomáhající při práci se zařízením, nebo poskytující pomocné výpočty. V moduluu hapticHandler.h je samotná haptická smyčka zprostředkovávající výpočet sil.

V pseudokódu vypadá haptická smyčka pro nedeformovatelné materiály takto:

```
Callback(){
    hdGetCurrentDevice();
    hdBeginFrame(); //začni haptickou smyčku
    hdGetDoublev(); //zjisti pozici zařízení
    nastav_hranovy_koeficient(); //nastav hranový koeficient podle polohy zařízení
    if(pod_urovni_materialu) { //pokud jsem v materiálu
        sila_Z = spocti_silu_Z(); //vypočti sílu, která bude působit
    }
    else sila_Z = 0; //jinak je síla nulová (jsem nad povrchem materiálu)
    if(treni_uzneno){ //pokud vzniká tření (jsem na povrchu materiálu)
        sila_X = spocti_treni_X(); //spočti složku tření pro osu X
        sila_Y = spocti_treni_Y(); //a pro osu Y
    }
    Spocti_nerovnosti_z_textury(); //podívá se na hodnotu pixelu v daném místě
    Interpoluj_silu(); //výsledná síla se interpoluje
    Uprav_silu(drsnost); //a upraví všechny složky síly (vytvoří nerovnost)
    hdSetDoublev(sila); //Odešli vypočtenou sílu do zařízení
    hdEndFrame(); //ukonči haptickou smyčku
}
```

## 8 Výsledky

V této kapitole se zaměřím na řešení problému, který se vyskytl při výpočtu síly pro deformovatelné materiály, a na věrohodnost materiálů z kapitoly Prototypy materiálů. Nakonec se zaměřím na testování hmatového vjemu veřejností.

### 8.1 Celková síla

Výpočet síly pro nedeformovatelné materiály byl o mnoho jednodušší než pro deformovatelné materiály. K výpočtu jsem využil vzorec 5.1, který jsem rozšířil o texturovou metodu využívající černobílou složku textury popsanou v kapitole 6.1. Tento postup poskytuje poměrně realistickou hmatovou odezvu.

Situace s nedeformovatelnými materiály už nebyla tak jednoduchá. V průběhu vývoje vhodné metody jsem vyzkoušel několik postupů, které se ukázaly být slepými uličkami. Jako první se nabízel postup použitý u nedeformovatelných materiálů. Tento postup je funkční, pakliže ryji do nezryté plochy. Síla působila vždy kolmo vzhůru, což bylo dostatečné, i když stále chyběly boční složky síly. Tato metoda ale narazila na jeden vážný problém. Pokud se rydlo nacházelo v hlubokém vrypu a náhle se s rydlem přejelo na nezrytou plochu, došlo k velkému výškovému skoku. Program vygeneroval sílu úměrnou změně výšky a haptické zařízení tak okamžitě změnilo sílu z nulové na nenulovou. Výsledek bylo cukání zařízení a nerealistické výkyvy v generované síle.

Řešením tohoto jevu může být interpolace jednotlivých sil. Zde jsem ale narazil na další problém – malé a nepravidelné vzorkování dat ze zařízení. V průměru se zařízení updatovalo pětkrát za sekundu. Vzorky se podle měření získávaly v intervalech od 50 do 700 milisekund, což velice znesnadňuje výpočet změny síly. Další nepříjemností této metody je její zpoždění. Jelikož interpolujeme ze starší síly k aktuální, jsme vždy o jeden krok pozadu. V průběhu vývoje programu jsem se přesunul na rychlejší počítač, kde tato metoda vylepšená interpolací fungovala dobře. Na realističnosti jí ale znatelně ubírá, že působená síla je vždy svíslá. Když se pohybuji v hlubokém vrypu, měla by na mě působit síla proti směru pohybu, tedy boční síla. Modifikace síly při rytí do stran by se provedla po výpočtu směru pohybu a rozdělení celkové síly do jednotlivých os pohybu ve stejném poměru, v jakém by byly jednotlivé změny polohy na osách. Normálová metoda popsaná v kapitole 5.2 ale toto řeší už svým základním principem, proto jsem namísto modifikace metody implementoval ji.

## **8.2 Vlastnosti materiálů**

U navržených nedeformovatelných materiálů se vyskytl problém s jejich tvrdostí. Měly by být absolutně tvrdé, tedy že do nich rydlo neudělá žádný vryp při jakékoliv síle. Zde ale nedostačují vlastnosti haptického zařízení, jehož maximální možná síla činí přibližně 10 N, což nestačí k věrohodné imitaci tvrdých materiálů, jako je např. beton. Každému nedeformovatelnému materiálu se lze snadno dostat rydlem pod povrch, aniž by vznikaly vrypy, i když by to mělo být fyzikálně nemožné. Tento nepříjemný jev bylo nutno řešit alespoň vizuální stránkou aplikace, jelikož vizuální vjem velice doplňuje vjem hmatový. Pokud se tedy rydlo dostane pod povrch tělesa, generují sílu podle stanovených vzorců, ale rydlo samotné stále zobrazují na povrch materiálu. Realistické vjemy přichází až u měkčích materiálů jako je vata nebo textil.

Další nepříjemnost nastává u materiálů s vysokou pružností. Program bohužel není schopný poskytovat vizuální stránku pro pružné materiály. Bylo by potřeba upravovat trojúhelníkovou síť a nadefinovat její pohyb při zatlačení rydlem. Z tohoto důvodu program není vhodný pro imitování materiálů s vysokou pružností. Je sice schopný generovat pružnou sílu, ale chybějící vizualizace uhýbajícího materiálu kazí celkový dojem.

Nepříjemným zjištěním bylo nedodržování formátu PGM, potřebným pro načítání textur materiálů, v různých programech. Například program GIMP nedodržuje pravidlo vkládání znaku <Enter>. Správně by měl program uložit pixely z celé jedné řádky a pak vložit znak <Enter>. Program GIMP vkládá znak <Enter> za každou hodnotu pixelu. Další nepříjemnost nastala s programem IrfanView. Ten ukládá soubory PGM správně podle předpisu. Jakmile ale velikost textury překročí určitou hodnotu, přestane program správně vkládat znak <Enter> a do většiny hodnot pixelů uloží hodnotu 0. Po těchto zjištěních jsem se rozhodl využívat výstup programu GIMP (tedy znak <Enter> za každou pixelovou hodnotou), jelikož je tento program zcela zdarma a jeho výstup je stabilní nezávisle na velikosti textury.

## **8.3 Testování**

Na závěr své práce jsem na základě domluvy s prof. Kolingerovou a Ing. Purchartem naprogramoval testovací verzi programu rytí do písku. Testovací verze se sestává ze čtyř testovacích kategorií a je určená pro testování subjektivního hmatového



vjemu veřejností. Nutno připomenout, že zařízení Phantom nejvíce připomíná pero, což celé testování ztížilo nutností představy rytí předmětem podobným peru. V testování jsou naprogramovány tyto materiály: asfalt, beton, dlaždice, dřevo, písek, sklo, textil a vata.

### **8.3.1 Podoba testování**

Testování se postupně zaměřilo na několik složek lidského vnímání. V první části testování byla testovacím osobám promítána pouze šedá plocha, která ukryvala vždy jeden z osmi povrchů navržených materiálů. Testovací osoba měla pouze na základě hmatového vjemu určit, o jaký materiál se jedná. Tento způsob byl postupně aplikován na všech osm povrchů.

Druhá část testování přidala ke hmatovému vjemu i vjem vizuální. Materiály již byly zobrazené s texturami a úkolem testovacích osob bylo ohodnotit celkový hmatově vizuální vjem materiálu některou z možností: výborný, chvalitebný, dobrý, dostatečný, nedostatečný.

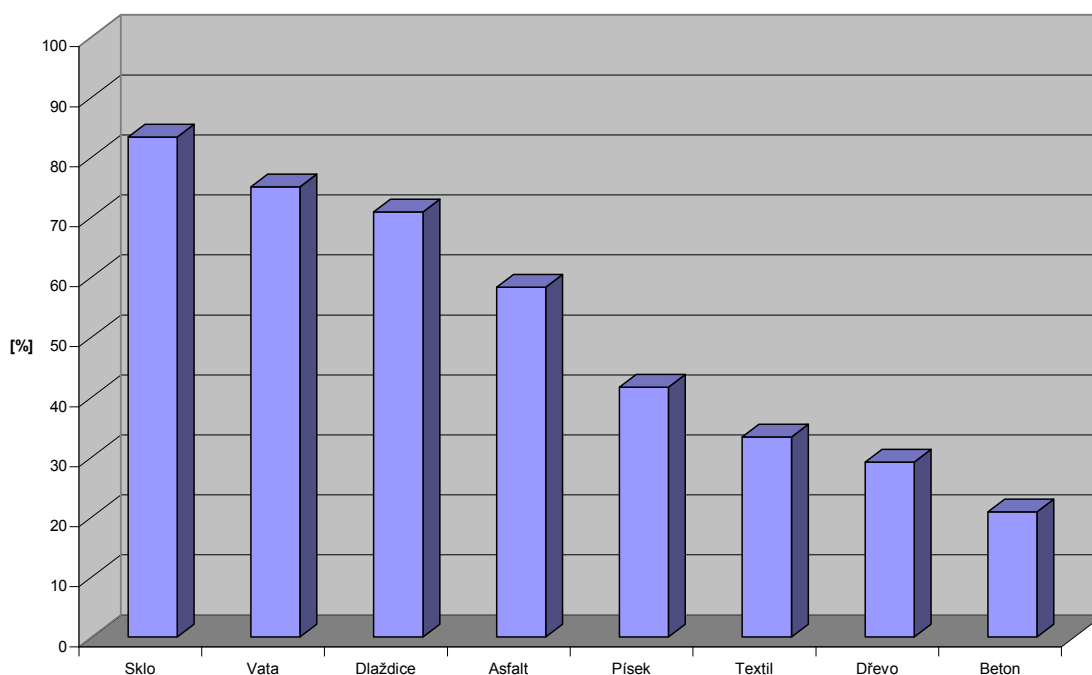
Třetí část testování se zaměřila na schopnost testovacích osob představit si ohmatávaný povrch. Ve dvou testech byly pod šedou plochu schovány dva kontinenty, které musely testované osoby uhodnout jen na základě hmatového vjemu a vlastní představivosti.

Závěrečná čtvrtá část testování sestávala z rytí do písku, tedy účelu, ke kterému byl program původně vytvořen. Osoby měly za úkol vyrýt do písku čtverec a zhodnotit, jak dobře se jim se systémem pracovalo.

### **8.3.2 Výsledky testování**

Testování se zúčastnilo celkem 24 testovacích osob – 5 žen a 19 mužů. Z důvodu nízkého počtu žen a velkému nepoměru oproti mužům nemá smysl porovnávat výsledky testování mezi pohlavími. Obdobně se testovací skupina nehodí ani na rozčlenění podle věkových skupin, jelikož 19 testovacích osob bylo mezi 20 až 30 lety.

V první části testování hádaly testovací osoby, který materiál ohmatávají. Výsledky testování jsou k vidění v grafu č. 8.1.



Graf č. 8.1: Úspěšnost tipování testovacími osobami na základě hmatového vjemu

Nejlépe si vedl materiál Sklo, jehož hladký povrch je snadno rozpoznatelný. Vata, která skončila druhá, je nejměkčím materiálem ze skupiny a zřejmě proto získala tak dobré umístění. Materiály dřevo, beton a písek byly velice často zaměňovány mezi sebou. Všechny tři jsou tvrdé (písek byl v tomto testu bez možnosti deformace) a drsné. Beton je popraskaný a dřevo obsahuje rýhy vyhloubené živočichy. Nemožnost deformovat písek byla zřejmě pro mnohé matoucí. Z těchto důvodů mohly být tyto materiály snadno zaměňovány. Asfalt je sice také tvrdý a drsný materiál jako beton a dřevo, ale jeho povrchové nerovnosti sestávají z malých kamínků, které se ukázaly být snadno rozpoznatelnými.

V druhé části testování hodnotili testovací osoby vizuální a hmatový vjem materiálů. Jako odpověď mohli zvolit jednu z možností: výborný, chvalitebný, dobrý, dostatečný a nedostatečný. Převědeme-li tato slova do číselné hodnoty, získáme tak známkování jako ve škole, a můžeme tak snadno udělat číselný průměr, který bude lépe vypovídat o výsledcích. Nejlépe si v tomto testu vedl materiál sklo, který získal průměr 1,33, následovaný dlaždicemi (1,41) a asfaltem (1,83). Nejhůře dopadlo hodnocení pro dřevo (2,92) a pro písek (2,5) (viz Tab. 8.1).

Sklo	Dlaždice	Asfalt	Beton	Vata	Textil	Písek	Dřevo
1,33	1,42	1,83	1,87	2,33	2,37	2,5	2,92

Tab. 8.1: hodnocení jednotlivých materiálů na základě vizuální a hmatové složky.

Ve třetí části musely testovací osoby uhádnout dva kontinenty. V prvním testu ohmatávali Austrálii, v druhém Afriku. Austrálii uhodlo 54,17% osob, Afriku 83,33%. Tento velký rozdíl v úspěšnosti může být způsobený tvarem pobřeží Austrálie, který je oproti Africe velice členitý a proto byl zaměňován s jinými kontinenty.

V závěrečné části testu hodnotily testovací osoby práci s programem a zařízením při rytí čtverce do písčné pláže. Tento test získal průměrné hodnocení 2,75 (jedná se o též průměrné hodnocení jako u druhé části testování).

## 9 Závěr

Seznámil jsem se programem Ing. Purcharta a s problémem chybějící hmatové složky. Seznámil jsem se se zařízením Phantom a s jeho knihovny. Prostudoval jsem fyzikální pojetí materiálů a implementoval některé z vlastností do programu. Navrhl jsem drsnost, další vlastnost materiálů, která nevyhází z fyzikálních, vzorců a texturovou metodu zajišťující reálné hmatové nerovnosti na povrchu materiálu. Rozdělil jsem materiály na deformovatelné a nedeformovatelné a stanovil jsem výpočtové vzorce generování síly pro tyto dvě skupiny. Nedeformovatelné materiály generují sílu podle základního porovnání rozdílu výšky rydla a terénu v daném bodě. Deformovatelné materiály generují sílu podle vektorové metody, kdy je síla určena normálou aktuálně zasažených trojúhelníků rydlem. Vyzkoušel jsem několik různých postupů na zachování spojitosti síly a využil vlastní interpolační metodu. Navrhl jsem osm různých materiálů a vystavěl na nich testování veřejností, jehož výsledky jsem posléze zhodnotil.

Do budoucna by bylo možné definovat materiálům další vlastnosti, jako je například přilnavost, a zvýšit tak rozmanitost možných výsledků. Do budoucna by bylo možné materiálům definovat nové vlastnosti a dosáhnout tak rozmanitějších výsledků. Například přilnavost materiálu, s kterou by bylo možné imitovat materiál podobný žvýkačce (při zvednutí rydla by se táhla za rydlem) nebo materiál podobný suchému zipu. Dále pokud by se naimplementovaly metody starající se o práci s trojúhelníkovou sítí povrchu, daly by se vytvořit materiály s vysokou pružností, jako je například gel.

## Literatura

[1] Fyzikální základy vědy o materiálu.

URL: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/index.htm>

[2] Fyzikální základy vědy o materiálu.

URL: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet2.htm>

[3] Ming C. Lin, Miguel A. Otaduy: Haptic Rendering, A K Peters, 2008

[4] Mandayam A Srinivasan: What is haptic, Massachusetts Institute of Technology, SensAble Technologies,

URL: [http://www.sensable.com/documents/documents/what\\_is\\_haptics.pdf](http://www.sensable.com/documents/documents/what_is_haptics.pdf)

[5] OpenHaptics Toolkit: Programmer's guide. SensAble Technologies 1999-2008.

URL: [www.sensable.com/documents/documents/OpenHaptics\\_ProgGuide.pdf](http://www.sensable.com/documents/documents/OpenHaptics_ProgGuide.pdf)

[6] Josef Janík: Bakalářská práce: Fyzika tření, Masarykova univerzita, 2008

URL: [http://is.muni.cz/th/199446/pedf\\_b/Fyzika\\_treni.doc](http://is.muni.cz/th/199446/pedf_b/Fyzika_treni.doc)

[7] Prof. Ing. Václav Skala, CSc., předmět Základy počítačové grafiky, ZČU 2011

[8] Ing. Petr Vaněček, Ph.D., osobní konzultace